



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN
TRIAxIAL CIU Y CID EN LABORATORIO LEMCO PARA
POSTERIOR ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE LA
TEORÍA DEL ESTADO CRÍTICO**

Memoria de Titulación presentada por
RODOLFO ALEJANDRO ROJAS MONTENEGRO

Como requisito parcial para optar título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
OSCAR TAIBA

Septiembre de 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAxIAL CIU Y CID EN LABORATORIO LEMCO PARA POSTERIOR ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE LA TEORÍA DEL ESTADO CRÍTICO

Memoria de Titulación presentada por
RODOLFO ALEJANDRO ROJAS MONTENEGRO

Como requisito parcial para optar título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
OSCAR TAIBA

Profesor Co-Referente
GONZALO SUAZO

Septiembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rodolfo Rojas y Lorena Montenegro, por su cariño y apoyo incondicional sobre todo en los momentos más difíciles.

Al profesor Gonzalo Suazo por su desinteresada y valiosa ayuda durante la ejecución de esta memoria.

Al profesor Carlos Wahr y a Rodrigo Yáñez por no perder la confianza en mí, por darme todas las facilidades que estaban a su alcance y motivarme a seguir adelante.

A René Martínez y Maximiliano Vásquez por su buena onda, disposición y amistad, contribuyendo enormemente a hacer más llevable este largo proceso.

A mi hermano de sangre, Pablo Rojas, y a mi hermano por elección, Felipe Cataldo, por estar siempre ahí cuando los necesitaba.

A Oscar Taiba por ser mi profesor guía.

RESUMEN

Ante la necesidad del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de poder ejecutar rutinariamente ensayos de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y en condición no drenada (CIU) y drenada (CID), se realizó su implementación en el equipo triaxial “Humboldt”, basándose en las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 que los rigen, y con las debidas modificaciones para ser ejecutados con el equipo e implementos disponibles. Se consideró la adición de un procedimiento para facilitar la saturación de probetas, tal como lo es la circulación previa de CO_2 a través de ellas, la definición de un criterio para evitar pre-estresarlas durante la etapa de aplicación de contrapresión, así como la utilización de un método para registrar de forma más confiable la relación de vacíos final obtenida de los distintos ensayos.

Una vez implementados los ensayos, se ejecutó una campaña de ensayos de laboratorio sobre una arena limosa de la quinta región, doce de compresión triaxial CIU y doce de compresión triaxial CID, repartidos entre cuatro estados de densidad y tres esfuerzos efectivos de consolidación. El análisis de resultados arrojó una única línea de estado crítico, formada conjuntamente a partir de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, en los planos $e - p'$ y $q - p'$, pudiéndose comprobar la incertidumbre que se genera al intentar determinar el estado crítico a partir de muestras densas en condición drenada (Mooney et al., 1998; Finno y Rechenmacher, 2003) y con comportamientos dilatantes que producen aumentos de volumen. Adicionalmente, utilizando esta línea, se calculó el parámetro de contractividad relativa (Verdugo e Ishihara, 1996), indicando que la arena limosa estudiada es de naturaleza poco contractiva y, por ende, con mayor resistencia a la iniciación de una falla por licuefacción, dado el bajo valor obtenido de 0,19.

Por otro lado, se observó un patrón de comportamiento no drenado reverso en las probetas inicialmente sueltas, con aumento de la estabilidad a medida que aumentaba la presión efectiva de confinamiento, para lo cual tuvo que definirse un nuevo criterio, basado en el aumento de tendencia dilatante a partir del punto de cambio de fase.

En otro ámbito de la resistencia cortante de los suelos, se definió satisfactoriamente envolventes lineales de falla en el plano $q - p'$, una por cada estado de densidad inicial, tipo de ensayo, y utilizando tres probetas a distintos esfuerzos efectivos de consolidación. Se comparó los parámetros geotécnicos efectivos entre ensayos y para iguales estados iniciales, obteniéndose una gran similitud en aquellos obtenidos a partir de estados inicialmente sueltos, donde las probetas fallaban razonablemente en estado crítico. Los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de estados inicialmente densos presentaron mayores diferencias entre ensayos, donde se evidenció que una respuesta drenada fuertemente dilatante tiende a aumentar los parámetros geotécnicos efectivos de una envolvente, con respecto a los que se obtendrían en ensayos no drenados bajo las mismas condiciones y esfuerzos iniciales.

Finalmente, se analizó la fricción movilizada de los ensayos drenados, pudiendo corroborarse experimentalmente el efecto que tiene la dilatancia positiva en aumentar el ángulo de fricción movilizado por sobre el crítico.

ABSTRACT

Given the need for Materials Testing Laboratory and Control Works to run routinely consolidated undrained (CIU) and drained (CID) triaxial compression tests, its implementation was performed in the triaxial equipment "Humboldt", based on ASTM D4767-11 and ASTM D7181-11 standards that govern, and with appropriate modifications to be executed with the equipment and tools available. It was considered the addition of a procedure to facilitate the saturation of the specimens, as is the CO₂ prior circulation through them, the definition of a criterion to avoid pre-stressing them during the backpressure application stage, and the use of a method for recording more reliably the final void ratio obtained from the different experiments.

Once implemented the tests, it was done a campaign of laboratory tests on a silty sand of the fifth region, twelve CIU triaxial compression tests and twelve CID triaxial compression tests, divided between four density states and three effective consolidation stresses. The analysis results showed a single critical state line, formed together from CIU and CID triaxial compression tests, in the $e - p'$ and $q - p'$ planes, being able to check the uncertainty generated when trying to determinate the critical state from dense samples in drained condition (Mooney et al., 1998; Finno and Rechenmacher, 2003) and with dilatant behaviours that produce volume increases. Additionally, using this line, the parameter of relative contractility (Verdugo and Ishihara, 1996) was calculated, indicating that the silty sand studied has a low contractive nature and, therefore, more resistant to the initiation of a failure by liquefaction, given the low value obtained of 0,19.

On the other hand, an undrained reverse behavior pattern in the initially loose specimens was observed, with increasing stability as the effective confining pressure was increased, for which a new approach had to be defined, based on increasing dilatant trend from the point of phase change.

In another area of the shear strength of soils, linear failure envelopes was successfully defined in the $q - p'$ plane, one for each initial density state, type of test, and using three samples to different effective consolidation stresses. Effective geotechnical parameters were compared between tests and for the same initial states, obtaining a great similarity in those obtained from initially loose states, where the specimens reasonably failed in critical state. Geotechnical parameters obtained from initially dense states showed higher differences between tests, where it was shown that a strongly dilatant drained response tends to increase the effective geotechnical parameters of an envelope, with respect to those obtained in undrained tests under the same conditions and initial stresses.

Finally, the mobilized friction of drained tests was analyzed, experimentally corroborating the effect of the positive dilatancy on increasing mobilized friction angle above the critical.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Objetivos del Estudio	1
1.3. Alcances del Estudio	2
1.4. Estructura de la Memoria	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	5
2.1. Introducción	5
2.2. Conceptos Previos	5
2.2.1. Introducción	5
2.2.2. Estado de Esfuerzos y Solución Gráfica de Mohr.....	5
2.2.3. Consolidación.....	8
2.3. Resistencia Cortante de un Suelo	17
2.3.1. Introducción	17
2.3.2. Criterio de Falla de Mohr – Coulomb	17
2.3.3. Dilatancia	23
2.3.4. Estado Crítico	25
2.3.5. Ensayo de Corte Directo	29
2.4. Ensayo Triaxial	33
2.4.1. Introducción	33
2.4.2. Ventajas de los Ensayos Triaxiales	33
2.4.3. Modalidades del Ensayo Triaxial.....	34
2.4.4. Tipos de Ensayos Triaxiales Convencionales	36
2.4.5. Terminología de Ensayos de Compresión Triaxial Convencionales.....	37
2.4.6. Componentes Generales de Equipo Para Ejecución de Ensayo de Compresión Triaxial Convencional.....	38
2.4.7. Ley Empírica de Presión Intersticial	43
2.4.8. Procedimientos Previos.....	46
2.4.9. Saturación.....	48
2.4.10. Consolidación.....	51

2.4.11.	Corte o Aplicación de Esfuerzo Desviatorio	52
2.4.12.	Diagrama p-q.....	56
2.4.13.	Teoría de la Elasticidad Aplicada a Ensayos Triaxiales.....	61
2.4.14.	Estado Crítico en Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID	68
2.4.15.	Comportamiento Durante Ensayos de Compresión Triaxial Convencionales	72
2.5.	Recopilación Bibliográfica de Investigaciones en Mezclas de Arena – Limo con Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID	80
2.5.1.	Comportamiento “Reverso” de Mezcla Arena – Limo	80
2.5.2.	Líneas de Estado Crítico	82
CAPÍTULO 3.	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	86
3.1.	Introducción	86
3.2.	Procedimientos Previos	86
3.2.1.	Confección de Probeta	86
3.2.2.	Montaje de Probeta.....	88
3.2.3.	Llenado de Cámara Triaxial	90
3.2.4.	Otros	92
3.3.	Saturación.....	98
3.3.1.	Circulación de CO ₂	98
3.3.2.	Percolación de Agua Desaireada	99
3.3.3.	Aplicación de Contrapresión	101
3.4.	Consolidación.....	108
3.4.1.	Procedimientos Previos	108
3.4.2.	Inicio Fase de Consolidación	113
3.5.	Corte o Aplicación de Esfuerzo Desviatorio	115
3.5.1.	Velocidad de Carga	115
3.5.2.	Procedimientos Previos	120
3.5.3.	Inicio Fase de Corte.....	124
3.5.4.	Cálculos.....	124
3.6.	Término del Ensayo	127
CAPÍTULO 4.	ETAPA EXPERIMENTAL.....	129
4.1.	Introducción	129
4.2.	Material de Ensayo.....	129

4.3.	Ensayos Practicados	129
4.4.	Ensayos Tradicionales.....	130
4.4.1.	Granulometría, Límites de Atterberg y Clasificación	130
4.4.2.	Relación Humedad – Densidad: Ensayo de Proctor Modificado	131
4.4.3.	Densidad Mínima	131
4.4.4.	Densidad de Partículas Sólidas.....	131
4.5.	Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID	131
4.5.1.	Condición de Ensayo de las Probetas.....	131
4.5.2.	Procedimiento Para Obtención de Humedad y Relación de Vacíos Finales	132
4.5.3.	Procedimiento “Inverso” Para Cálculo de Parámetros al Comienzo de la Etapa de Corte	133
4.5.4.	Consideraciones Adicionales	134
4.5.5.	Resultados Generales	134
4.6.	Consolidación Isotrópica.....	143
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS		144
5.1.	Introducción	144
5.2.	Estado Crítico.....	144
5.2.1.	Análisis a Partir de Ensayos de Compresión Triaxial CID	146
5.2.2.	Análisis a Partir de Ensayos de Compresión Triaxial CIU	149
5.2.3.	Parámetro Para Evaluar la Vulnerabilidad de Licuefacción del Suelo.....	151
5.3.	Comportamiento “Normal” y “Reverso” No Drenado.....	153
5.4.	Envoltentes Lineales de Falla.....	155
5.5.	Fricción Movilizada de Ensayos de Compresión Triaxial CID.....	159
5.5.1.	Conceptualización	159
5.5.2.	Análisis.....	161
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....		164
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA		167
ANEXO A. GRANULOMETRÍA – ARENA LIMOSA.....		170
ANEXO B. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO – ARENA LIMOSA		171
ANEXO C. ENSAYO DE DENSIDAD MÍNIMA – ARENA LIMOSA		173
ANEXO D. ENSAYO DE DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS – ARENA LIMOSA		174

ANEXO E.	ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL CIU – ARENA LIMOSA	176
ANEXO F.	ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL CID – ARENA LIMOSA	188
ANEXO G.	OPERACIONES CON ESTANQUE DE AGUA DESAIREADA	200
ANEXO H.	OPERACIONES CON BLADDERS	202
ANEXO I.	OPERACIONES CON APARATO DE MEDICIÓN DE CAMBIO VOLUMÉTRICO.....	203
ANEXO J.	EQUIPO E IMPLEMENTOS	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Volumen elemental de un medio continuo sujeto a un estado de esfuerzo plano (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).....	6
Figura 2-2: Condiciones de esfuerzo de una probeta de suelo sujeto a compresión triaxial (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).....	7
Figura 2-3: El círculo de Mohr en la forma usual en Mecánica de Suelos (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).....	8
Figura 2-4: Ejemplo de gráfica deformación – tiempo (escala logarítmica) obtenida en ensayo de consolidación (Das y Sobhan, 2014).....	10
Figura 2-5: Curva de compresibilidad para dos ciclos de carga y descarga (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).....	11
Figura 2-6: Consolidación unidimensional. Ciclo de carga y descarga. (a) Deformación – Esfuerzo y (b) Trayectoria de Tensiones.....	12
Figura 2-7: Método del logaritmo del tiempo para determinar t_{50} (Das y Sobhan, 2014).	15
Figura 2-8: Método de la raíz cuadrada del tiempo para determinar t_{90} (Das y Sobhan, 2014).	16
Figura 2-9: Criterio de falla de Mohr – Coulomb y círculo de Mohr para un estado tensional de falla (Das, 2001).....	18
Figura 2-10: Envolvente de falla de Mohr y criterio de falla de Mohr – Coulomb (Das, 2001).....	19
Figura 2-11: Estado tensional de falla usando: (a) Círculo de Mohr, (b) Elemento de suelo en falla (Villalobos, 2014).	22
Figura 2-12: Modelo conceptual de "dientes de serrucho" para explicar la dilatancia de suelos granulares (Ríos, 2015).	23
Figura 2-13: Dilatancia negativa en suelos granulares sueltos y positiva en suelos granulares densos (Modificado de Villalobos, 2014).	24
Figura 2-14: Resultados esquemáticos de ensayos de corte directo para la misma muestra granular inicialmente densa y suelta bajo el mismo esfuerzo normal. (a) $\tau - \gamma$, (b) $\varepsilon_{vol} - \gamma$ y (c) $e - \gamma$ (Villalobos, 2014).	26
Figura 2-15: Interpretación esquemática de resultados de ensayos de corte directo para muestras granulares con la misma relación de vacíos inicial, pero con diferente esfuerzo normal: (a) $\tau/\sigma' - \gamma$, (b) $\tau - \sigma'$ en estado crítico, (c) $e - \gamma$, (d) $e - \sigma'$ en estado crítico y (e) $v - \ln \sigma'$ en estado crítico (Villalobos, 2014).	27
Figura 2-16: Línea de estado crítico en el espacio (σ' , τ , v) (Villalobos, 2014).	29
Figura 2-17: Diagrama típico del arreglo para la ejecución de un ensayo de corte directo (Das, 2001).	30

Figura 2-18: Determinación de los parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte para una arena con los resultados de ensayos de corte directo consolidados y drenados (Das, 2001).	31
Figura 2-19: Diagrama con tipos de ensayos triaxiales dadas distintas condiciones de ensayo.	35
Figura 2-20: Cámara triaxial típica (Ríos, 2015).	40
Figura 2-21: Esquema de equipo triaxial convencional (Ríos, 2015).	43
Figura 2-22: Criterio de falla de Mohr – Coulomb para ensayos triaxiales de compresión y extensión en el plano: (a) $q - p'$ y (b) $t - s'$	58
Figura 2-23: Trayectoria de tensiones totales (TTT) en ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente.	60
Figura 2-24: Trayectoria de tensiones totales (TTT) y efectivas (TTE) en ensayos convencionales de compresión triaxial CIU y CID en el plano $q - p$. (a) Ensayo de compresión triaxial CID bajo contrapresión u_0 , (b) Ensayo de compresión triaxial CIU en suelo suelto o normalmente consolidado, (c) Ensayo de compresión triaxial CIU en suelo denso o preconsolidado y (d) Ensayo de compresión triaxial CIU bajo contrapresión u_0 en suelo denso o preconsolidado.	60
Figura 2-25: Constantes elásticas deducidas de la pendiente inicial de curvas de ensayos de compresión triaxial CID. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación desviadora ϵ_q , (b) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación desviadora ϵ_q , (c) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (d) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a	65
Figura 2-26: Constantes elásticas deducidas de la pendiente inicial de curvas de ensayos de compresión triaxial CIU. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación desviadora ϵ_q , (b) Presión de poros u – Deformación desviadora ϵ_q , (c) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a , (d) Presión de poros u – Deformación axial ϵ_a	67
Figura 2-27: Línea de estado crítico en: (a) Espacio (p' , q , e), (b) Plano $q - p'$, (c) Plano $e - p'$ y (d) Plano $e - \log p'$	68
Figura 2-28: Ensayos de compresión triaxial CID en arena de Toyoura con distintas relaciones de vacíos iniciales e_0 y bajo el mismo esfuerzo efectivo de consolidación $\sigma'_0=0,5$ [MPa]. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (b) Esfuerzo desviatorio q – Relación de vacíos e (Verdugo e Ishihara, 1996).....	70
Figura 2-29: Ensayos de compresión triaxial CIU en arena de Toyoura con la misma relación de vacíos $e=0,735$ al comienzo de la etapa de corte y bajo distintos esfuerzos efectivos de consolidación σ'_0 . (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (b) Esfuerzo desviatorio q – Esfuerzo efectivo medio p' (Trayectorias de tensiones efectivas) (Verdugo e Ishihara, 1996).....	71
Figura 2-30: Círculos de Mohr de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas de suelo cohesivo saturado y bajo distintas presiones de confinamiento (Bishop y Henkel, 1962).....	73
Figura 2-31: Trayectorias de tensiones totales (TTT) y efectivas (TTE) obtenidas de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas de suelo cohesivo saturado y bajo distintas presiones de confinamiento.	73

Figura 2-32: Círculos de Mohr en esfuerzos totales de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas y parcialmente saturadas de suelo cohesivo y bajo distintas presiones de confinamiento.	74
Figura 2-33: Comportamiento de probeta normalmente consolidada o suelta en ensayo de compresión triaxial CID. (a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .	75
Figura 2-34: Comportamiento de probeta ligeramente preconsolidada en ensayo de compresión triaxial CID. (a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .	76
Figura 2-35: Comportamiento de probeta fuertemente preconsolidada en ensayo de compresión triaxial CID. (a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .	77
Figura 2-36: Trayectoria de tensiones en ensayo de compresión triaxial CIU. Probeta: (a) Normalmente consolidada o suelta, (b) Ligeramente preconsolidada y (c) Fuertemente preconsolidada o densa.	79
Figura 2-37: Secuencia de comportamiento “normal” a partir tres diferentes ensayos de compresión triaxial CIU sobre la misma arena limpia depositada a la misma relación de vacíos inicial (Yamamuro y Lade, 1998).	81
Figura 2-38: Comportamiento “reverso” en arena de Nevada con 7 [%] de finos y a bajos esfuerzos efectivos de consolidación. (a) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) y (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a (Yamamuro y Lade, 1998).	82
Figura 2-39: Líneas de estado crítico para arenas con contenidos de finos entre 0 [%] y 10 [%] (Been y Jefferies, 1985).	83
Figura 2-40: Efecto idealizado del contenido de finos y del nivel de esfuerzos efectivos en las líneas de estado crítico en el plano $e - \ln p'$ (Bouckovalas et al., 2003).	83
Figura 2-41: Líneas de estado crítico para arenas con contenido de finos entre 0 [%] y 100 [%] (Thevayanagam et al., 2002).	84
Figura 3-1: Disposición del panel de distribución durante llenado de cámara triaxial.	91
Figura 3-2: Selección de ensayo en software “Humboldt”.	92
Figura 3-3: Pressure/Load Controllers.	93
Figura 3-4: Manómetro de laboratorio LEMCO.	93
Figura 3-5: Llave de paso de presión abierta.	94
Figura 3-6: System Air Pressure.	94
Figura 3-7: Retrieve Calibration.	94
Figura 3-8: Retrieve Device 1 (pressure controller) Calibration(s).	95
Figura 3-9: Retrieve Device 2 (Triaxial) Calibration(s).	95
Figura 3-10: Project Information.	96

Figura 3-11: Specimen Information.	96
Figura 3-12: Initial Specimen Parameters.	97
Figura 3-13: Specimen Dimensions Worksheet.	97
Figura 3-14: Initial Moisture Information Worksheet.	98
Figura 3-15: Saturation Stage Parameters.	103
Figura 3-16: Saturation Channels.	106
Figura 3-17: Logging Type - Saturation.	106
Figura 3-18: Stop Condition - Saturation.	107
Figura 3-19: Consolidation Stage Parameters.	109
Figura 3-20: Consolidation Channels.	110
Figura 3-21: Logging Type - Consolidation.	110
Figura 3-22: Elapsed Time Table Setup.	111
Figura 3-23: Stop Condition - Consolidation.	112
Figura 3-24: Disposición de válvulas en aparato de medición cambio volumétrico durante la consolidación.	112
Figura 3-25: Solicitud de condición de partida de consolidación.	113
Figura 3-26: Tabulation – Consolidation.	117
Figura 3-27: Obtención de parámetro t_{90} con gráfico "Square Root Time" del software "Humboldt".	118
Figura 3-28: Obtención de parámetro t_{50} con gráfico "Logarithmic Time" del software "Humboldt".	120
Figura 3-29: Shear Channels CID.	121
Figura 3-30: Shear Channels CIU.	121
Figura 3-31: Logging Type - Shear.	122
Figura 3-32: Start Condition – Shear.	122
Figura 3-33: Stop Condition - Shear.	123
Figura 3-34: Motor Parameters – Shear.	123
Figura 3-35: Final Specimen Parameters.	128
Figura 4-1: Curva granulométrica – Arena Limosa.	130
Figura 4-2: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400$ [g/cm ³]. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	135

Figura 4-3: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	136
Figura 4-4: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	137
Figura 4-5: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	138
Figura 4-6: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	139
Figura 4-7: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	140
Figura 4-8: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	141
Figura 4-9: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.	142
Figura 4-10: Curva de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible en: (a) Plano $e - p'$ y (b) Plano $e - \log p'$ – Arena Limosa.	143
Figura 5-1: Línea de estado crítico (CSL) en: (a) Plano $q - p'$, (b) Plano $e - p'$ y (c) Plano $e - \log p'$ – Arena Limosa.	145
Figura 5-2: Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100 \text{ [kPa]}$, (b) $\sigma'_0 = 200 \text{ [kPa]}$ y (c) $\sigma'_0 = 300 \text{ [kPa]}$ – Arena Limosa.	147
Figura 5-3: Relación de vacíos e – Deformación axial ϵ_1 en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100 \text{ [kPa]}$, (b) $\sigma'_0 = 200 \text{ [kPa]}$ y (c) $\sigma'_0 = 300 \text{ [kPa]}$ – Arena Limosa.	148
Figura 5-4: Trayectorias de ensayos de compresión triaxial CID inicialmente sueltos en el plano $e - p'$ – Arena Limosa.	148
Figura 5-5: Trayectoria de tensiones efectivas de ensayos de compresión triaxial CIU – Arena Limosa.	150
Figura 5-6: Trayectorias de ensayos de compresión triaxial CIU en el plano $e - p'$ – Arena Limosa.	151
Figura 5-7: Definición de la contractividad relativa, R_c (Verdugo e Ishihara, 1996).	152

Figura 5-8: Línea de estado crítico (CSL) y curvas de consolidación isotrópica para los estados más suelto y denso – Arena Limosa.	152
Figura 5-9: Comportamiento “reverso” no drenado – DR = 20 [%] – Arena Limosa.	154
Figura 5-10: Comportamiento “reverso” no drenado – DR = 48 [%] – Arena Limosa.	154
Figura 5-11: Comportamiento “normal” no drenado – DR = 71 [%] – Arena Limosa.	154
Figura 5-12: Comportamiento “normal” no drenado – DR = [%] – Arena Limosa.	155
Figura 5-13: Envolvente de falla - DR = 20 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.	156
Figura 5-14: Envolvente de falla - DR = 48 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.	156
Figura 5-15: Envolvente de falla - DR = 71 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.	157
Figura 5-16: Envolvente de falla - DR = 97 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.	157
Figura 5-17: Bloque sobre superficie inclinada y ángulo de fricción efectivo movilizado (Ríos, 2015)	160
Figura 5-18: Fuerza resultante actuando en diente de serrucho para el caso dilatante positivo.	160
Figura 5-19: Evolución del ángulo de fricción movilizado durante el corte en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100$ [kPa], (b) $\sigma'_0 = 200$ [kPa] y (c) $\sigma'_0 = 300$ [kPa] – Arena Limosa.	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Factores de tiempo para cada grado de consolidación en un drenaje unidireccional (Das, 2001).	14
Tabla 3-1: Tiempos de recolección utilizados regularmente por el laboratorio LEMCO durante la consolidación.....	111
Tabla 3-2: Velocidades referenciales de deformación para una SM y según el tipo de ensayo.....	117
Tabla 4-1: Listado de ensayos practicados y la norma empleada en su realización.....	130
Tabla 4-2: Densidades y humedades de confección para probetas remoldeadas – Arena Limosa..	132
Tabla 4-3: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	135
Tabla 4-4: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	136
Tabla 4-5: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	137
Tabla 4-6: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	138
Tabla 4-7: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	139
Tabla 4-8: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	140
Tabla 4-9: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	141
Tabla 4-10: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900$ [g/cm ³] – Arena Limosa.	142
Tabla 4-11: Resultados para confección de curva de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible – Arena Limosa.	143
Tabla 5-1: Contractividad relativa, R_c , y valores utilizados – Arena Limosa.	153
Tabla 5-2: Valores utilizados para análisis de comportamiento “normal” y reverso” – Arena Limosa.	153
Tabla 5-3: Parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte para distintas densidades iniciales y tipo de ensayo – Arena Limosa.	158
Tabla 5-4: $\phi'_{m\acute{a}x}$, $\psi_{m\acute{a}x}$ y p' en la falla para distintos estados de densidad inicial y esfuerzos efectivos de consolidación.....	162

Tabla 5-5: Diferencia entre $\phi'_{\text{máx}}$ y ϕ'_{cri} , y aproximaciones propuestas por Bolton (1986), para los estados inicialmente más densos y distintos esfuerzos efectivos de consolidación.	162
--	-----

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

El Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras de la Universidad Técnica Federico Santa María (LEMCO) cuenta con tres áreas o secciones que desempeñan funciones asociadas a la extensión, investigación y docencia. Una de ellas es el área de Mecánica de Suelos, la cual posee una gran demanda por parte del alumnado, docentes, y por proyectos de investigación, mientras que es la más requerida por particulares y con fines de consultoría. Muchas de las actividades que se le asocian, involucran un estudio minucioso del suelo en lo que respecta a su resistencia cortante, tópico fundamental en la mayoría de los estudios geotécnicos y proyectos de ingeniería civil, dada su directa relación con diversos problemas de estabilidad. Es por tanto deseable y necesario la ejecución de ensayos que permitan estudiar la resistencia cortante y deformabilidad de los suelos, siendo el más completo, confiable, útil y destacable, el ensayo triaxial.

Dentro de las numerosas modalidades que puede tener el ensayo triaxial, las más comunes y requeridas son los de compresión convencionales, esto es, con esfuerzo radial o lateral constante y aumento progresivo y monótonico del esfuerzo axial. En este sentido, son tres los ensayos comúnmente ejecutados: ensayo de compresión triaxial no consolidado y no drenado (UU), ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y no drenado (CIU), y ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y drenado (CID). El ensayo de compresión triaxial UU es un ensayo rápido y simple, que sólo considera la etapa de corte y donde las únicas variables medidas son la carga axial, presión de cámara (constante) y deformación axial. Este ensayo viene siendo ejecutado por el laboratorio LEMCO desde hace más de una década, primero en un equipo triaxial simple y manual, para posteriormente desarrollarlo en el equipo triaxial “Humboldt”, el cual posee mayor automaticidad en la ejecución y recolección de datos. Este equipo cuenta con todos los componentes y herramientas necesarias para realizar también los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, pero desde su adquisición había sido infructuosa su realización e implementación, dada la mayor complejidad desde el punto de vista teórico, mecánico y experimental, adicionándose variables de medición como el cambio volumétrico, la presión de poros y la contrapresión.

Este trabajo de titulación consiste principalmente en la implementación de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID en el equipo triaxial “Humboldt” del laboratorio LEMCO, preparando y detectando falencias en el equipo, y posteriormente entregando un manual de procedimientos y capacitando al personal para su posterior ejecución de forma autónoma e independiente.

1.2. Objetivos del Estudio

- Realizar una revisión bibliográfica con respecto a la resistencia cortante de los suelos, ensayo triaxial, estado crítico y tópicos asociados, centrándose en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, y dando una revisión de investigaciones de laboratorio realizadas en mezclas de arena – limo utilizando estos ensayos.

- Llevar a cabo la puesta en marcha del equipo triaxial “Humboldt” en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, implementando específicamente los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, y entregando un detallado manual de procedimientos para su ejecución.
- Realizar ensayos de compresión triaxial CIU y CID sobre una arena limosa para la implementación en cuestión, para posteriormente realizar un análisis de resultados utilizando la teoría del estado crítico. También, se considera eje de esta memoria, la definición de envolventes lineales de falla, y la comparación de sus parámetros geotécnicos entre ensayos y para iguales estados y esfuerzos iniciales.
- Análisis de la fricción movilizada de ensayos drenados y su relación con el fenómeno de dilatancia.

1.3. Alcances del Estudio

Este estudio da cuenta de la implementación de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID en el equipo triaxial “Humboldt” del laboratorio LEMCO. Estos ensayos y el estudio aquí presentado, se limitan a un modo de carga monotónico, el cual es utilizado para modelar cargas “in situ” del tipo estáticas. Las probetas utilizadas son remoldeadas, aunque los procedimientos aquí expuestos son básicamente idénticos con probetas inalteradas, salvo en lo que respecta a su confección.

Los resultados y análisis expuestos en esta memoria, son en estricto rigor válidos para el material ensayado, que es un material granular, con una importante cantidad de finos limosos, y con tamaño máximo absoluto que pasa por el tamiz N°4 (4,75 [mm]), lo cual viene dado por las dimensiones de las probetas que permiten confeccionar y ensayar el equipo y cámara triaxial “Humboldt”. Por lo tanto, considerar válidos los análisis y resultados para la arena limosa de esta memoria, con sus características granulométricas, de plasticidad y mineralógicas propias, para los estados iniciales de densidad, humedad y rango de esfuerzos efectivos de consolidación utilizados y, no menos importante, para el procedimiento de confección de probetas remoldeadas wet – tamping (moist – tamping o wet – deposition). Su extensión hacia otros materiales, incluso hacia otras arenas limosas, sólo debería tomarse referencialmente.

1.4. Estructura de la Memoria

En esta sección se describen brevemente los capítulos que constituyen este estudio.

- *Capítulo 1:* Corresponde a la introducción, antecedentes generales y alcance del estudio.
- *Capítulo 2:* Corresponde al estado del conocimiento o recopilación bibliográfica en que se trata ampliamente el concepto de resistencia cortante de los suelos, ensayos de compresión triaxial CIU y CID, y estado crítico. Primero se tratan conceptos asociados, como lo son el estado plano de esfuerzos y solución gráfica de Mohr, tópicos directamente relacionados con el ensayo triaxial y el análisis de sus resultados. En este mismo sentido, se trata de modo general la consolidación, describiendo su mecanismo de funcionamiento y revisando su utilidad en el ámbito de la

resistencia cortante de los suelos y, especialmente, en el ensayo triaxial, así como posibilitando una introducción hacia un comportamiento eminentemente elastoplástico y conceptos asociados a modelos de este tipo. Luego, se ingresa de lleno al ámbito de la resistencia cortante de los suelos; se parte con el criterio de falla comúnmente utilizado, esto es, el criterio de falla de Mohr – Coulomb, para posteriormente tocar un amplio abanico de conceptos asociados, como lo son: ley de esfuerzos efectivos, dilatancia, estado crítico y el ensayo de corte directo. Fuera de este último ítem, y de forma independiente, se trata ampliamente el ensayo triaxial, redirigiendo poco a poco la temática hacia los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, sus etapas, diagrama $p - q$, su asociación con la teoría de la elasticidad y el estado crítico, para finalmente dar una descripción cualitativa y muy general del comportamiento esperado durante estos ensayos y utilizando conceptos asociados a un modelo elastoplástico. El último ítem de este capítulo entrega una breve descripción de investigaciones en laboratorio utilizando los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, y sobre mezclas de arena – limo, material utilizado experimentalmente en esta memoria.

- *Capítulo 3:* Presenta un detallado manual de procedimientos para la ejecución de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID en el equipo triaxial “Humboldt” que posee el área de Mecánica de Suelos del laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María. Este manual se basa en las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11, con las debidas modificaciones y adaptaciones para ser ejecutados en el equipo en cuestión.
- *Capítulo 4:* Se describe la etapa experimental llevada a cabo en esta memoria, consistente especialmente en doce ensayos de compresión triaxial CIU y doce ensayos de compresión triaxial CID sobre una arena limosa. Se presentan los resultados más generales de estos ensayos, así como otros ejecutados sobre este material con fines clasificativos.
- *Capítulo 5:* Corresponde el análisis de resultados de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID. Primero se realiza un análisis utilizando la teoría del estado crítico. Luego, se analiza un comportamiento “reverso” no drenado observado en las muestras inicialmente sueltas. Posteriormente, se definen envolvente lineales de falla para cuatro estados iniciales distintos y para cada tipo de ensayo, realizando una comparación entre sus parámetros geotécnicos. Finalmente, se analiza la fricción movilizada en los ensayos de compresión triaxial CID, conceptualizando y verificando su relación con el fenómeno de dilatancia.
- *Capítulo 6:* Conclusiones, recomendaciones finales del estudio y tareas pendientes por realizar.
- *Capítulo 7:* Referencias y bibliografía.
- *Anexo A:* Ficha de granulometría sobre el material en estudio.
- *Anexo B:* Ficha de ensayo de proctor modificado sobre el material en estudio.
- *Anexo C:* Ficha de ensayo de densidad mínimo sobre el material en estudio.
- *Anexo D:* Fichas de ensayos de densidad de partículas sólidas sobre el material en estudio.
- *Anexo E:* Fichas de ensayos de compresión triaxial CIU sobre el material en estudio.
- *Anexo F:* Fichas de ensayos de compresión triaxial CID sobre el material en estudio.
- *Anexo G:* Distintas operaciones con el tanque de agua desaireada del equipo triaxial “Humboldt”.

- *Anexo H:* Operaciones con los bladders utilizados para aplicar presión de cámara y contrapresión.
- *Anexo I:* Operaciones previas a los ensayos con el aparato de medición de cambio volumétrico.
- *Anexo J:* Breve descripción de equipo e implementos utilizados en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Introducción

Este capítulo abarca un amplio espectro de temas relacionados con la resistencia cortante de un suelo y especialmente con el ensayo triaxial. Se resume el concepto de resistencia cortante de un suelo y se tratan otros que permiten entender de mejor forma su comportamiento cuando es sometido a esfuerzos y deformaciones sobre todo del tipo cortantes. Gran parte de estos conceptos sustentan el análisis de los resultados que se obtienen en ensayos para determinar la resistencia cortante, haciendo más hincapié obviamente en los asociados directamente al ensayo triaxial. Se presenta el ensayo de corte directo, con la idea de poder contrastarlo con el ensayo triaxial, que es el único que se aborda en profundidad con respecto a sus modalidades, etapas y resultados. Finalmente, se realiza una breve recopilación bibliográfica de investigaciones en laboratorio utilizando los ensayos de compresión triaxial CIU y CID sobre mezclas de arena – limo, material que es utilizado experimentalmente en esta memoria con la finalidad de la implementación de estos ensayos en el laboratorio LEMCO.

Toda la información presente en este capítulo proviene de la literatura tradicional de la Mecánica de Suelos, de otros trabajos de titulación, de documentos de otras universidades e ingenieros destacados, y de artículos científicos obtenidos por la web.

2.2. Conceptos Previos

2.2.1. Introducción

A continuación, se presentan brevemente los conceptos de estado de esfuerzos y solución gráfica de Mohr, los cuales están íntimamente relacionados con el análisis del ensayo triaxial y sus resultados. Adicionalmente, se trata del mismo modo la consolidación, fundamental en el ámbito de la resistencia cortante de los suelos y como etapa significativa de algunos ensayos para determinar la resistencia cortante, como lo son algunos ensayos de compresión triaxial y corte directo. También se utiliza la consolidación para presentar un primer acercamiento hacia un comportamiento eminentemente elastoplástico de los suelos, así como hacia las ideas que sustentan un modelo de este tipo. Cabe destacar, la consolidación como etapa de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID es tratada con posterioridad en el ítem 2.4.10.

2.2.2. Estado de Esfuerzos y Solución Gráfica de Mohr

En los análisis de Mecánica de Suelos, el estado plano de esfuerzos es uno de los más utilizados, no sólo por su simplicidad, sino también por la buena respuesta que otorga en la modelación de distintos problemas. Se dice que un medio está sometido a un estado de esfuerzos plano continuo cuando puede determinarse un plano al que resulten paralelos los segmentos dirigidos representativos en todos los puntos de dicho medio. Es decir, los esfuerzos normales y tangenciales

paralelos a la normal a ese plano determinado son nulos en todos los puntos del medio ($\sigma_x = \tau_{yx} = \tau_{zx} = 0$). Además, los esfuerzos no nulos son independientes de la coordenada X .

Si se elige como plano coordenado $Z - Y$ aquel al que resultan paralelos los segmentos dirigidos representativos de los esfuerzos, un volumen elemental del medio continuo quedaría como el representado en la figura 2-1.

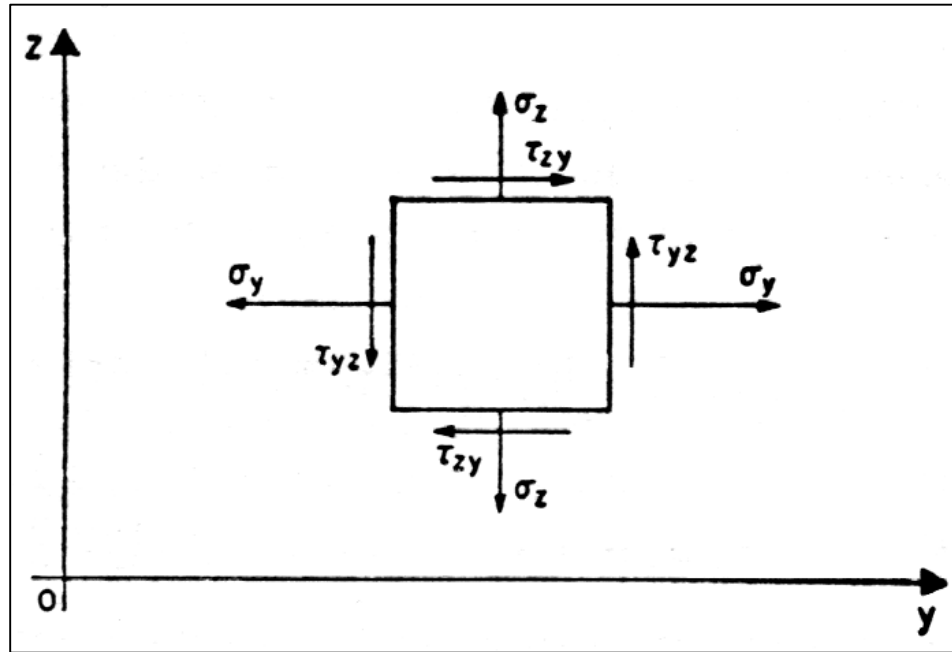


Figura 2-1: Volumen elemental de un medio continuo sujeto a un estado de esfuerzo plano (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).

Según la Teoría de la Elasticidad, el estado de esfuerzos plano en un punto está definido cuando se conocen los esfuerzos en ese punto, asociados a dos planos cualesquiera paralelos al eje X y mutuamente perpendiculares. Dentro de esta misma teoría se demuestra que existen planos ortogonales entre sí, llamados principales de esfuerzo, en los que los esfuerzos tangenciales son nulos, existiendo únicamente esfuerzos normales, denominados principales. Se demuestra también que en un estado de esfuerzos plano hay dos planos principales, con su correspondiente esfuerzo principal ligado, uno de éstos es el mayor de todos los esfuerzos actuantes en el punto considerado, mientras el otro es el menor.

En Mecánica de Suelos se suele establecer la convención de que los esfuerzos normales de compresión son los positivos. Esto se ve respaldado y justificado por el tipo de cargas a las que regularmente se ve sometido el suelo en terreno, así como por la secuencia de carga de los ensayos más tradicionales. Dicho esto, en la figura 2-2 se muestra una probeta de suelo sujeta a un esfuerzo vertical σ_1 , que se supone el principal mayor, y a un esfuerzo lateral σ_3 , considerado como el principal menor. En esta figura, el ángulo θ es el que forma un plano cualquiera BB' , con el plano horizontal AA' , en el cual actúa el esfuerzo principal mayor.

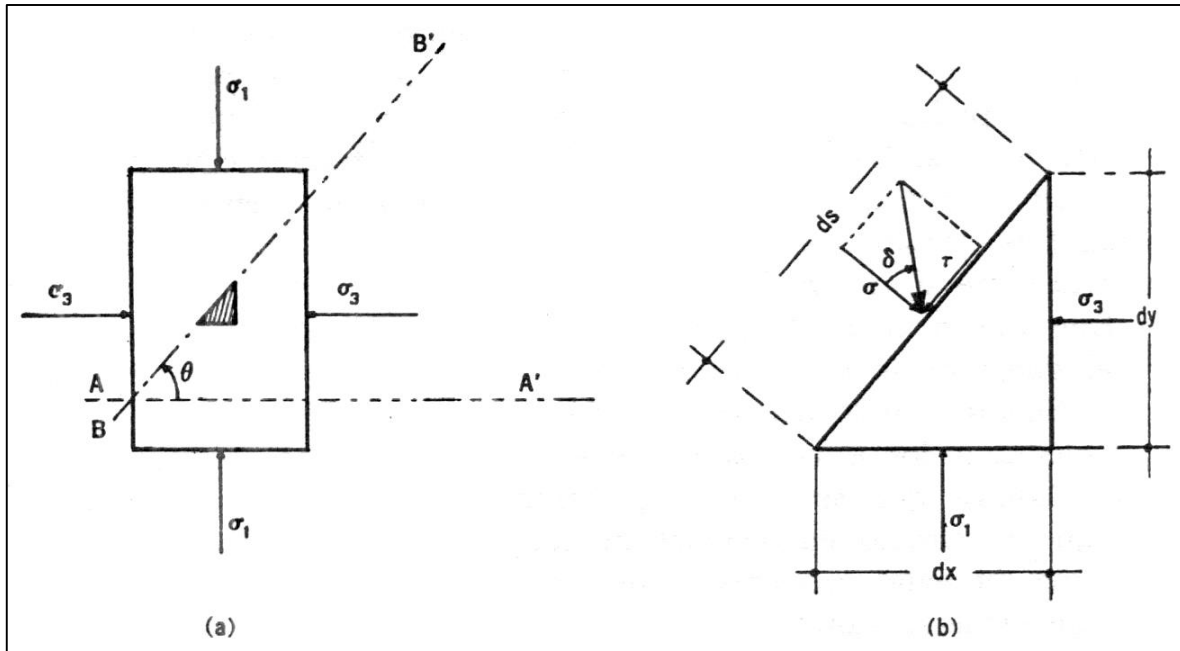


Figura 2-2: Condiciones de esfuerzo de una probeta de suelo sujeto a compresión triaxial (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).

Un análisis del equilibrio del prisma triangular de la figura 2-2(b) conduce a las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\theta \quad (2-1)$$

$$\tau = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \sin 2\theta \quad (2-2)$$

Ahora, si se acomodan las ecuaciones anteriores, luego se elevan al cuadrado y posteriormente se suman, se llega a:

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{4} \quad (2-3)$$

La expresión (2-3) en el plano coordenado $\tau - \sigma$ es un círculo de centro $((\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0)$ y radio $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Este es el famoso círculo de Mohr, el cual corresponde ser el lugar geométrico de los puntos que representan los esfuerzos actuantes en el plano BB' para distintas inclinaciones del mismo. Cabe destacar, si se desea encontrar en este círculo el par esfuerzo normal – esfuerzo cortante actuante en el plano BB' de inclinación θ , se debe recorrer con respecto al eje σ el doble del ángulo en cuestión y en sentido contrario al ángulo δ que mide la desviación entre el esfuerzo normal y resultante en el elemento triangular (figura 2-2(b)). El círculo de Mohr construido teniendo en cuenta esta información resulta como el que aparece en la figura 2-3.

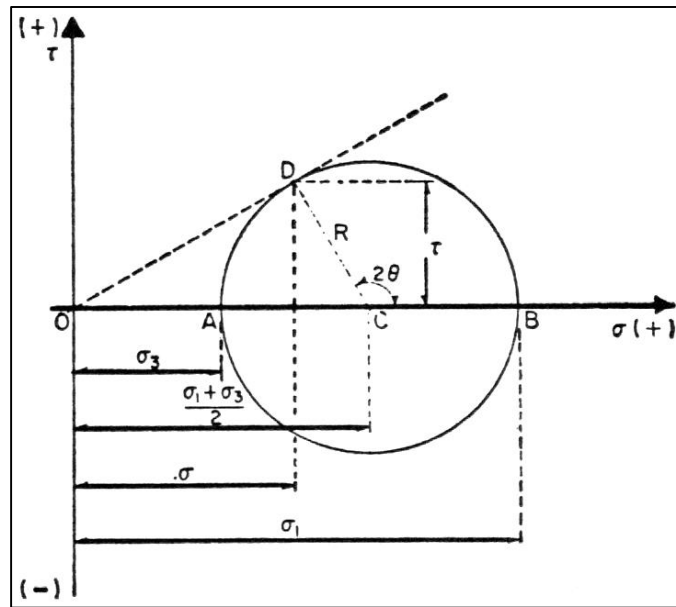


Figura 2-3: El círculo de Mohr en la forma usual en Mecánica de Suelos (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).

Por otro lado, en un estado tridimensional de esfuerzos, los esfuerzos asociados a las distintas direcciones en un punto dado pueden obtenerse por una extensión de la teoría presentada en los párrafos anteriores. La Teoría de la Elasticidad demuestra que, en el caso más general, existen tres planos normales entre sí en los que no existe esfuerzo cortante, sino esfuerzo normal solamente; estos planos son principales. En esos estados tridimensionales, si se elige como plano coordenado aquel al que resultan paralelos los segmentos dirigidos representativos de dos de los esfuerzos principales, los esfuerzos asociados a planos normales a ese coordenado podrán determinarse aplicando las ecuaciones (2-1) y (2-2), que también son susceptibles de la interpretación gráfica de Mohr. En un estado tridimensional de esfuerzos se tienen así, por lo general, tres círculos de Mohr asociados a un punto, los cuales resultan tangentes entre sí, de modo que uno de los círculos envuelve a los otros dos. Este queda definido por los esfuerzos principales mayor y menor y es el que, por lo general, interesa analizar específicamente en Mecánica de Suelos, debido a que la Teoría de Falla más usada en este campo involucra a los esfuerzos normales asociados a los esfuerzos tangenciales máximos que se pueden presentar en el punto considerado.

2.2.3. Consolidación

La consolidación debe entenderse como un proceso de deformación de una masa de suelo que implica un cambio volumétrico. En terreno este cambio volumétrico puede producirse por el peso propio de los estratos de suelo o por un incremento de esfuerzos provocados por la construcción de cimentaciones u otras cargas que lo comprimen.

En una primera clasificación, se puede distinguir dos modos de consolidación: una isotrópica y otra anisotrópica. “In situ” frecuentemente ocurre que durante el proceso de consolidación la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal permanece esencialmente la misma; así, el movimiento de las partículas de suelo puede ocurrir sólo en dirección vertical; esta es la consolidación unidireccional o unidimensional, la cual está sustentada en un estado de esfuerzo

anisotrópico. Este tipo de consolidación es el que se modela en ensayos de consolidación unidimensional y en ensayos de corte directo que contemplen esta etapa.

Por otro lado, la modalidad isotrópica es difícilmente posible en terreno dadas las condiciones tensionales que ahí se dan comúnmente. Sin embargo, en la práctica de ensayos triaxiales se suele seguir esta clase de consolidación porque es más simple y rápida, y los equipos triaxiales no siempre cuentan con software y dispositivos que permitan realizar una anisotrópica. Como puede intuirse, en el tipo isotrópica las partículas de suelo tienen libertad de movimiento para los fines de cambio volumétrico.

Una segunda clasificación divide los cambios volumétricos asociados a la consolidación en tres categorías dependiendo de las causas inherentes a estos. Estos procesos ocurren seguidamente uno del anterior para un mismo incremento de carga. Así, se distinguen tres fases de consolidación: compresión inicial, consolidación primaria y consolidación secundaria.

La compresión inicial es una deformación volumétrica inmediata provocada por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de agua. Los cálculos de este tipo de deformación se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la Teoría de la Elasticidad.

La consolidación primaria es el cambio volumétrico debido a la expulsión de agua que ocupa los espacios vacíos y con el objeto de disipar todo el exceso de presión de poros originado por el peso propio de los estratos y/o incrementos adicionales de esfuerzos.

Finalmente, la consolidación secundaria es un cambio volumétrico que se sustenta en un fenómeno de flujo viscoso, donde ocurren deformaciones plásticas de las partículas aisladas y un ajuste plástico de la estructura del suelo.

Comúnmente, la consolidación primaria es la de mayor importancia, ya que origina los cambios volumétricos más importantes y que toman mayor tiempo en finalizarse. Ocurre, como ya ha sido mencionado, que un incremento de esfuerzo en una masa de suelo genera un exceso de presión de poros. Si la masa de suelo se encuentra saturada, y más aún si además están impedidas las deformaciones en direcciones distintas al incremento en cuestión, todo el incremento de esfuerzo será tomado por el agua de poros; esto se sustenta en el hecho de que el agua se considera incompresible en comparación con el esqueleto del suelo y en que no existe aire en los espacios intersticiales que pueda ser comprimido a causa del esfuerzo aplicado. Entonces, ese exceso de presión de agua de poros debe ser disipado, y no es de otro modo sino que a través del drenaje. Por ende, el tiempo que demore en terminarse el proceso de consolidación primaria será altamente dependiente de la permeabilidad de la masa de suelo analizada. Producto de esto, generalmente los ensayos de consolidación son realizados en suelos finos, saturados, y con cierto grado de plasticidad. Se pueden ensayar suelos granulares, pero estos son extremadamente permeables, permitiendo un rápido drenaje, lo que conlleva a que las tres etapas de consolidación se efectúen prácticamente de manera simultánea.

Como se verá en el ítem 2.3.2.1, según el principio de esfuerzos efectivos planteado por Terzaghi, en suelos saturados existe una simple relación aritmética en que el incremento total de esfuerzo normal aplicado se divide entre una componente efectiva (parte del incremento soportado directamente por el esqueleto del suelo) y una componente asociada al exceso de presión de poros.

De este modo, es importante destacar que al final de la consolidación primaria, y una vez disipado todo el exceso de presión de poros, el incremento de esfuerzo normal aplicado es soportado íntegramente por el esqueleto del suelo. Esto explica una de las utilidades del ensayo de consolidación como etapa en ensayos para determinar la resistencia cortante, ya que su ejecución permite representar estados tensionales a los que inicialmente estuvo sometido la masa de suelo en terreno.

Otro punto importante, sobre todo en suelos finos o cohesivos y especialmente en las arcillas, es que por su baja permeabilidad guardan un historial de consolidación, el cual es la directriz de su comportamiento. Así, resulta interesante definir los siguientes conceptos asociados a este historial en suelos cohesivos:

- *Suelo normalmente consolidado*: El esfuerzo efectivo de consolidación presente es el máximo al que ha estado sometido durante su historia geológica.
- *Suelo preconsolidado*: El esfuerzo efectivo de consolidación presente es menor que el experimentado en el pasado.
- *Esfuerzo de preconsolidación (σ'_c)*: Es el máximo esfuerzo efectivo de consolidación que ha soportado el suelo durante su historia geológica.
- *Razón de preconsolidación (OCR)*: Se define como la relación entre el esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo efectivo de consolidación presente (σ'_c/σ').

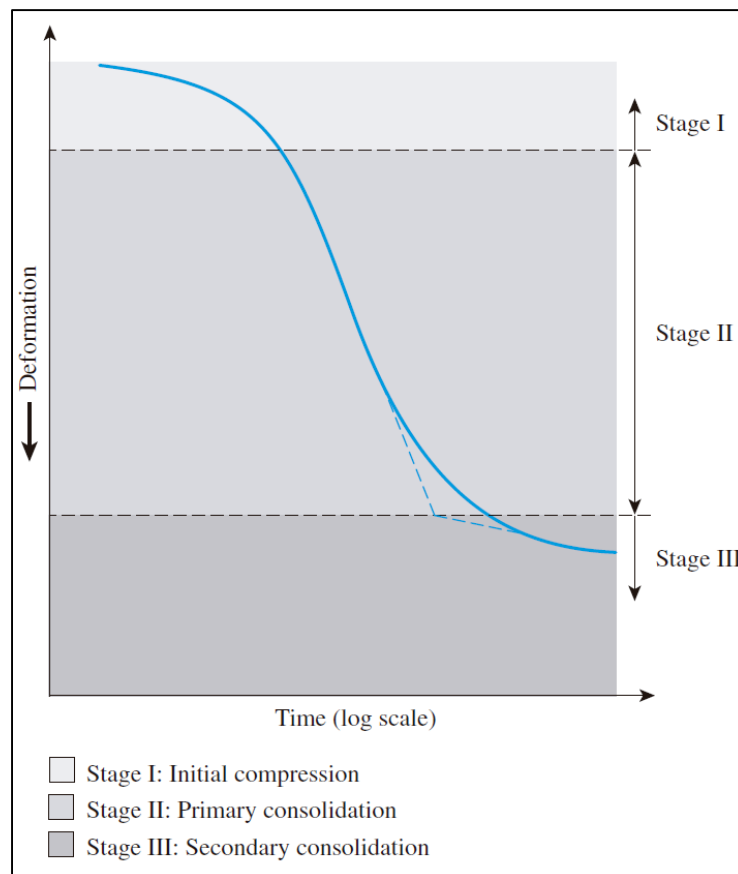


Figura 2-4: Ejemplo de gráfica deformación – tiempo (escala logarítmica) obtenida en ensayo de consolidación (Das y Sobhan, 2014).

Explicado a grandes rasgos el fundamento teórico tras la consolidación de suelos, es posible exponer los resultados típicos y análisis realizados en ensayos de este tipo, ya sea isotrópicos como anisotrópicos. Para un incremento de esfuerzo dado, y en suelos no demasiado permeables, se puede obtener correctamente una curva tipo que relaciona la deformación vertical o volumétrica con el tiempo en escala logarítmica (figura 2-4) y otra curva que asocia esta misma deformación con la raíz cuadrada del tiempo.

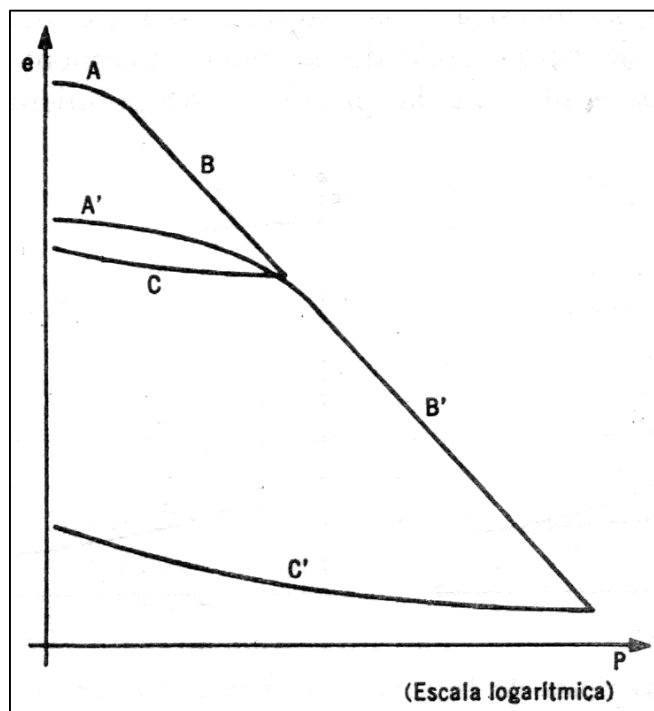


Figura 2-5: Curva de compresibilidad para dos ciclos de carga y descarga (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010).

Ahora, si se realiza el ensayo para varios incrementos de esfuerzos sucesivos, y posteriormente decrementos, cada uno mantenido hasta finalizar el proceso completo de consolidación y hacerlo efectivo sobre la probeta, se puede obtener una gráfica típica que vincula la relación final de vacíos (índice final de poros o de vacíos) y el esfuerzo efectivo en escala logarítmica (isotrópico en ensayos triaxiales convencionales y vertical normal en ensayo de consolidación unidimensional), denominada usualmente como curva de compresibilidad (figura 2-5). El tramo *A* de la curva de compresibilidad suele llamarse “tramo de recompresión”, aproximadamente con una pendiente lineal C_s (índice de expansión o recompresión), el tramo *B*, “tramo virgen” o de “compresión normal”, con una pendiente lineal C_c (índice de compresión) y el *C*, “tramo de descarga”, también con una pendiente C_s (índice de expansión). En esta curva puede apreciarse el comportamiento típico de un suelo, el cual dista mucho de ser elástico, ya que por más que se retorne al mismo esfuerzo efectivo inicial, el suelo no regresa a su volumen o relación de vacíos inicial, es decir queda una deformación remanente.

Cabe destacar, la curva de compresibilidad también suele ser graficada en función del volumen específico v , lo cual es totalmente compatible ya que está íntimamente ligado a la relación de vacíos e mediante la expresión $v = 1 + e$. En este caso, regularmente la escala logarítmica utilizada para el esfuerzo efectivo es del tipo natural.

2.2.3.1. Comportamiento de Suelos Cohesivos

En la figura 2-6 se ilustra el comportamiento idealizado y linealizado de un suelo arcilloso preconsolidado en un ensayo de consolidación unidimensional. El estado actual del suelo es representado por el punto *A*, mientras que el de preconsolidación por el punto *C*. Para esfuerzos o presiones inferiores a la de preconsolidación el comportamiento es elástico, y las deformaciones en ciclos cerrados de carga y descarga, como el *ABA*, se recuperan, salvo unos fenómenos de histéresis de menor cuantía.

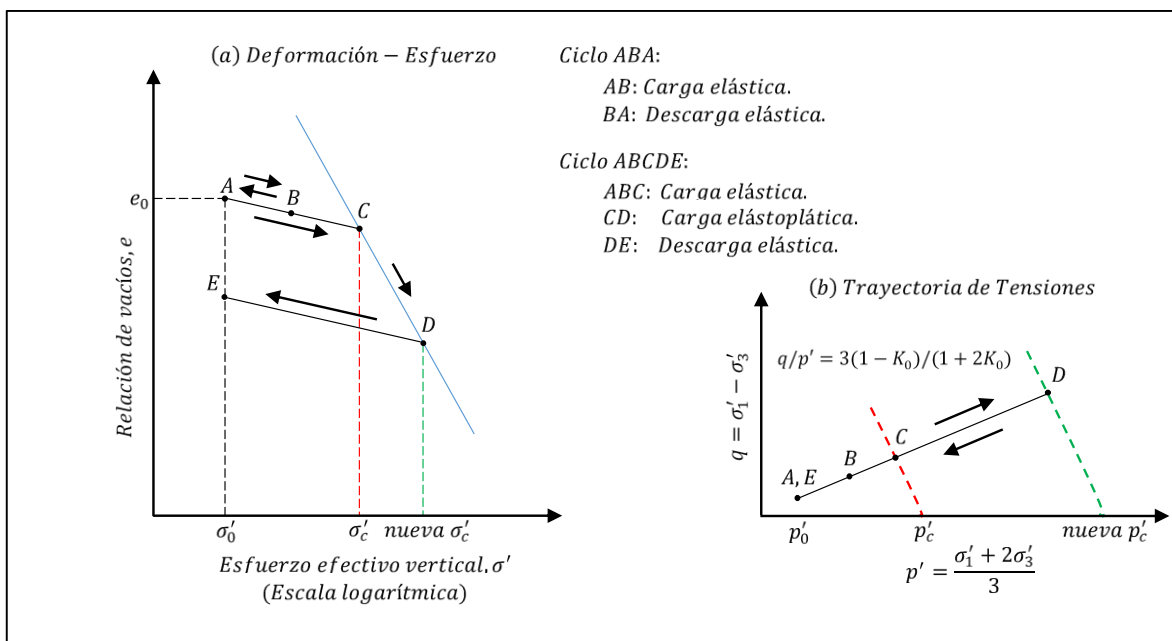


Figura 2-6: Consolidación unidimensional. Ciclo de carga y descarga. (a) Deformación – Esfuerzo y (b) Trayectoria de Tensiones.

En cambio, si se sobrepasa el esfuerzo de preconsolidación aparecen deformaciones irreversibles importantes, con componente volumétrica de compresión. Así, en el ciclo *ABCDE*, en el tramo *AC* el comportamiento es elástico (deformaciones totalmente recuperables), pero en el tramo *CD* la deformación, definida por el índice de compresión C_c , tiene una parte elástica (definida por el índice de expansión o recompresión C_s) que se recupera al descargar (tramo *DE*) y otra irreversible (diferencia de ordenadas entre *A* y *E*). Este es un comportamiento típico elastoplástico, en el que el esfuerzo de preconsolidación define el límite de plastificación del material. Este límite no es fijo, sino que si se sobrepasa, el esfuerzo máximo alcanzado (punto *D*) pasa a ser el nuevo límite de plastificación, es decir, se trata de un comportamiento con rigidización por deformación.

En la figura 2-6(b) se representa la trayectoria de tensiones en el sistema coordenado $q - p'$. Por ahora basta con saber que en este plano coordenado cada punto representa un estado tensional, y que por ende el segmento lineal dirigido *ABCDE* es la trayectoria de tensiones durante el ciclo completo de carga y descarga. La inclinación de esta trayectoria es $3(1 - K_0)/(1 + 2K_0)$, siendo K_0 el coeficiente de empuje en reposo.

Evidentemente, si se siguieran trayectorias levemente diferentes a la AC y con distinta inclinación, se observaría un comportamiento parecido al aquí enunciado. Así pues la consolidación hasta un punto como el C crea una superficie frontera para el comportamiento elástico que en el sistema coordenado $q - p'$ se traduce en una curva como la representada a trazos en la figura 2-6(b). Para los puntos de esta superficie, el suelo está en el umbral de plastificación, lo que es lo mismo que decir que se comporta como normalmente consolidado.

Superada esta frontera, el material presenta rigidización por deformación, es decir que la superficie de plastificación se mueve hacia el exterior, aumentando la región de comportamiento elástico. Esta rigidización obedece al aumento de compacidad de la muestra debido a la contracción volumétrica plástica (deformación volumétrica plástica) experimentada a lo largo del tramo CD .

De esta forma, aunque en sentido estricto la preconsolidación en la consolidación unidimensional se define en términos del esfuerzo efectivo vertical normal, cabe generalizar el concepto a estados tensionales cualquiera, de acuerdo con las pautas de la figura 2-6. Así, si un suelo es cargado hasta un punto tal como el C de la figura 2-6(b), y nunca más allá, se dice que está en el umbral de plastificación y que se comporta como normalmente consolidado, no sólo si su estado tensional está en el punto C , sino en cualquier punto de la superficie frontera creada, que pasa por C y es representada a trazos en la figura 2-6(b).

Por otro lado, y sólo como dato adicional, si se quiere definir correctamente un modelo elastoplástico para el suelo, específicamente el mecanismo de las deformaciones plásticas, es necesario precisar la existencia en el plano $q - p'$ de unas curvas denominadas potenciales plásticos. Estas curvas sustentan su existencia en la premisa de que las deformaciones plásticas dependen del estado de tensional en que ocurre la fluencia y no de la ruta seguida para alcanzar dicho estado tensional. En este sentido, la principal característica de una curva de potencial plástico es el hecho de que en todos sus puntos los distintos vectores incrementales de deformación plástica total son perpendiculares a ella. Así, lo que finalmente se tiene es una familia de potenciales plásticos cubriendo toda la amplia gama de estados tensionales posibles.

Experimentalmente se ha constatado que las proporciones de las superficies de plastificación o fluencia para arcillas son independientes de su tamaño y que regularmente es posible modelarlas matemática y simplificada como una elipse (Fischer, 2005). Esto se sustenta principalmente en el hecho de que las arcillas tienden a seguir una ley de normalidad o flujo asociado, es decir, que las superficies de plastificación y potenciales plásticos coinciden. Para arenas, la proposición de normalidad es mucho menos aceptable, y los modelos elastoplásticos que han sido más satisfactorios para confrontar su respuesta esfuerzo – deformación, han incorporado formas separadas para las superficies de plastificación y potenciales plásticos.

2.2.3.2. Comportamiento de Suelos Granulares

En suelos granulares, producto de su elevada permeabilidad, la acción de esfuerzos dinámicos (vibraciones o golpes) producen una compactación del material, disminuyendo su relación de vacíos. De este modo, es posible pasar del punto A al E de la figura 2-6(a), directamente y sin variación del esfuerzo normal vertical efectivo.

El efecto de la compactación desde *A* hasta *E* es el mismo que habría producido un ciclo de carga y descarga *ABCDE*, por lo cual puede hablarse de una preconsolidación equivalente, siendo el comportamiento equivalente al descrito para suelos cohesivos en el ítem 2.2.3.1.

Generalmente, los suelos granulares son menos deformables que los cohesivos, por lo que la curva de la figura 2-6(a) debería ser mucho más tendida. Ello hace que los esfuerzos de preconsolidación equivalentes sean muy elevados en suelos granulares fuertemente densificados.

2.2.3.3. Análisis de la Curva Deformación – Tiempo

Como se dijo anteriormente, para cada incremento de carga o esfuerzo se pueden obtener curvas que relacionan la deformación con el tiempo. Su análisis, en estricto rigor, está restringido a suelos completamente saturados y permite la obtención de parámetros útiles a ser utilizados en el cálculo de velocidades de deformación en ensayos para determinar la resistencia cortante y para determinar la velocidad de consolidación (coeficiente de consolidación c_v).

Tabla 2-1: Factores de tiempo para cada grado de consolidación en un drenaje unidireccional (Das, 2001).

U_x [%]	T_x	U_x [%]	T_x	U_x [%]	T_x	U_x [%]	T_x	U_x [%]	T_x
0	0	21	0,0346	42	0,138	63	0,318	84	0,658
1	0,00008	22	0,0380	43	0,145	64	0,329	85	0,684
2	0,0003	23	0,0415	44	0,152	65	0,340	86	0,712
3	0,00071	24	0,0452	45	0,159	66	0,352	87	0,742
4	0,00126	25	0,0491	46	0,166	67	0,364	88	0,774
5	0,00196	26	0,0531	47	0,173	68	0,377	89	0,809
6	0,00283	27	0,0572	48	0,181	69	0,390	90	0,848
7	0,00385	28	0,0615	49	0,188	70	0,403	91	0,891
8	0,00502	29	0,0660	50	0,197	71	0,417	92	0,938
9	0,00636	30	0,0707	51	0,204	72	0,431	93	0,993
10	0,00785	31	0,0754	52	0,212	73	0,446	94	1,055
11	0,0095	32	0,0803	53	0,221	74	0,461	95	1,129
12	0,0113	33	0,0855	54	0,230	75	0,477	96	1,219
13	0,0133	34	0,0907	55	0,239	76	0,493	97	1,336
14	0,0154	35	0,0962	56	0,248	77	0,511	98	1,500
15	0,0177	36	0,102	57	0,257	78	0,529	99	1,781
16	0,0201	37	0,107	58	0,267	79	0,547	100	-
17	0,0227	38	0,113	59	0,276	80	0,567	-	-
18	0,0254	39	0,119	60	0,286	81	0,588	-	-
19	0,0283	40	0,126	61	0,297	82	0,610	-	-
20	0,0314	41	0,132	62	0,307	83	0,633	-	-

Por otro lado, dependiendo de la dirección del flujo, a cada grado promedio de consolidación primaria U_x le corresponde su factor de tiempo adimensional T_x y obviamente el tiempo t_x necesario para alcanzar ese grado de consolidación. De este modo, independiente del tiempo que se tenga asociado a un grado de consolidación, se puede estimar cualquier otro tiempo utilizando los factores

Existen 2 métodos gráficos para el análisis de las curvas tiempo – deformación, los cuales se detallan a continuación:

Propuesto por Casagrande y Fadum en 1940, este método sirve para el análisis gráfico de la curva que relaciona la deformación con el tiempo en escala logarítmica. Específicamente, se puede obtener directamente t_{50} , el cual es el tiempo para alcanzar el 50 [%] la consolidación primaria. Los pasos a seguir, utilizando la figura 2-7, son los siguientes:

-

3) Dibuje una línea horizontal DE tal que la distancia vertical BD sea igual a x . La deformación correspondiente a la línea DE es d_0 , es decir, la deformación que se tiene cuando se lleva un 0 [%] de la consolidación primaria.

- 4) Promediando d_0 y d_{100} se puede obtener d_{50} (deformación que se tiene cuando se lleva un 50 [%] de la consolidación primaria). La ordenada del punto F sobre la curva representa esta deformación, y su abscisa, el logaritmo de t_{50} .

Método de la Raíz Cuadrada del Tiempo

Sugerido por Taylor en 1942, este método sirve para el análisis gráfico de la curva que relaciona la deformación con la raíz del tiempo. Específicamente, se puede obtener directamente t_{90} , el cual es el tiempo para alcanzar el 90 [%] la consolidación primaria. Los pasos a seguir, utilizando la figura 2-8, son los siguientes:

- 1) Dibujar una línea AB a través de la porción prematura de la curva.
- 2) Dibujar una línea AC tal que $\overline{OC} = 1,15\overline{OB}$. La abscisa del punto D , que es la intersección de AC y la curva de consolidación, entrega la raíz cuadrada de t_{90} .

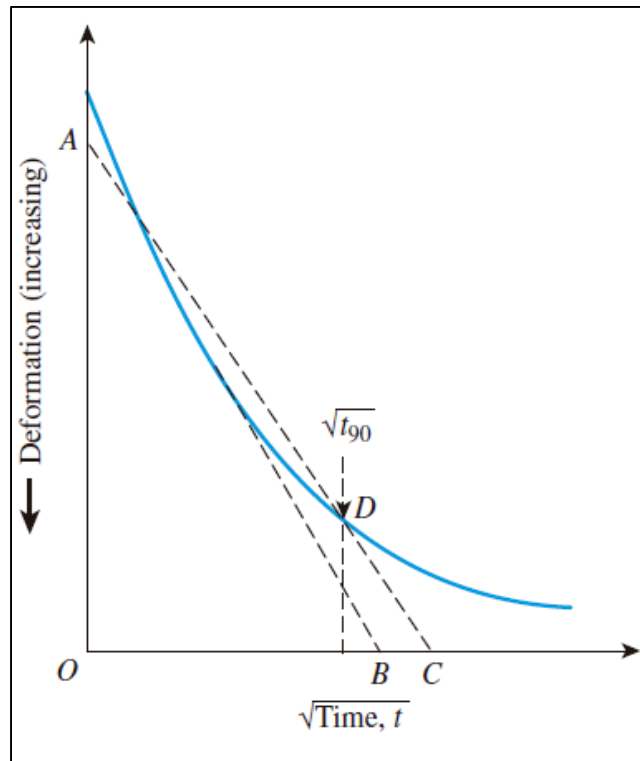


Figura 2-8: Método de la raíz cuadrada del tiempo para determinar t_{90} (Das y Sobhan, 2014).

2.3. Resistencia Cortante de un Suelo

2.3.1. Introducción

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Este tópico es de particular importancia para analizar problemas asociados a la estabilidad del suelo, tales como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

En general, y a lo largo de la historia, han sido planteados un gran número de criterios o teorías de ruptura para los distintos materiales que es posible encontrar. Para el caso del suelo, el criterio comúnmente utilizado es el criterio de falla de Mohr – Coulomb, el cual es descrito y explicado ampliamente en este apartado.

También, se mencionan y explican los conceptos de esfuerzos efectivos, dilatancia y estado crítico en el suelo, conceptos de particular relevancia en el ámbito de la resistencia cortante.

Por otro lado, también dentro de este apartado, se presenta brevemente el ensayo de corte directo, de modo de poder contrastarlo con el ensayo triaxial, el cual se trata de forma independiente en el apartado posterior y con mucha mayor profundización, ya que éste es el foco de estudio de este trabajo de titulación, y la implementación de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID para el laboratorio LEMCO, el principal objetivo.

2.3.2. Criterio de Falla de Mohr – Coulomb

En 1776 Coulomb postuló una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solo debido a esfuerzo normal o esfuerzo máximo cortante. Además, él planteó que existe una ley de variación lineal entre ambos tipos de esfuerzos sobre el plano de falla, la cual para el caso de un suelo es la representada por la ecuación (2-4).

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi \quad (2-4)$$

Donde:

τ_f : Esfuerzo cortante sobre el plano de falla.

σ_f : Esfuerzo normal sobre el plano de falla.

c : Cohesión.

ϕ : Ángulo de fricción interna.

En 1900 Mohr confirmó esta relación funcional entre esfuerzo normal y esfuerzo cortante sobre el plano de falla. No obstante, la teoría de Mohr no fija la hipótesis de variación lineal entre estos esfuerzos, sino que plantea una ley de variación más bien curva. Esta teoría explica

satisfactoriamente varios fenómenos de importancia en los materiales frágiles como rocas, concretos y suelos.

La teoría de Coulomb, que resulta ahora un caso particular de la generalizada de Mohr, puede ser suficientemente satisfactoria en muchos problemas, tales como los que se refieren a los suelos arenosos sometidos a niveles bajos de esfuerzos y a los suelos plásticos saturados y normalmente consolidados, entre otros. En suelos plásticos no saturados o preconsolidados, la generalización que presenta el criterio de Mohr es a veces conveniente.

Por otro lado, la ecuación (2-4) suele denominarse criterio de falla de Mohr – Coulomb por el hecho de que es usualmente graficada junto a círculos de Mohr para evaluar la proximidad del estado tensional del suelo de la línea de falla de Coulomb (figura 2-9). Este criterio de falla asume condiciones planas (estado de esfuerzo plano), es decir, no aparece la tensión principal media, la cual en un ensayo triaxial convencional es igual a la tensión principal menor.

En el criterio de falla de Mohr – Coulomb, además de los esfuerzos sobre el plano de falla, aparecen 2 términos de vital importancia en la Mecánica de Suelos y que en este modelo son los responsables de otorgarle resistencia cortante. Estos son la cohesión c y el ángulo de fricción interna ϕ . La figura 2-10 muestra graficada la envolvente de falla de Mohr y la recta que representa el criterio de falla descrito. La pendiente de esta recta es igual a la tangente del ángulo de fricción en cuestión, mientras que su intercepto con el eje de la ordenada o eje del esfuerzo cortante es la cohesión. De este modo, la cohesión tiene unidades de esfuerzo. Esto último también puede ser apreciado en la figura 2-9.

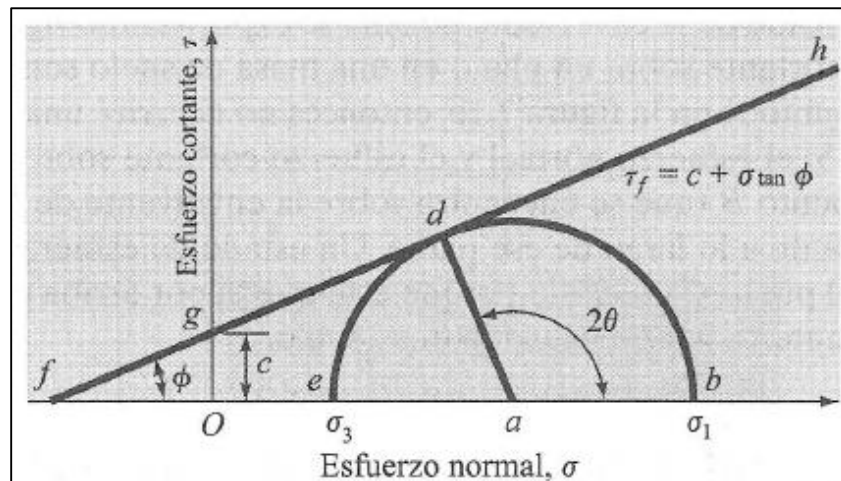


Figura 2-9: Criterio de falla de Mohr – Coulomb y círculo de Mohr para un estado tensional de falla (Das, 2001).

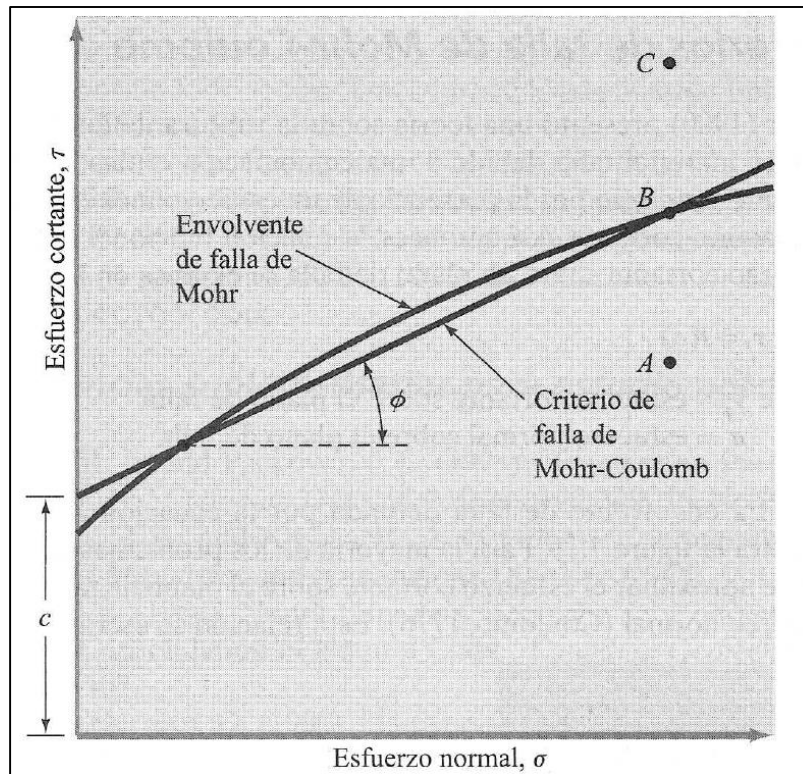


Figura 2-10: Envoltura de falla de Mohr y criterio de falla de Mohr – Coulomb (Das, 2001).

La figura 2-10 también puede ser utilizada para explicar el significado de la envoltura de falla. Si el esfuerzo normal y esfuerzo cortante sobre un plano de falla son tales que pueden ser representados por un punto *A*, entonces no ocurrirá falla y/o deslizamiento a lo largo de ese plano. En cambio, si el par esfuerzo normal – esfuerzo cortante sobre un plano de falla es representado por un punto *B* (sobre la envoltura de falla), entonces ocurrirá falla a lo largo de dicho plano. Por otro lado, un estado de esfuerzos como el que plantea un punto *C*, no es posible ya que el suelo ya habría fallado para un esfuerzo cortante menor.

Con respecto al ángulo de fricción, medido en los distintos ensayos para determinar la resistencia cortante, está asociado a la fricción o roce que hay entre las superficies de contacto de las partículas, pero no es exactamente lo mismo que ésta. En efecto, el ángulo de fricción interpartículas podría tener sorpresivamente una pequeña influencia en el ángulo de fricción efectivo (ver ítem 2.3.2.1) de un ensamble de partículas que se mueven relativas unas a otras principalmente por rodado más que por deslizamiento (Ni, 2003). También hay otros factores que influyen en el ángulo de fricción, como lo es la trabazón, que a su vez depende del grado de acomodo y angularidad de las partículas. Cabe destacar, para una arena suelta y seca el ángulo de fricción interna tiene una interpretación física sencilla al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un montoncito de dicho material.

Por su parte, en el contexto del criterio de falla de Mohr – Coulomb, la cohesión debe entenderse como una resistencia cortante constante bajo esfuerzos normales nulos. En un contexto más general de la Mecánica de Suelos, se suele hacer una distinción entre una cohesión aparente y otra verdadera. La cohesión verdadera se puede explicar como un valor constante de resistencia cortante suministrado, por ejemplo, por algún tipo de cementación natural. La denominación

“verdadera” se explica porque esta cohesión constituye ser realmente una resistencia cortante constante bajo esfuerzos efectivos nulos (concepto “efectivo” definido posteriormente en 2.3.2.1). En cambio, la cohesión “aparente” se denomina así porque es un valor que surge de intentar ajustar una línea recta (criterio de falla de Mohr – Coulomb) a una zona curva de la envolvente de falla. También se tiende a utilizar esta denominación “aparente” en suelos sin cohesión verdadera y que, por ejemplo, permiten excavaciones sin desmoronarse; esto en si no es una cohesión, sino un mecanismo de fricción asociado a succiones en el agua de poros que originan presiones intergranulares, ya sea en un estado de saturación parcial o en un estado de consolidación y descarga sin cambio de volumen y humedad posterior.

2.3.2.1. Criterio de Falla de Mohr – Coulomb Modificado

La ecuación (2-4) fue utilizada por más de un siglo y sirvió de base para la elaboración de teorías de presión de tierra, capacidad de carga y métodos de análisis de la estabilidad de terraplenes y presas de tierra.

No obstante, los ingenieros con ciertos dotes de observación empezaron a notar las fuertes discrepancias que existían entre la realidad y lo que alguno de ellos llegó a denominar teorías de “libros de texto”. En 1925 Terzaghi estableció, con base en serias investigaciones experimentales comenzadas alrededor de 1920, que en la ecuación (2-4) el esfuerzo normal sobre el plano de falla debe sustituirse por la denominada “presión efectiva”, la cual no es exactamente la presión transmitida en los puntos de contacto entre partículas (presión intergranular), pudiendo esta última llegar a valores muy superiores que inclusive pueden producir la rotura de granos. Sin embargo, la presión efectiva, definida en la ecuación (2-5), regularmente se asume como el esfuerzo que es resistido directamente por el esqueleto del suelo y es la que en estricto rigor debe ser utilizada en estos análisis de resistencia cortante, ya que el agua no soporta esfuerzos de corte. Por tanto, el criterio de falla de Mohr – Coulomb modificado queda expresado como lo indica la ecuación (2-6).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-5)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u) \tan \phi' = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (2-6)$$

Donde:

σ : Esfuerzo normal total.

σ' : Esfuerzo normal efectivo.

u : Presión de poros.

Cabe destacar, los parámetros geotécnicos de resistencia al corte, cohesión c' y ángulo de fricción ϕ' , pasan a denominarse “efectivos” o “drenados”, donde la última denominación surge producto de que regularmente son obtenidos directamente en ensayos de este tipo. De este modo, los parámetros geotécnicos de resistencia al corte calculados utilizando esfuerzos totales, raramente tienen alguna utilidad práctica, dado que carecen de sentido físico. También, es de suma importancia mencionar el hecho de que el principio de esfuerzos efectivos definido por la ecuación (2-5) es aplicable a suelos completamente saturados o que tienen un muy alto grado de saturación (superior

al 90 [%]), con lo cual la presión de poros se debe solamente al agua de estos intersticios. En cambio, en suelos parcialmente saturados los espacios intersticiales contienen dos fluidos, agua y aire, a presiones que difieren considerablemente debido a tensiones superficiales. Bishop propuso la siguiente expresión (ecuación (2-7)) para el esfuerzo efectivo en este tipo de suelos.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + X(u_a - u_w) \quad (2-7)$$

Donde:

u_a : Presión de aire de poros.

u_w : Presión de agua de poros.

X : Parámetro que depende del grado de saturación, tipo de suelo y ciclos de humedecimiento y secado entre otros. Se puede entender, simplificada, como la fracción del área de poros ocupada por el agua.

La hipótesis de Bishop permite explicar algunos fenómenos del comportamiento de suelos semisaturados, pero no todos. Actualmente, la hipótesis más general es que el comportamiento es función de dos variables tensionales independientes, en lugar de un solo esfuerzo efectivo. Para estas variables, que se suelen denominar “esfuerzos significativos”, suelen utilizarse las diferencias $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$. Estas variables tienen un sentido físico claro, pues la primera es el esfuerzo total neto (referido al del aire) y la segunda, la succión del agua.

La ecuación (2-7) deja entrever la complejidad de realizar ensayos para determinar la resistencia cortante en este tipo de suelos. La mayoría de las máquinas convencionales, ya sea triaxiales o de corte directo, no cuentan con dispositivos que permitan realizar una diferenciación entre presión de agua y aire de poros. Por ello, los ensayos más usuales y rutinarios para determinar la resistencia cortante son realizados bajo una condición de completa saturación, y si no lo es así, sólo se expresan los resultados obtenidos en términos de esfuerzos totales (por ejemplo en los ensayos de compresión triaxial no consolidados y no drenados). Esto no implica que la condición saturada sea siempre la más desfavorable y representativa del terreno, de hecho en muchos proyectos la condición parcialmente saturada prevalece y puede gatillar inestabilidades o incluso fallas.

2.3.2.2. Relación Entre Criterio de Falla de Mohr – Coulomb y Solución Gráfica de Mohr

Como ya en parte fue expuesto, el criterio de falla de Mohr – Coulomb se denomina así porque es graficado junto a círculos de Mohr para evaluar su proximidad del estado tensional que representa cada círculo. Además, un círculo de Mohr no puede intersectar al criterio de falla descrito, ya que en ciertos planos a través de la probeta se estarían originando combinaciones de esfuerzos normal y cortante mayores que las críticas representadas por el criterio de falla. De este modo, un círculo de Mohr que represente un estado tensional plano de falla sólo puede ser tangente en un único punto al criterio de falla de Mohr – Coulomb (figura 2-9), lo cual permite relacionarlos geoméricamente.

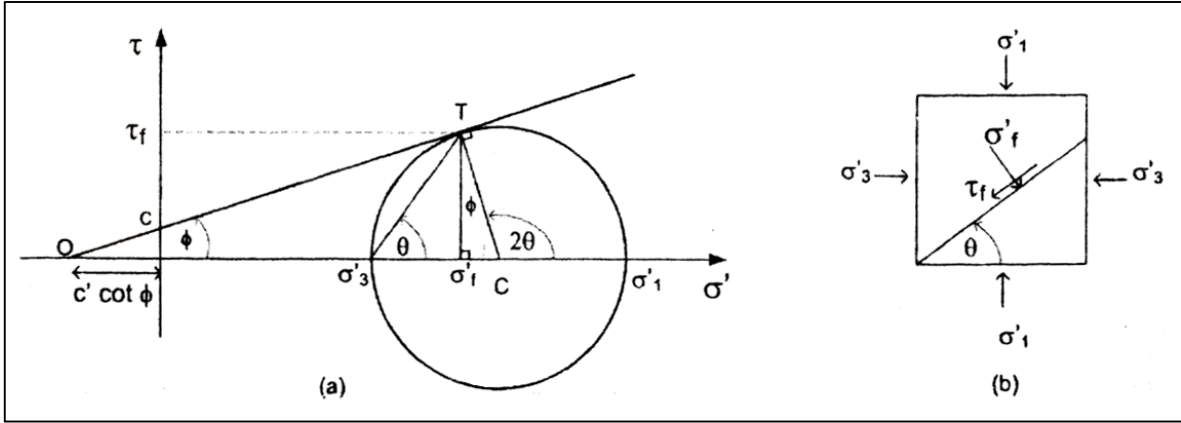


Figura 2-11: Estado tensional de falla usando: (a) Círculo de Mohr, (b) Elemento de suelo en falla (Villalobos, 2014).

En la figura 2-11, se puede apreciar como el plano de falla forma un ángulo θ con el plano principal mayor para un estado plano de esfuerzos. Dicho ángulo θ determina la inclinación del segmento radial que intersecciona perpendicularmente al criterio de falla en cuestión, lo cual permite definir la combinación crítica de esfuerzos (punto T) y asociar el ángulo de fricción ϕ' con el de inclinación θ (ecuación (2-8)).

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \quad (2-8)$$

Siguiendo los lineamientos geométricos de la figura 2-11, es posible expresar, en el caso más general y según las ecuaciones (2-9) y (2-10), el criterio de falla de Mohr – Coulomb en función de los esfuerzos principales efectivos del estado tensional plano de falla y parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) + \left(\frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \quad (2-9)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2-10)$$

Al analizar las ecuaciones (2-9) y (2-10), se puede apreciar que con realizar, por ejemplo, dos ensayos triaxiales convencionales a distintos esfuerzos efectivos al comienzo de la etapa de corte, se tendrían los datos suficientes para determinar los parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte y definir una envolvente de falla lineal. Sin embargo, se suele establecer como mínimo un total de tres ensayos en probetas de idéntica densidad seca y humedad inicial (de confección en probetas remoldeadas), ya que ello permite tener un punto de verificación para el ajuste de una envolvente de falla lineal bajo esas condiciones y esfuerzos iniciales.

2.3.3. Dilatancia

Este concepto se aplica en Mecánica de Suelos cuando en un suelo, producto de la aplicación de un esfuerzo tangencial o de corte, tiende a variar su volumen. Este tipo de variaciones volumétricas se producen principalmente en suelos que contienen materiales granulares, lo cual no quiere decir que no se produzcan en suelos cohesivos.

El fenómeno de dilatancia en suelos granulares puede ser representado por un modelo conceptual de “dientes de serrucho” como el que se visualiza en la figura 2-12, en donde al aplicar una fuerza tangencial T el bloque superior desliza y tiende a moverse verticalmente, provocando un cambio de volumen ΔV . El plano de este deslizamiento forma un ángulo ψ con la horizontal o plano de deslizamiento macroscópico, denominándose comúnmente como ángulo de dilatancia o dilatación. Este ángulo puede ser positivo o negativo dependiendo de si el cambio de volumen resultante es una expansión o una compresión.

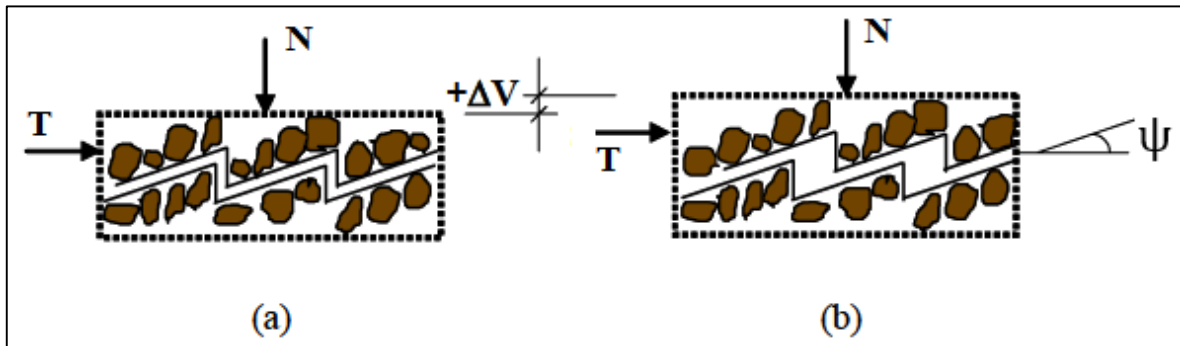


Figura 2-12: Modelo conceptual de "dientes de serrucho" para explicar la dilatancia de suelos granulares (Ríos, 2015).

Es importante señalar que la Teoría de la Elasticidad implica dilatancia nula, ya que no hay acoplamiento entre las deformaciones normales y esfuerzos tangenciales en la ley de Hooke. Esta es una de las tantas razones de por qué no se puede utilizar en su totalidad esta teoría para explicar los distintos fenómenos que ocurren durante ensayos de corte.

Ahora bien, el fenómeno de dilatancia está intrínsecamente relacionado con la densidad del suelo granular y el historial de consolidación en suelos cohesivos. En una arena denominada densa, las partículas se encuentran ocupando la mayor parte del volumen del suelo y fuertemente imbricadas, por lo cual para proseguir la deformación cortante los granos deben avanzar por sobre los que tienen delante en una dirección inclinada con respecto a la del deslizamiento macroscópico. Este proceso se conoce como dilatancia positiva (figura 2-13(b)) y tiene un resultado doble: por un lado se produce una resistencia peak, y por otro, el deslizamiento tiene una componente ascendente, lo que provoca un aumento de volumen y esponjamiento de la estructura del suelo. Esto también explica la pérdida de resistencia después de alcanzar el peak, ya que con la deformación va disminuyendo la inclinación del contacto a lo largo del que deslizan los granos.

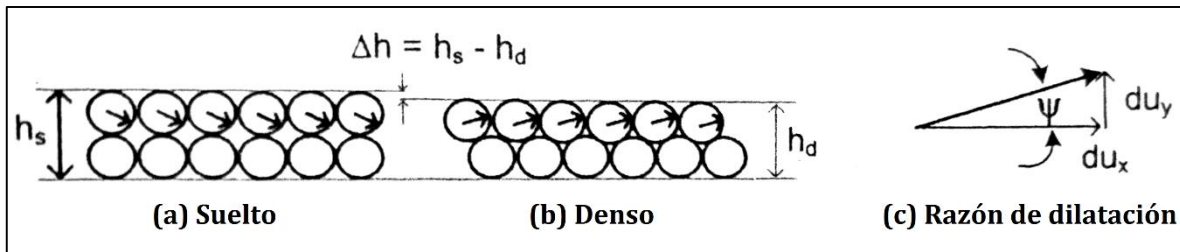


Figura 2-13: Dilatación negativa en suelos granulares sueltos y positiva en suelos granulares densos (Modificado de Villalobos, 2014).

Por otro lado, en una arena denominada suelta, los granos forman una estructura muy abierta. Al deslizar van cayendo a posiciones más empaquetadas, proceso que se conoce comúnmente como dilatación negativa (figura 2-13(a)). Con ello, ocurre una disminución progresiva del volumen ocupado por la estructura del suelo, así como un aumento paulatino de la resistencia cortante, ambos hasta llegar idealmente a un valor constante cuando se alcanza un equilibrio.

Un análisis cualitativamente similar es válido para los suelos finos o cohesivos, pero con diferencias en su cuantificación. En estos suelos, las diferencias de densidad están asociadas a procesos de sobreconsolidación, ya que por su baja permeabilidad no se densifican por vibración o compactación dinámica rápida. Por ello, en lugar de los términos suelto o denso, se habla de diferentes razones de sobreconsolidación (normalmente consolidado o preconsolidado). Una forma de entender esta correspondencia de comportamiento entre suelos cohesivos y granulares es la que se explica a continuación y que se basa en el concepto de esfuerzo de preconsolidación equivalente en suelos granulares (ítem 2.2.3.2). Este esfuerzo viene dado por la compactación a la densidad requerida, pues los suelos granulares difícilmente permiten la extracción de probetas inalteradas. Entonces, si el esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte es apreciablemente menor que el esfuerzo de preconsolidación equivalente, el suelo se comportará como fuertemente preconsolidado, lo que en suelos granulares se establece como denso. En cambio, si el esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte supera al esfuerzo de preconsolidación equivalente que había sido fijado por la compactación, es decir, pasa a ser el nuevo esfuerzo de preconsolidación, el suelo se comportará durante el corte como normalmente consolidado, o mejor dicho suelto en la jerga granular.

Del párrafo anterior se puede apreciar la dependencia de la clasificación del suelo durante el corte (suelto o denso y normalmente consolidado o preconsolidado) del esfuerzo efectivo de consolidación que tenga al comienzo de éste. Esta dependencia es totalmente extensible a su comportamiento dilatante, por lo cual un suelo granular que en un comienzo se piensa como denso producto de su reducida relación de vacíos inicial, para un gran esfuerzo efectivo de consolidación podría presentar una dilatación negativa (contracción), así como denotar la ausencia de un peak claro en su curva de resistencia, es decir, en realidad debería tomarse como suelto.

2.3.4. Estado Crítico

A partir de la evidencia física de dilatación y contracción es posible plantearse la existencia de un estado intermedio entre suelto y denso (normalmente consolidado y preconsolidado en suelos cohesivos) o contracción y dilatación. Efectivamente, Casagrande (1936) encontró este estado intermedio a partir de una relación de vacíos denominada relación de vacíos crítica e_c . Para que el suelo alcance una relación de vacíos crítica, es necesario que la deformación de corte se prolongue hasta que ya no haya cambio volumétrico. Es, por tanto, una condición final a la cual llegan tanto muestras densas (fuertemente preconsolidadas) como sueltas (normalmente consolidadas). Las curvas de la figura 2-14(c), ilustran la convergencia a la relación de vacíos crítica a partir de muestras de suelo granular inicialmente densas y sueltas sometidas a un ensayo de corte directo consolidado y drenado (ítem 2.3.5).

En la figura 2-14, ambas muestras, suelta y densa, están asociadas al mismo esfuerzo normal efectivo al comienzo de la etapa de corte (igual al final en un ensayo drenado), por lo cual es lícito pensar que este es el responsable de imponer la relación de vacíos crítica a la cual debe llegar el suelo en cuestión (figura 2-14(c)). Esto constituye ser otra forma de analizar lo planteado en el ítem 2.3.3 con respecto a la clasificación del suelo durante el corte (suelto o denso y normalmente consolidado o preconsolidado) y su comportamiento dilatante. Si la relación de vacíos que tiene el suelo al comienzo de esta etapa es menor que esta relación de vacíos crítica, éste tendrá que dilatar positivamente y expandirse para alcanzarla, presentando por tanto un peak claro en su curva de resistencia y clasificándose como denso o preconsolidado según corresponda; en cambio, si la relación de vacíos al comienzo del corte es mayor que la crítica impuesta, el suelo tendrá que dilatar negativamente y contraerse hasta alcanzarla, sin presentar un peak claro en su curva de resistencia y clasificándose como suelto o normalmente consolidado.

En la figura 2-14(a), resulta interesante notar que independiente del estado de densidad inicial y de tener un historial de tensiones que otorgue un comportamiento dilatante o contractivo, luego de ser sometido a un esfuerzo y deformación de corte de forma prolongada, ambas curvas de resistencia se aproximan llegando a un esfuerzo de corte similar y constante. También, para esta misma deformación se llegan a los ya mencionados relación de vacíos crítica y cambio volumétrico nulo, por lo cual es posible definir un estado común denominado estado crítico. El estado crítico se define conceptualmente como una condición de no cambio volumétrico bajo esfuerzos cortante y normal efectivo constantes, es decir, bajo un estado tensional efectivo constante. Al alcanzar el estado crítico, una masa de suelo sigue experimentando solamente deformaciones que causan un continuo cambio de forma, pero sin modificar el volumen total ni los esfuerzos efectivos. Adicionalmente, Poulos (1981) estableció que la continua deformación que ocurre en este estado es bajo una velocidad constante.

Se puede hacer notar también que para el caso de suelo que se comporta como denso, el esfuerzo cortante máximo coincide bastante bien con la razón de dilatación máxima (figura 2-14(b)). Es por ello que prácticamente se estima el ángulo de dilatación, trazando una recta en el punto que se proyecta de τ_{max} desde la curva $\tau - \gamma$ (esfuerzo cortante – deformación cortante).

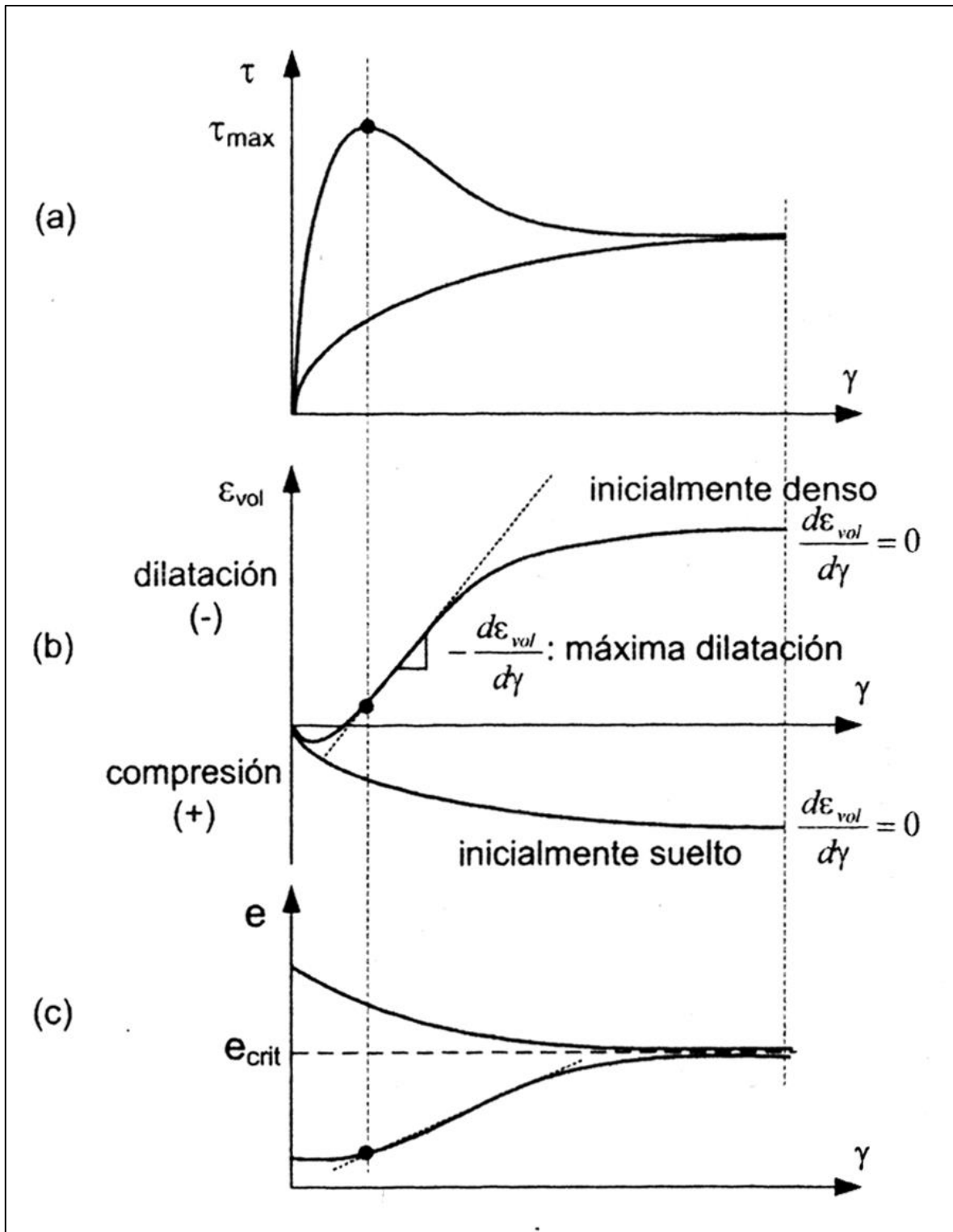


Figura 2-14: Resultados esquemáticos de ensayos de corte directo para la misma muestra granular inicialmente densa y suelta bajo el mismo esfuerzo normal. (a) $\tau - \gamma$, (b) $\epsilon_{vol} - \gamma$ y (c) $e - \gamma$ (Villalobos, 2014).

Otro punto importante a destacar es el hecho de que siguiendo un razonamiento análogo al dictado por el criterio de falla de Mohr – Coulomb, pueden encontrarse parámetros geotécnicos de resistencia cortante asociados al estado crítico. En efecto, la recta que define el criterio de Mohr – Coulomb aplicado al estado crítico (figura 2-15(b)), es tangente a distintos círculos de Mohr, cada uno representando un estado tensional crítico. En el caso que hubiera una cohesión verdadera, una expresión general para el ángulo de fricción asociado al estado crítico sería:

$$\phi'_{cri} = \tan^{-1} \left(\frac{\tau - c'}{\sigma} \right)_{cri} \quad (2-11)$$

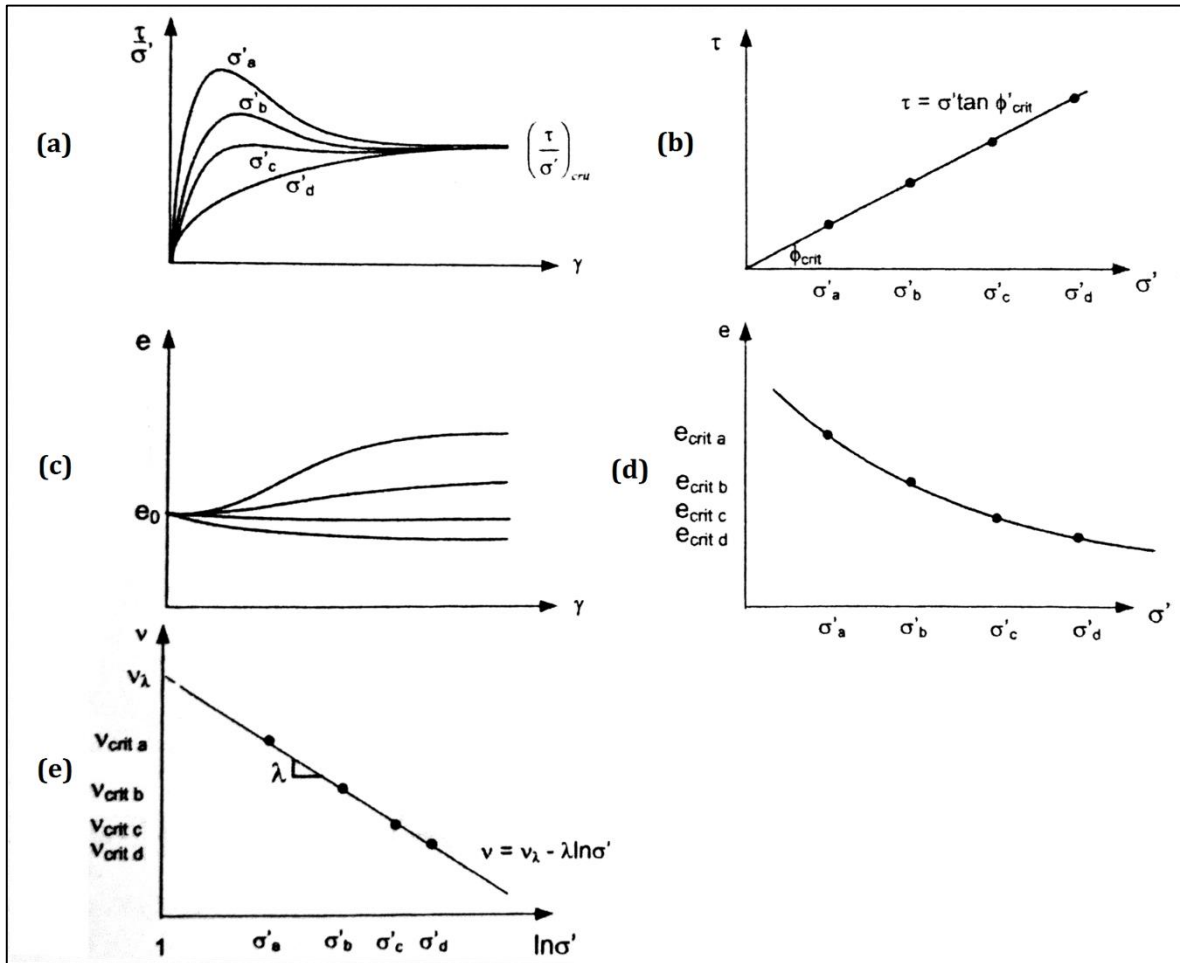


Figura 2-15: Interpretación esquemática de resultados de ensayos de corte directo para muestras granulares con la misma relación de vacíos inicial, pero con diferente esfuerzo normal: (a) $\tau/\sigma' - \gamma$, (b) $\tau - \sigma'$ en estado crítico, (c) $e - \gamma$, (d) $e - \sigma'$ en estado crítico y (e) $v - \ln \sigma'$ en estado crítico (Villalobos, 2014).

En la figura 2-15 se presenta una interpretación esquemática de ensayos de corte directo para un suelo granular sin cohesión verdadera ($c' = 0$), partiendo la etapa de corte con la misma relación de vacíos inicial (misma densidad al comienzo del corte), pero aplicando diferentes esfuerzos normales durante el ensayo (distintos esfuerzos normales efectivos al comienzo del corte), de forma tal que $\sigma'_a < \sigma'_b < \sigma'_c < \sigma'_d$. En la figura 2-15(a), el esfuerzo de corte es normalizado por σ' , donde a

pesar de seguir diferentes curvas al comienzo, todas convergen al final a una proporción similar de $(\tau/\sigma')_{cri}$, llamada razón de tensiones crítica.

La razón de tensiones crítica constante implica que el ángulo de fricción efectivo asociado al estado crítico (ϕ'_{cri}) es constante, es decir, es independiente del historial de tensiones. Es por ello que al graficar estas tensiones en el plano $\tau - \sigma'$ se obtiene una recta perfecta, la cual no es otra cosa que el criterio de Mohr – Coulomb aplicado al estado crítico. Esta independencia de ϕ'_{cri} con respecto al historial de tensiones, ya sea que provoque un comportamiento dilatante o contractivo (figura 2-15(c)), se puede extender a una independencia del estado de densidad inicial, según lo visto en la figura 2-14(a).

Un análisis similar puede ser realizado con muestras que presenten cohesión verdadera, sólo que en ese caso se llega a que $((\tau - c')/\sigma)_{cri}$ se mantiene constante, independiente del historial de tensiones y del estado de densidad inicial. En ese caso, la diferencia radica en que la recta que representa el criterio de Mohr – Coulomb para el estado crítico no parte desde el origen, sino que intersecta la ordenada en un valor igual a la cohesión verdadera.

La figura 2-15(c), y al igual que la figura 2-14(c), muestra la evolución de la relación de vacíos durante el corte. En este caso, cada trayectoria también tiende a un valor constante y crítico (volumen constante), pero distinto para cada esfuerzo normal efectivo, lo cual ratifica lo expuesto en párrafos anteriores. Luego, estos valores son traspasados al gráfico de al lado en la figura 2-15(d) en función del esfuerzo normal efectivo. Los puntos siguen una curva, la cual generalmente se linealiza aplicando logaritmo a σ' como se puede apreciar en la figura 2-15(e) (utilizando volumen específico).

Finalmente, todo el análisis aquí realizado indica la existencia de una única curva en el espacio (σ', τ, e) o, equivalentemente, en el espacio (σ', τ, v) (figura 2-16), que representa los distintos estados críticos posibles de alcanzar por un suelo en particular. En efecto, la curvas de la figura 2-15(b) y de la figura 2-15(d) son proyecciones de esta curva espacial en los planos $\tau - \sigma'$ y $e - \sigma'$ respectivamente. Entonces, el estado de un suelo puede ser definido por estos tres parámetros $(\sigma', \tau \text{ y } v \text{ o } e)$ y su comportamiento durante el corte (dilatante o contractivo) dependerá de su estado inicial con respecto a esta línea de estado crítico.

En resumen, los parámetros geotécnicos de resistencia al corte asociados al estado crítico y para los distintos tipos de suelos, son independientes del estado de densidad inicial y del historial de tensiones que presente éste, es decir, no se ven alterados producto de un comportamiento dilatante o contractivo. Por lo tanto, estos parámetros representan una propiedad intrínseca para cada suelo particular, la cual se da una vez alcanzadas grandes deformaciones y que se traducen en una única curva en el espacio (σ', τ, v) . Por otro lado, el ángulo de fricción efectivo movilizado máximo $\phi'_{mov-m\acute{a}x}$ de un ensayo drenado (asociado a la resistencia máxima y calculado para un ensayo individual asumiendo $c' = 0$, a no ser que haya una cohesión verdadera), denominado usualmente como $\phi'_{m\acute{a}x}$ o ϕ'_{peak} , puede ser de uso más común en la práctica, pero este si es dependiente del estado de densidad inicial, historial de tensiones y nivel de deformación cortante. Powrie (2004) sostiene que este ángulo de fricción efectivo movilizado máximo es más bien de interés académico, ya que es un valor transitorio que se sostiene sólo cuando el suelo es capaz de dilatar.

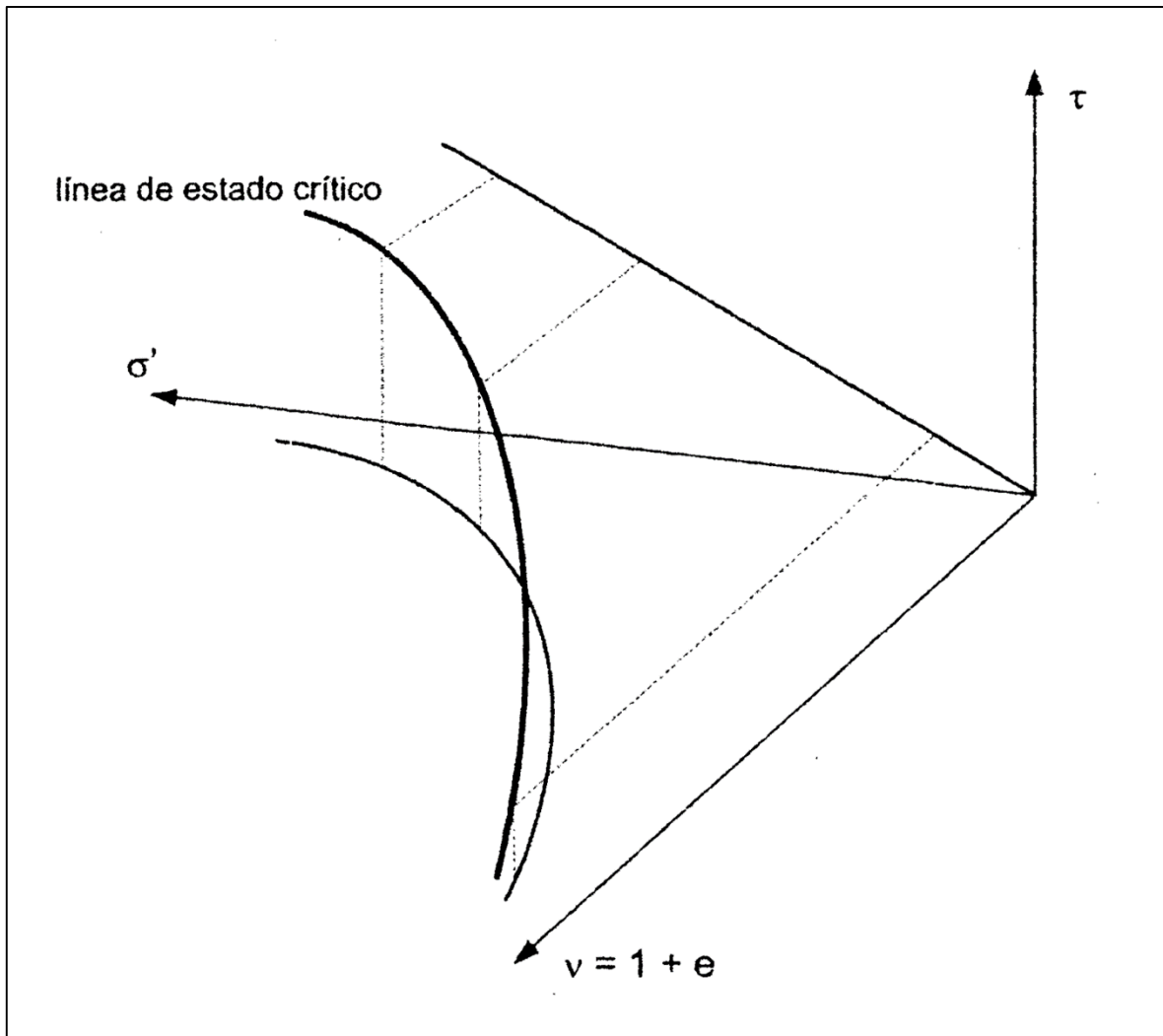


Figura 2-16: Línea de estado crítico en el espacio (σ' , τ , v) (Villalobos, 2014).

2.3.5. Ensayo de Corte Directo

El ensayo de corte directo es el más antiguo y simple para determinar la resistencia cortante de un suelo. Este apartado dice relación sólo con aquel donde el modo de carga es monotónico. La figura 2-17 presenta un diagrama típico del aparato utilizado para este ensayo. Este aparato consta de dos marcos (caja de corte), uno fijo y otro móvil, que contienen a la muestra de suelo. Las probetas pueden ser cuadradas o circulares, las cuales generalmente poseen un tamaño aproximado de al menos 25 [cm²] de superficie transversal y 13 [mm] de altura. No obstante, existen cajas de corte de otras dimensiones, pudiendo llegar a ser considerables para la ejecución de este ensayo a gran escala.

En el arreglo de la figura 2-17 se puede apreciar también la existencia de piedras porosas que permiten el drenaje de la probeta si es que se desea, estando las placas de carga e inferior perforadas con tal de posibilitar este objetivo. En el caso de ensayos con etapas sin drenaje, estos orificios deben ser cerrados y/o deben cambiarse las piedras por discos o placas de acrílico u otro material impermeable.

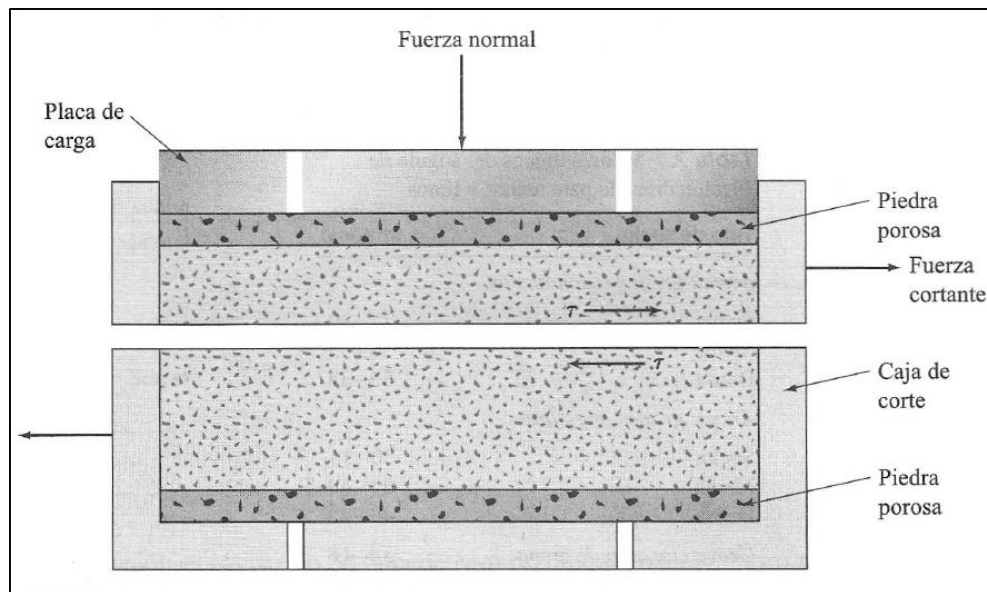


Figura 2-17: Diagrama típico del arreglo para la ejecución de un ensayo de corte directo (Das, 2001).

El ensayo puede realizarse sobre probetas inalteradas o remoldeadas, pudiendo estas últimas ser compactadas en la misma caja de corte a la humedad y densidad requeridas. Sobre la placa de carga se aplica una carga vertical que repartida en el área de la probeta supone un esfuerzo normal. A continuación, se aplica una fuerza horizontal que supone un esfuerzo cortante, produciendo un desplazamiento horizontal relativo del marco móvil con respecto al fijo, es decir, se induce el plano de falla en la sección central de la caja. La modalidad del ensayo consiste en mantener constante el esfuerzo normal y aumentar el cortante hasta alcanzar la falla, el estado crítico, o una deformación preestablecida, según se requiera y sea posible. Por ello, la fuerza vertical suele aplicarse mediante sistemas que consideran la utilización de pesos muertos o, en casos más sofisticados, mediante sistemas hidráulicos o neumáticos. Por otro lado, la carga horizontal puede incrementarse a través de una modalidad por esfuerzo controlado o deformación controlada. En los ensayos controlados por esfuerzo, la fuerza cortante es aplicada en incrementos iguales hasta que la probeta falla. En ensayos controlados por deformación, por medio de algún motor adecuado se aplica una razón constante de desplazamiento cortante al marco móvil y se va midiendo la carga horizontal asociada a cada nivel de deformación a través de un anillo de carga horizontal (manualmente) o celda de carga (automáticamente con ayuda de un software). Es de uso mucho más común esta variedad con velocidad controlada, por ser más automatizable y por entregar información de la resistencia cortante en puntos después de la falla. Las deformaciones horizontal y vertical son también medidas, ya sea manualmente a través de la lectura sobre diales de deformación, o mediante dispositivos electrónicos denominados LVDT (Linear Variable Differential Transformer) o LSCT (Linear Strain Conversion Transducer) que trabajan de forma automática cuando están asociados a un software.

Es importante destacar que existen tres tipos de ensayos de corte directo, atendiendo a si se permite o no el drenaje durante las diferentes etapas del mismo. Estos son:

- *Ensayo de Corte Directo Consolidado y Drenado:* Realizable en todo tipo de suelos, donde primero, con el objetivo de representar el estado tensional inicial del suelo en terreno, la probeta se consolida unidimensionalmente bajo un esfuerzo normal vertical. Posteriormente, se realiza la

etapa de corte admitiendo el drenaje, donde la velocidad de deformación debe ser suficientemente baja para que los excesos de presión de poros vayan siendo disipados de forma inmediata.

- *Ensayo de Corte Directo Consolidado y No Drenado:* La probeta es consolidada del mismo modo que en la modalidad consolidada drenada, para luego ser cortada sin admitir el drenaje. Por tanto, la probeta no debe sufrir alteraciones en su humedad durante la etapa de corte, pero los equipos típicos para realizar este ensayo difícilmente permiten cumplir esta condición. Es por ello, que usualmente esta modalidad se ve restringida sólo a suelos relativamente impermeables.
- *Ensayo de Corte Directo No Consolidado y No Drenado:* Tanto la carga normal como la horizontal son aplicadas sin permitir el drenaje.

Los resultados que se entregan usualmente son gráficas que relacionan el esfuerzo cortante con la deformación horizontal, y en ensayos drenados el cambio de altura o deformación volumétrica con la deformación horizontal, para cada probeta ensayada. Estas curvas, en el caso de un ensayo consolidado y drenado y para arenas de comportamiento denso (falla frágil) y suelto (falla dúctil), se pueden visualizar en la figura 2-14.

En el ensayo drenado, y con la finalidad de definir una envolvente de falla, se suele ensayar como mínimo tres probetas de igual humedad y densidad seca inicial (de confección en probetas remoldeadas), pero aplicando distintos esfuerzos normales efectivos para cada una de ellas. Los esfuerzos cortante y normal efectivo asociados al peak o falla se grafican en un sistema coordinado $\tau - \sigma'$ y se traza la recta correspondiente al criterio de falla de Mohr – Coulomb (figura 2-18) para esas condiciones y esfuerzos iniciales, con lo cual pueden determinarse los parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte que la modelan.

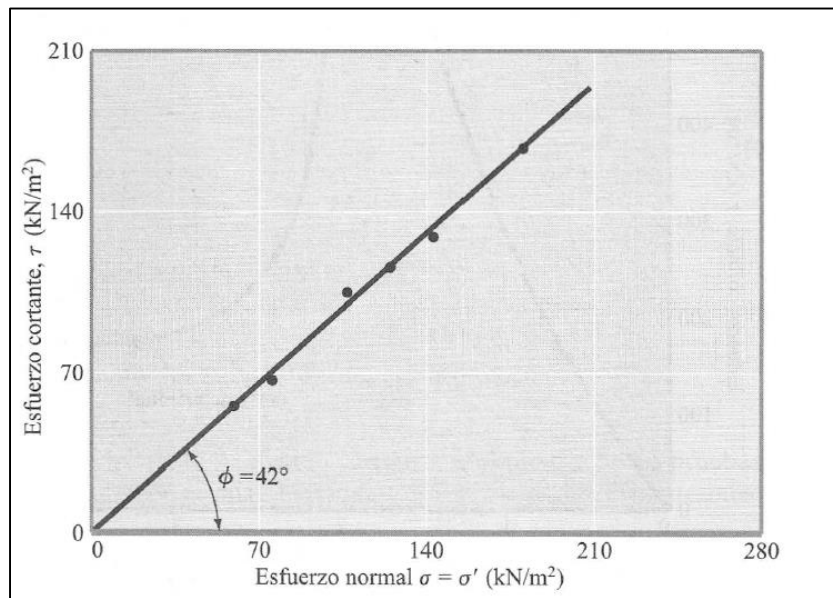


Figura 2-18: Determinación de los parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte para una arena con los resultados de ensayos de corte directo consolidados y drenados (Das, 2001).

2.3.5.1. Inconvenientes y Desventajas del Ensayo de Corte Directo

Con el fin de posteriormente poder realizar una comparación del ensayo de corte directo con respecto al ensayo triaxial, se enlistan a continuación los principales inconvenientes y desventajas que presenta su realización, algunos de los cuales ya han sido brevemente nombrados en párrafos anteriores.

- Imposibilidad de conocer los esfuerzos que actúan en planos distintos al de falla durante la realización del ensayo.
- Reducción del área de la superficie de deslizamiento a medida que el corte progresa. Esta reducción del área crea incertezas en los valores actuales de los esfuerzos de corte y normal sobre el plano de falla.
- La falla podría no ocurrir en el plano más débil, dado que esta es forzada a que ocurra entre la separación de ambos marcos.
- Imposibilidad de mantener la condición no drenada durante la etapa de corte en suelos granulares y ensayos de ese tipo.
- Los aparatos convencionales de corte directo no poseen un sistema que permita realizar mediciones de la presión de poros en ninguna etapa del ensayo. Por este motivo no se dispone de un mecanismo correcto para asegurar la saturación de las probetas en caso que se requiera (mediciones del parámetro B de presión de poros de Skempton, B-Test), como tampoco es posible expresar los resultados en términos efectivos en ensayos no drenados.
- Los esfuerzos y desplazamientos de corte no están uniformemente distribuidos dentro de la probeta. Tampoco es posible definir una altura apropiada para el cálculo de las deformaciones de corte. Por tanto, relaciones esfuerzo – deformación o cualquier cantidad asociada tal como el módulo de corte, no pueden ser determinadas a partir de este ensayo.
- Uno de los inconvenientes más importantes del ensayo de corte directo es que su uso debería restringirse a suelos de falla plástica. No debería efectuarse en suelos de comportamiento frágil, pues la curva esfuerzo cortante – deformación cortante obtenida para éstos resulta desplazada hacia valores menores del esfuerzo respecto de la que se obtendría con ensayos más adecuados, proporcionando por lo tanto, valores menores de resistencia. Esto ocurre porque la deformación tangencial en la superficie de falla no es uniforme, sino que existen concentraciones de deformación en las zonas próximas a los extremos de la caja de corte y que son menores en el centro de la probeta. A estas diferentes deformaciones corresponden diferentes esfuerzos en un material frágil y cuando los extremos de la probeta alcanzan la deformación y esfuerzo de falla, en el centro de la probeta obrarán esfuerzos mucho menores; al proseguir la deformación, la falla progresa hacia el centro de la probeta y las zonas extremas, ya falladas, estarán trabajando a un esfuerzo mucho menor que el de falla (falla progresiva). La resistencia medida en la prueba y en el momento en que la falla se presente en un suelo frágil, es un promedio de los esfuerzos actuantes que no representa la máxima resistencia, sino que es menor. Esto no sucede en los suelos de falla plástica, pues una vez alcanzada la falla, en todos los puntos de la sección crítica los esfuerzos son iguales, independientemente de cualquier concentración de la deformación tangencial; en este caso el esfuerzo promedio representa al máximo de falla.

2.4. Ensayo Triaxial

2.4.1. Introducción

El ensayo triaxial es de uso extendido en la práctica e investigaciones para el estudio de la resistencia cortante y deformabilidad de suelos. Los primeros modelos son de 1930 – 40, y deben destacarse las contribuciones por parte de A.W. Bishop en Londres durante las tres décadas siguientes.

Desde un primer momento se debe aclarar que todo este apartado, y en general toda esta memoria, dice relación con ensayos triaxiales estáticos, es decir, aquellos donde el modo de carga es monotónico. Los ensayos triaxiales dinámicos o cíclicos, es decir, aquellos donde se aplican ciclos de carga y descarga, no son tratados ni mencionados ya que se escapan del alcance de este trabajo.

En este contexto, este apartado reúne una recopilación de información bastante completa con respecto a ensayos triaxiales estáticos. Primeramente, se destacan algunas ventajas de estos ensayos con respecto a sus pares que también son utilizados para determinar y estudiar la resistencia cortante de los suelos. Acto seguido, se enlista y describe las distintas modalidades que, teóricamente, podría tener un ensayo triaxial, intentando dejar bien en claro cuáles son los más convencionales y que son ejecutados por la mayoría de los laboratorios de Mecánica de Suelos; estos son: Ensayo de Compresión Triaxial UU, Ensayo de Compresión Triaxial CIU y Ensayo de Compresión Triaxial CID. De ahí en adelante, los distintos tópicos están orientados principalmente hacia estos ensayos convencionales, salvo excepciones que son adecuadamente indicadas en cada ítem. Así, lo que sigue es su terminología y componentes necesarios para su ejecución, para luego definir la ley empírica de presión intersticial, clave en etapas no drenadas de estos ensayos. Posteriormente, son descritas conceptual y extensamente las etapas de estos ensayos, se continúa con el diagrama $p - q$, seguidamente se asocian con la Teoría de la Elasticidad y el estado crítico, para finalmente exponer el comportamiento general cualitativo aproximado.

2.4.2. Ventajas de los Ensayos Triaxiales

- Proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo – deformación unitaria del suelo, cosa que no hace, por ejemplo, el ensayo de corte directo.
- Proporciona condiciones más uniformes de esfuerzo que el ensayo de corte directo con sus concentraciones de esfuerzos a lo largo del plano de falla, el cual es libre de formarse.
- Permite establecer con un alto grado de confiabilidad condiciones no drenadas.
- Permite medir, en la mayoría de los casos, cambios volumétricos y presiones de poros durante las distintas etapas del ensayo.
- Cuenta con métodos y procedimientos que permiten la correcta saturación de probetas durante la etapa inicial del ensayo (etapa de saturación).
- Proporciona más flexibilidad en términos de trayectoria de carga, permitiendo reproducir una amplia gama de condiciones geotécnicas y geohidráulicas.

2.4.3. Modalidades del Ensayo Triaxial

Teóricamente, en el ensayo triaxial se podría variar a voluntad los esfuerzos actuantes en tres direcciones ortogonales (direcciones principales) sobre una probeta de suelo, efectuando mediciones sobre las características mecánicas en forma completa. En realidad, y buscando sencillez en su realización, en las pruebas que hoy se efectúan los esfuerzos en dos direcciones son iguales (esfuerzos principales laterales o radiales). Aun así, este ensayo posibilita un extenso repertorio de condiciones de ensayo (figura 2-19), viéndose sólo limitado por el equipo o máquina y accesorios que se dispongan.

Las probetas son usualmente cilíndricas y están sujetas a esfuerzos laterales de un fluido, generalmente agua, el cual también realiza su aporte al esfuerzo axial. Es evidente entonces que la probeta debe ser protegida, para ello es que se utiliza una membrana impermeable que la envuelve.

En general, los ensayos triaxiales pueden clasificarse en dos grandes grupos: ensayos de compresión y extensión. Los de compresión son aquellos en los que la dimensión original axial de la probeta disminuye y los de extensión, aquellos en que dicha dimensión se hace aumentar durante la prueba.

Un ensayo de compresión puede tener, evidentemente, varias modalidades de laboratorio; en efecto, la dimensión axial de la probeta se puede hacer disminuir aumentando el esfuerzo axial, por aumento de la carga transmitida por el pistón de carga axial o manteniendo constante el esfuerzo axial, pero haciendo disminuir el lateral (esto exige ajustes en la carga transmitida por el pistón para mantener el mismo esfuerzo axial) o, finalmente, aumentando el esfuerzo axial y disminuyendo el lateral simultáneamente.

Los de extensión pueden tener también varias modalidades. En la primera, la dimensión axial de la probeta se hace aumentar disminuyendo el esfuerzo axial, pero se deja constante el esfuerzo lateral; en la práctica esto se logra haciendo que el vástago ejerza una tracción sobre la probeta. En la segunda modalidad, el esfuerzo axial se mantiene constante (con los precisos ajustes con el pistón), pero se hace aumentar el esfuerzo lateral. Finalmente, en la tercera modalidad posible, se hace disminuir el esfuerzo axial, a la vez que se aumenta el lateral.

Independientemente de esta gran cantidad de condiciones de ensayo posibles, los ensayos convencionales son los de compresión, con esfuerzo lateral constante y aumento progresivo y monotónico del esfuerzo axial durante la etapa de corte, permitiendo o no el drenaje. Asimismo, la consolidación suele realizarse bajo una secuencia tensional isotrópica, es decir, la probeta es sometida a un incremento de esfuerzo axial igual al incremento de esfuerzo radial o lateral. El hecho que este tipo de ensayos sean los de más común ejecución en la práctica, se explica por el tipo de equipos triaxiales disponibles comúnmente en el mercado a valores monetarios razonables y la más probable automaticidad que se puede obtener bajo estas condiciones. Esto no implica que estas condiciones sean las más representativas del suelo en terreno. De hecho, como ya fue mencionado en el ítem 2.2.3, la secuencia tensional anisotrópica es la que mejor modelaría las condiciones de campo. Del mismo modo, en el caso de suelos que aplican empuje activo a una estructura, la secuencia tensional durante el corte se ajusta al caso de esfuerzo axial constante mientras disminuye el esfuerzo radial; si el empuje es pasivo, se ajusta también a un esfuerzo axial constante mientras aumenta el lateral.

Con respecto a las deformaciones, y por los mismos argumentos planteados en el párrafo anterior, suelen determinarse sólo globalmente. La deformación axial global es determinada indirectamente como el descenso del pistón sobre el cual reacciona el cabezal superior de la probeta, mientras que la deformación radial regularmente no es medida. Cuando se requiere determinar con alta precisión la rigidez de la probeta para bajas deformaciones, se debe medir localmente tanto la deformación lateral como axial con instrumentos que las miden directamente en la probeta. Esto implicaría la instalación de sensores especiales (“strain gages”) dentro de la cámara triaxial, lo cual encarecería el costo del equipo producto de la complejidad añadida.

Hoy en día, los equipos triaxiales son controlados por software computacionales. Esto trae ventajas respecto a equipos manuales desde el punto de vista de la automatización de ensayos. Sin embargo, estos software de control difícilmente permiten establecer condiciones distintas para las que fueron diseñados, estableciendo una limitante importante para fines investigativos.

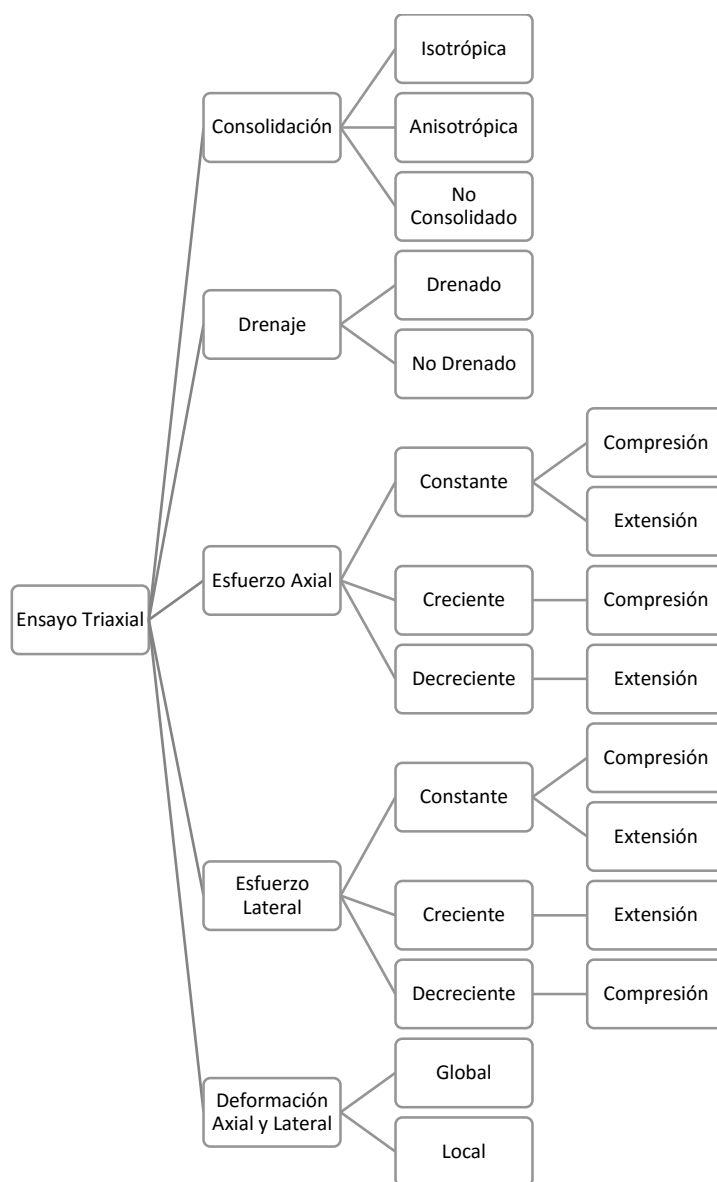


Figura 2-19: Diagrama con tipos de ensayos triaxiales dadas distintas condiciones de ensayo.

2.4.4. Tipos de Ensayos Triaxiales Convencionales

Como se acaba de explicar, independientemente de la gran cantidad de ensayos triaxiales que se podría realizar, los convencionales son los de compresión, con esfuerzo lateral constante ($\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3$) y aumento progresivo y monotónico del esfuerzo axial durante la etapa de corte. La aplicación de la carga axial en estos ensayos, al igual que la carga horizontal en ensayos de corte directo, podría ser ejecutada de los siguientes modos:

- *Controlada por esfuerzo:* Se aplican incrementos de carga hasta alcanzar la falla; cada incremento debe tener una magnitud y debe mantenerse un tiempo suficiente de tal modo de alcanzar la condición deseada (disipación de exceso de presión de poros en ensayos drenados y equilibrio de esta presión en toda la probeta en ensayos no drenados).
- *Controlada por deformación:* Se aplica una velocidad de deformación constante y se va midiendo la carga axial asociada, velocidad que debe ser lo suficientemente lenta para permitir cualquiera de las condiciones ya nombradas.

En realidad, los ensayos de compresión triaxial convencionales utilizan la modalidad de deformación controlada, ya que entrega información sobre la resistencia cortante después del peak. De hecho, las normas que los rigen especifican esta modalidad.

Los tres tipos de ensayos característicos son:

- Ensayo de Compresión Triaxial No Consolidado y No Drenado (UU) – ASTM D2850-03a.
- Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y No Drenado (CIU) – ASTM D4767-11.
- Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y Drenado (CID) – ASTM D7181-11.

2.4.4.1. Ensayo de Compresión Triaxial UU

El ensayo de compresión triaxial UU es un ensayo rápido, aplicable principalmente a suelos cohesivos y de baja permeabilidad, y que no considera etapa de saturación ni de consolidación. La carga axial es aplicada en condiciones no drenadas y sin medición de la presión de poros, esto último se explica en parte por el hecho de que la probeta puede estar en un estado de saturación parcial. Entonces, la resistencia determinada en este ensayo es aplicable a situaciones de campo donde se asume que las cargas toman lugar tan rápidamente, y/o que el suelo es tan impermeable, que no hay tiempo suficiente para que la presión de poros inducida sea disipada y para que ocurra consolidación durante este período de carga (para que ocurra drenaje), y además, las condiciones de esfuerzo sobre el terreno son similares a las del método de ensayo. Por lo tanto, los esfuerzos principales en la falla y en otros estados tensionales son determinados en términos totales, sin tener la posibilidad de expresarlos en términos efectivos. Los parámetros geotécnicos de resistencia al corte también son determinados en términos totales o no drenados (ϕ_u y c_u), siendo de particular importancia la resistencia al corte no drenada obtenida del análisis y ensayo de probetas en estado de completa saturación.

2.4.4.2. Ensayo de Compresión Triaxial CIU

El ensayo de compresión triaxial CIU es un ensayo que considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte o aplicación del esfuerzo desviatorio. En la etapa de corte no se admite el drenaje, pero si se considera la medición de la presión de poros, lo cual permite expresar los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte en términos totales o no drenados ($\sigma_1, \sigma_3, \phi_u$ y c_u) y efectivos o drenados ($\sigma'_1, \sigma'_3, \phi'$ y c'). Cabe destacar, para poder medir correctamente la presión de poros, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja para que así la presión de poros esté continuamente estabilizada a través de toda la probeta. Dicho esto, las características de corte medidas en este ensayo son aplicables a condiciones de campo donde el suelo que ha sido completamente consolidado bajo un “set” de esfuerzos, es sometido a un cambio de esfuerzos y sin tiempo para que una mayor consolidación tenga lugar (condiciones no drenadas), y además, las condiciones de esfuerzo sobre el terreno son similares a las del método de ensayo.

2.4.4.3. Ensayo de Compresión Triaxial CID

El ensayo de compresión triaxial CID es un ensayo que también considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte o aplicación del esfuerzo desviatorio. La diferencia radica en que durante la etapa de corte si se admite el drenaje, lo cual permite expresar los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte directamente en términos efectivos o drenados ($\sigma'_1, \sigma'_3, \phi'$ y c'). Al admitirse el drenaje, lo que se mide es el volumen de agua que entra o sale de la probeta, lo cual por estar ésta saturada constituye su cambio volumétrico. Ahora, cabe destacar, para que no se generen excesos de presión de poros y los esfuerzos medidos sean realmente efectivos, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja, en efecto, mucho más baja que en un ensayo de compresión triaxial CIU. Dicho esto, las características de corte medidas en este ensayo son aplicables a condiciones de campo donde el suelo que ha sido completamente consolidado bajo un “set” de esfuerzos, es sometido a un cambio de esfuerzos en condiciones drenadas y sin generar exceso de presión de poros, y además, las condiciones de esfuerzo sobre el terreno son similares a las del método de ensayo.

2.4.5. Terminología de Ensayos de Compresión Triaxial Convencionales

2.4.5.1. Esfuerzo Desviatorio

Es la diferencia entre el esfuerzo principal mayor σ_1 y el menor σ_3 durante el corte, lo cual se traduce como un incremento del esfuerzo axial por sobre el esfuerzo en estado isotrópico definido en la etapa de consolidación. Esta variable es igual tanto en términos totales como efectivos, ya que la presión de poros es la misma en todas las direcciones posibles y se anula. Esto es:

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 + u - \sigma'_3 - u = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2-12)$$

2.4.5.2. Contrapresión

Es una presión aplicada directamente al agua de poros para comprimir el aire que se encuentra en estos espacios y así posibilitar su disolución en este mismo líquido. Las principales funciones del uso de contrapresión son aumentar el porcentaje de saturación de la muestra y establecer una presión de poros inicial considerable, esto último para evitar que las grandes caídas de presión intersticial que ocurren durante el corte de suelos que se comportan como densos y fuertemente preconsolidados, puedan causar la cavitación del agua de poros.

2.4.5.3. Esfuerzo Efectivo de Consolidación

Es la diferencia entre la presión de cámara y la presión de poros al final de la consolidación (comienzo de la etapa de corte). Hay que tener en cuenta que la probeta se consolida en parte durante la saturación, por lo cual durante y al final de esta etapa también existe un esfuerzo efectivo de consolidación.

2.4.5.4. Falla

Máxima condición de esfuerzo o esfuerzo a una deformación definida para una probeta a ensayar. La falla es a menudo definida como el máximo esfuerzo desviatorio o como el esfuerzo desviatorio asociado a un 15 [%] de deformación axial, cualquiera que sea obtenido primero durante el ensayo. Este valor de deformación es arbitrario y se establece con la finalidad de fijar un criterio para tomar la falla en probetas que tienen un comportamiento plástico, o aquellas en que el esfuerzo desviatorio es constantemente creciente.

2.4.6. Componentes Generales de Equipo Para Ejecución de Ensayo de Compresión Triaxial Convencional

El equipo para realizar ensayos de compresión triaxial cuenta con una serie de dispositivos e instrumentos que permiten llevar a cabo las distintas etapas y mediciones necesarias para obtener los resultados útiles en el análisis de la resistencia cortante de un suelo. A continuación, se describe las principales componentes de este equipo y sus funciones durante los ensayos en cuestión.

2.4.6.1. Marco de Carga, Cámara Triaxial e Instrumentos Para Mediciones de Carga y Deformación

En el marco de carga, específicamente en la plataforma de carga, se instala una cámara triaxial con la probeta de suelo en su interior, la cual es cilíndrica y de dimensiones variables según lo permita el tamaño del marco y cámara esencialmente. Existe una serie de condiciones para sus

dimensiones, las cuales serán explicadas posteriormente en el ítem 2.4.8.1. No obstante, equipos para probetas de diámetros superiores a 100 [mm] no son convencionales y no están disponibles en laboratorios de ensayos rutinarios, siendo preferentemente contruidos para proyectos especiales en universidades y centros de investigación.

Mayor información sobre la confección y montaje de la probeta será entregada en los ítems 2.4.8.1 y 2.4.8.2. Por ahora, basta saber que la probeta es montada sobre la base de la cámara triaxial y envuelta con una membrana impermeable para aislarla del fluido utilizado para otorgar confinamiento isotrópico. Como ya se dijo, este fluido es preferentemente agua, ya que si se utilizara aire se debería recurrir a membranas de mayor espesor para impermeabilizar la probeta. Membranas de este tipo influirían en demasía sobre las características de resistencia de la probeta, producto de la elevada rigidez que le sería conferida.

El funcionamiento del marco de carga estará restringido por la forma en que se desee realizar el ensayo de compresión triaxial convencional. En parte esta restricción dice relación con la forma en que es aplicada la carga axial, ya sea controlada por esfuerzo o controlada por deformación, la cual se traduce en un incremento del esfuerzo axial y desviatorio.

En ensayos controlados por esfuerzo los incrementos de carga son conocidos y para aplicarlos se utiliza un sistema hidráulico, neumático o pesos muertos.

En ensayos controlados por deformación, el marco de carga puede tener dos tipos de funcionamiento, uno en que la parte superior del marco desciende a una velocidad constante, u otro en que la plataforma de carga asciende a una velocidad constante también. En cualquier caso, esta velocidad no debe desviarse en ± 1 [%] del valor seleccionado, según las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11, y en ± 5 [%], según la norma ASTM D2850-03a.

Con respecto a la cámara triaxial (figura 2-20), ésta es desmontable, con su sección superior de paredes de un acrílico transparente y muy resistente, y una tapa rígida que la atraviesa un tubo o pistón de carga axial en el centro. Este pistón se encarga de transmitir la carga axial a la probeta y a la celda o anillo de carga ubicado en la parte superior del marco de carga. El roce entre este tubo y la tapa de la cámara debe ser reducido a un mínimo de modo que no afecte tanto a la carga axial, no debiendo superar el 0,1 [%] de la carga axial en la falla, según las normas ASTM D4767-11, ASTM D7181-11 y ASTM D2850-03a. Igualmente debe considerarse una corrección a la carga axial por la acción de una fuerza inicial resultante entre el roce, empuje del agua y peso del pistón, la cual simplemente se va restando al valor de carga medido en cada instante.

La cámara también posee válvulas, conexiones, y mangueras, algunas de ellas que van directamente al cabezal superior e inferior de la probeta respectivamente. Por una de estas mangueras se mete contrapresión durante la saturación, por donde también se permite el drenaje durante la consolidación y corte, según corresponda. Otras de estas mangueras van al manómetro o transductor que mide la presión de poros, y las restantes son de flujo libre, por lo que sus válvulas deben mantenerse cerradas durante el ensayo. Entre otras conexiones de suma importancia, está aquella que permite el ingreso de la presión de cámara y también el despiche superior que se utiliza para evacuar el aire durante el llenado de la cámara con agua.

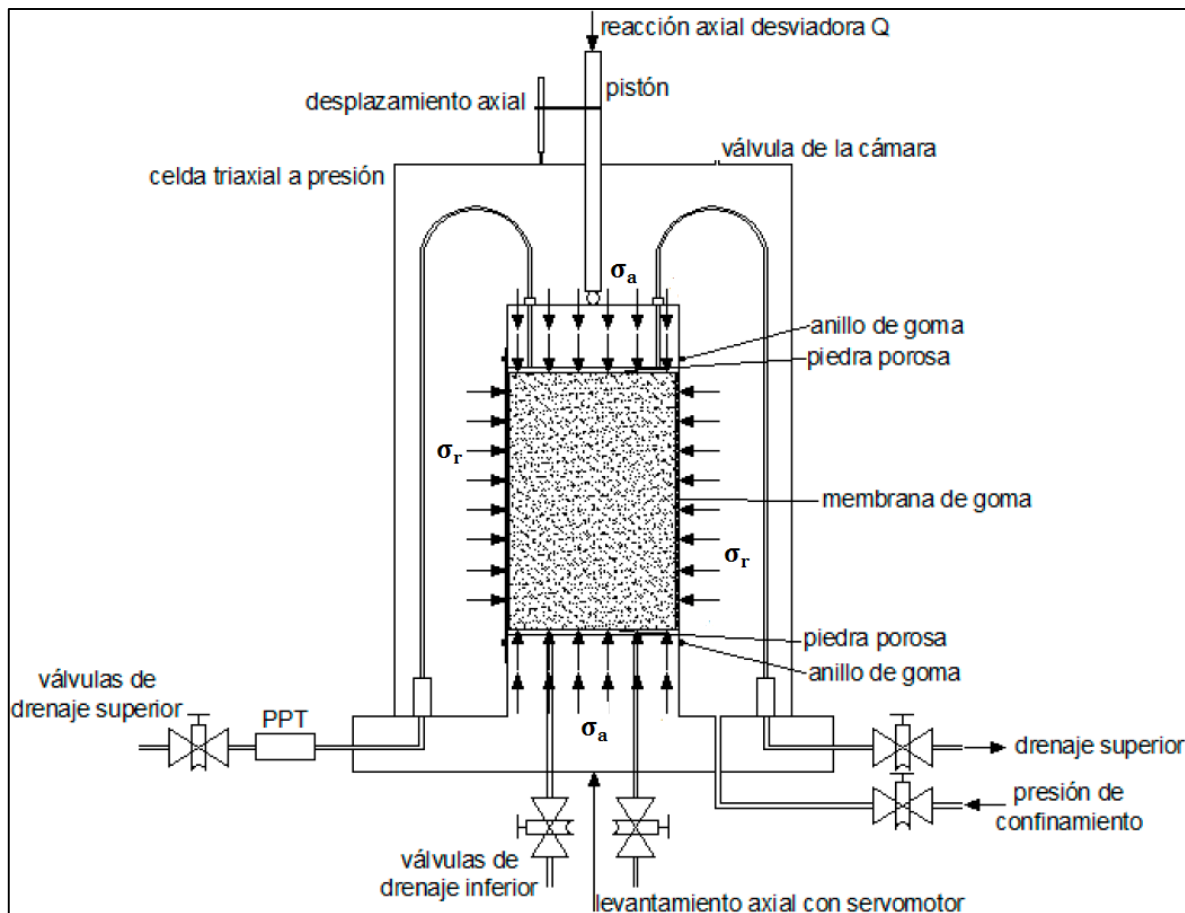


Figura 2-20: Cámara triaxial típica (Ríos, 2015).

La celda de carga más típica es un dispositivo en cuyo interior se encuentran unos sensores de deformación llamados “strain gages” que detectan los valores de deformación que la celda está resistiendo. Esta deformación es transformada a voltaje mediante un circuito “Wheatstone” proporcional, para seguidamente enviar la señal análoga al dispositivo que está conectado con la celda. En este dispositivo la señal es convertida a digital, y desde allí es enviada al software disponible en un computador, donde finalmente se transforma en carga según la calibración disponible.

En los anillos de carga, la deformación a la que se ven sometidos también es transformada a un valor de carga proporcional. En ellos, la deformación es medida preferentemente con un dial ubicado en su interior, para luego ser transformada a carga mediante la ecuación de calibración del dispositivo. De este modo, su funcionamiento en la mayoría de los casos es manual, por lo que su uso se ha visto disminuido con el paso del tiempo y con el evidente auge de equipos automáticos.

En el caso hipotético de que la celda o anillo de carga estuviera ubicado en el interior de la cámara, y tal cual como lo señalan las normas correspondientes, no sería necesario corregir la carga por la acción del roce, empuje y peso del pistón. Además, según las normas ASTM D4767-11, ASTM D7181-11 y ASTM D2850-03a, independiente del dispositivo que se utilice para medir la carga axial, este debe ser capaz de medirla con una precisión dentro del 1 [%] de la carga axial en la falla.

La deformación axial puede ser medida manualmente utilizando diales de deformación o automáticamente con dispositivos electrónicos denominados LVDT (Linear Variable Differential

Transformer) o LSCT (Linear Strain Conversion Transducer) que van finalmente traspasando datos al software computacional del equipo. Esta deformación debe ser medida con una precisión de al menos un 0,25 [%] de la altura inicial de la probeta y el dispositivo utilizado debe tener un rango de al menos 20 [%] de esta altura. En la figura 2-21, el desplazamiento vertical de la probeta corresponde al ascenso de la plataforma de carga y cámara en cuyo interior se encuentra la probeta, relativo al movimiento del pistón que reacciona sobre el cabezal superior de la probeta.

2.4.6.2. Aparato Para Medición de Cambio Volumétrico

Es deseable y necesario medir el cambio volumétrico que experimenta la probeta durante las distintas etapas de un ensayo de triaxial, ya sea durante la saturación, consolidación y/o corte. Una vez que se encuentra saturada la probeta, el cambio volumétrico que experimenta puede ser medido con bastante exactitud a través del agua que entra o sale de ésta. En probetas parcialmente saturadas no es tan así, ya que puede ocurrir un cambio de volumen por compresión del aire en los poros, sin que ocurra drenaje.

La medición del cambio volumétrico puede ser realizada utilizando una bureta graduada y conectada a la misma línea que lleva la contrapresión a la probeta. Las mediciones se realizan visualmente, lo cual puede inducir errores de lectura.

Otro dispositivo para medir el cambio de volumen en cuestión, es el que se puede apreciar en la figura 2-21. Este consiste en un cilindro que posee dos cámaras en su interior, cada una de un volumen conocido. Cuando una cámara se está llenando, la otra se está vaciando y viceversa. Este proceso acciona y posibilita el movimiento de un pistón interior, el cual a su vez es seguido por el desplazamiento de un brazo palanca sobre el cual está montado un LVDT o LSCT. Según sea la ecuación de calibración de este transductor, el movimiento del pistón es transformado a cambio volumétrico. Este sistema automático es de tipo caja negra, ya que no es posible visualizar o medir directamente el volumen de agua que entra o sale de la probeta. Sin embargo, al utilizar un transductor, el sistema es fácilmente incorporable a un software computacional para el registro automático de datos.

Existen otros aparatos para la medición automática de cambios de volumen que son un poco más sofisticados, permitiendo medir directamente la cantidad de agua que entra o sale de la probeta, sin tener que recurrir a transformaciones intermedias. Claro es su mayor costo y la imposibilidad de adaptarse a cualquier equipo de ensayos triaxiales. Independiente del aparato que se utilice para medir el cambio de volumen, éste debe ser medido con una precisión dentro de $\pm 0,05$ [%] del volumen total de la probeta, debe ser capaz de soportar la máxima contrapresión y debe tener una capacidad suficiente.

2.4.6.3. Controlador de Presión y Panel de Distribución

Antiguamente, para otorgar una presión de cámara o una contrapresión, se aplicaba aire a presión con un compresor sobre la superficie del agua contenida en un reservorio cilíndrico sellado. De este modo, el agua salía del cilindro con una determinada presión, la cual era medida con algún manómetro de forma manual. Para controlar la presión de agua al valor que se deseara, se utilizaban

válvulas reductoras para disminuir la presión de aire de entrada dado por el compresor. Este proceso tenía varios inconvenientes, entre los cuales destacaban la solubilidad del aire en el agua, pudiendo dicho aire disuelto llegar a traspasar la membrana que envolvía la probeta (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010), y variaciones de presión debidas a cambios de temperatura después de sellado el reservorio. Esas fluctuaciones de presión, aunque sea pequeñas, eran indeseables y podían llegar a influenciar los resultados del ensayo. Es por ello que se requería de un monitoreo medianamente continuo para ir corroborando que los valores de presión otorgados se mantuvieran muy cercanos o iguales al valor deseado, con lo que se debía ir realizando ajustes manuales con las válvulas reductoras antes mencionadas.

Evidentemente, un constante ajuste manual para mantener las presiones dentro de los valores deseados es un tanto impracticable y tedioso. Hoy en día, se utiliza un controlador de presión, el cual se encarga de ir regulando la presión de entrada para mantener la de salida en el valor deseado. Este sistema automático de regulación de presión, cuando está asociado a un software computacional, permite aplicar automáticamente y de forma incremental la contrapresión durante la saturación, procedimiento más que deseable para evitar pre-estresar la probeta durante este proceso.

Por otro lado, con el paso del tiempo también se ha implementado la utilización de un panel de distribución. Este es el que recibe las conexiones de aire y agua desde el compresor y red de agua potable respectivamente, para posteriormente distribuirlas a los distintos dispositivos para la ejecución de los ensayos correspondientes. A él también llega una conexión desde una bomba de vacío, la cual se utiliza para aplicar un vacío por las líneas que van hacia la probeta, o para desairear el agua de un estanque, agua empleada durante la saturación de la probeta (percolación de agua desaireada).

Para otorgar presiones y contrapresiones, en muchas máquinas para realizar ensayos triaxiales aún se utiliza el método de aplicar aire a presión sobre una superficie de agua, pero con la variante de que el aire es recibido por el panel, luego derivado al controlador de presión, el cual se encarga de regularlo, para finalmente comprimir la superficie de agua y generar la presión de agua en cuestión. No obstante, otras máquinas han establecido el uso de “bladders” para mantener aislada la interfaz agua – aire. El “bladder” es un globo de látex que se encuentra inmerso dentro de un cilindro lleno con agua, inflándose cuando recibe el aire a presión regulado por el controlador, con lo que desplaza agua a presión hacia la cámara o probeta, según corresponda.

Ambos métodos cumplen esencialmente la misma función y de forma bastante satisfactoria. Lo que si se debe destacar, es que los equipos triaxiales convencionales más simples sólo entregan de forma aproximada el agua a presión, según se necesite. Lo que ocurre en estos casos, es que el controlador de presión sólo regula la presión de entrada en base a transductores que posee en sí mismo, y no en base a transductores ubicados dentro de la cámara triaxial y en la línea que lleva el agua a presión hacia el interior de la probeta (contrapresión), que es como idealmente debería ser.

Según las normas ASTM D4767-11, ASTM D7181-11 y ASTM D2850-03a, el controlador de presión debe ser capaz de aplicar y controlar presiones dentro de ± 2 [kPa] para esfuerzos efectivos de consolidación menores que 200 [kPa] y dentro de ± 1 [%] para esfuerzos efectivos de consolidación superiores a 200 [kPa]. Además, debe ser capaz de mantener el esfuerzo efectivo de consolidación dentro de un ± 2 [%] del valor deseado.

En la figura 2-21, se presenta un esquema de un equipo triaxial convencional típico con la gran mayoría de sus componentes, destacando: marco de carga, cámara triaxial, panel de distribución, controlador de presión y aparato para medición de cambio volumétrico, entre otros.

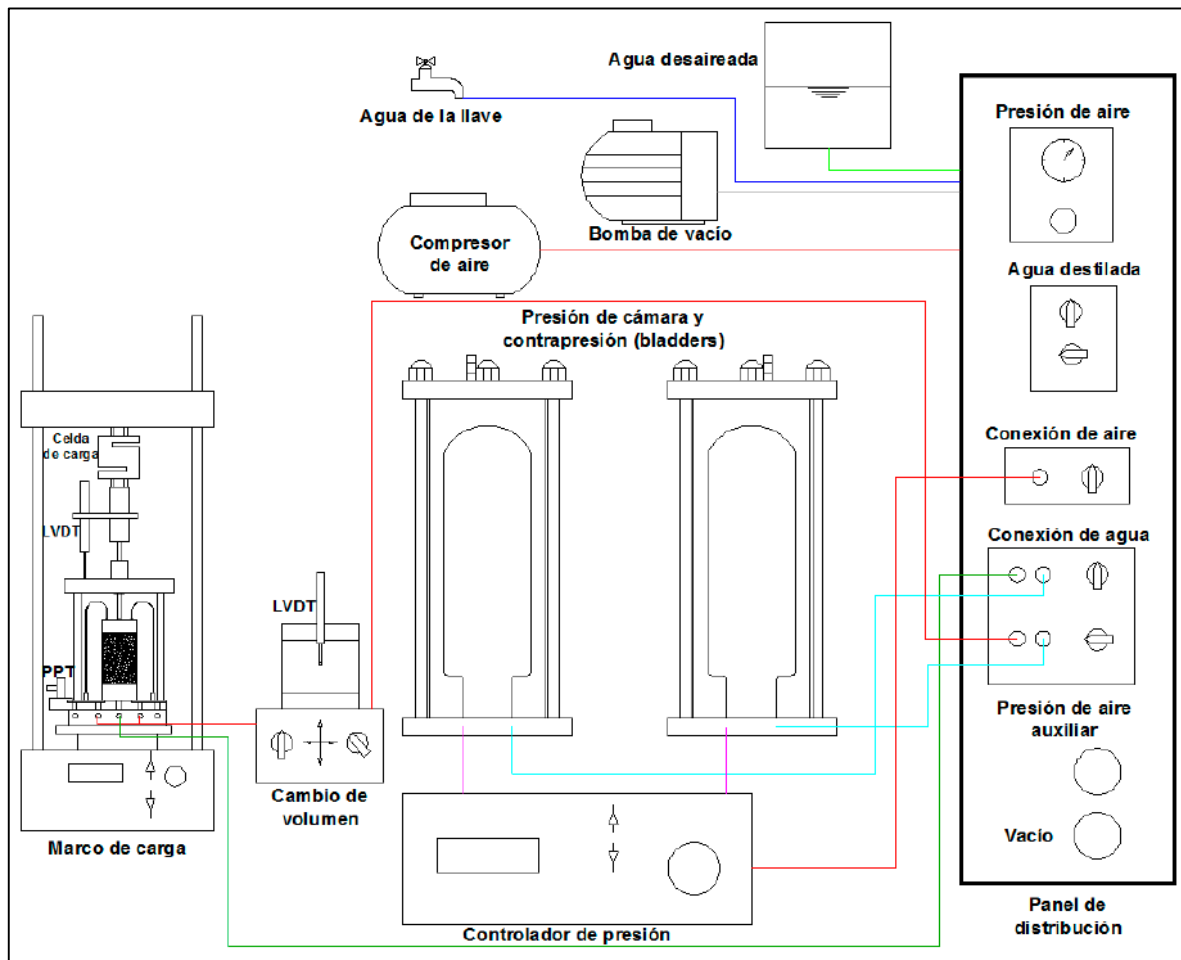


Figura 2-21: Esquema de equipo triaxial convencional (Ríos, 2015).

2.4.7. Ley Empírica de Presión Intersticial

En condiciones no drenadas y bajo la aplicación de incrementos de esfuerzos, se originan incrementos en la presión de poros, los cuales pueden ser medidos según el dispositivo que se disponga. En muchos casos y para el análisis de la resistencia al corte no drenada, es deseable poder estimar o expresar estos incrementos de presión de poros mediante la utilización de fórmulas que tienen como variables fundamentales a los incrementos de esfuerzos que los provocan. Así, a través de la ley de Hooke y para un elemento de suelo saturado (sin cambio volumétrico), es posible obtener una expresión (ecuación (2-13)) que relaciona el incremento de esfuerzo octaédrico $\Delta\sigma_{oct}$ o promedio de incrementos de esfuerzos principales con el incremento de presión de poros Δu . En el caso de un ensayo de compresión triaxial convencional, los esfuerzos principales intermedio y menor son iguales, por lo cual la expresión se reduce a la ecuación (2-14).

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} \quad (2-13)$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (2-14)$$

La forma de la ecuación (2-14) es especialmente útil, pues sus dos sumandos contienen por separado las influencias del incremento de presión de cámara y del esfuerzo desviatorio.

No obstante, el comportamiento del suelo dista mucho de ser elástico, por ejemplo producto del fenómeno de dilatancia, por lo que esta expresión no arroja estimaciones satisfactorias.

Skempton (1954) en busca de mejorar estas estimaciones, se preocupó de generalizar empíricamente la ecuación (2-14) mediante unos coeficientes $\bar{A}$ y B . Para ello, realizó el siguiente análisis:

- El esqueleto compresible de partículas de suelo se comporta como un material elástico e isotrópico y el agua que se encuentra en los poros (saturación total) muestra una relación lineal entre el cambio de volumen y los esfuerzos.
- Un incremento de los esfuerzos principales $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$ y $\Delta \sigma_3$ resulta en una disminución en el volumen del suelo $-\Delta V$ (donde V es el volumen inicial) y consecuentemente en un aumento de la presión de poros Δu . Los incrementos en los esfuerzos principales efectivos son:

$$\Delta \sigma'_1 = \Delta \sigma_1 - \Delta u \quad (2-15)$$

$$\Delta \sigma'_2 = \Delta \sigma_2 - \Delta u \quad (2-16)$$

$$\Delta \sigma'_3 = \Delta \sigma_3 - \Delta u \quad (2-17)$$

- La disminución en el volumen del suelo es entonces:

$$-\Delta V = V \frac{(1 - 2\mu)}{E} (\Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3) \quad (2-18)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad o de Young.

μ : Módulo de Poisson.

- La disminución en el volumen del suelo es casi completamente debida a la disminución en el volumen de sus vacíos. Si n es la porosidad inicial y C_w la compresibilidad del agua que se encuentra en los poros, este cambio de volumen, y mientras no ocurra drenaje, puede relacionarse con un cambio en la presión de poros a través de la expresión:

$$-\Delta V = nVC_w\Delta u \quad (2-19)$$

- Si se reemplazan las ecuaciones (2-15), (2-16) y (2-17) en la ecuación (2-18), y se iguala esta última a la ecuación (2-19), se puede obtener la siguiente expresión para estimar el incremento de presión de poros:

$$\Delta u = \frac{1}{1 + n\left(\frac{C_w}{C_c}\right)} \Delta \sigma_{oct} \quad (2-20)$$

Donde:

$$C_c = 3 \frac{(1-2\mu)}{E}, \text{ compresibilidad del esqueleto del suelo.}$$

- En el caso de un ensayo de compresión triaxial convencional, la ecuación (2-20) se reduce a:

$$\Delta u = \frac{1}{1 + n * \left(\frac{C_w}{C_c}\right)} \left(\Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right) \quad (2-21)$$

- En la ecuación (2-21), se puede distinguir claramente y por separado el aporte de un incremento en la presión de cámara y del esfuerzo desviatorio sobre el incremento de presión de poros. En este caso de saturación total, $(C_w/C_c) \rightarrow 0$ y $1/(1 + n(C_w/C_c)) \rightarrow 1$, ya que en términos comparativos la compresibilidad del esqueleto del suelo es muchísimo mayor que la del agua de poros. Por lo tanto, las ecuaciones (2-14) y (2-21) son al fin y al cabo las mismas, y se obtienen al realizar consideraciones elásticas y lineales. Sin embargo, en la práctica las características de cambio volumétrico del suelo son no lineales e inelásticas, por lo cual la superposición de ambas influencias es válida sólo bajo ciertas condiciones. De este modo, y para considerar la no linealidad e inelasticidad del suelo, Skempton propuso expresar la ecuación (2-21) en términos de dos parámetros empíricos A y B , tal como es mostrado en la siguiente expresión:

$$\Delta u = B(\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)) \quad (2-22)$$

- Con la finalidad de asociar un único parámetro a cada tipo de influencia, Skempton decidió definir un parámetro $\bar{A}$ como el producto de los parámetros A y B , quedando la ecuación (2-22) expresada de la siguiente forma:

$$\Delta u = B\Delta \sigma_3 + \bar{A}(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (2-23)$$

Los parámetros $\bar{A}$ y B de presión de poros de Skempton son ampliamente utilizados en etapas no drenadas de ensayos triaxiales convencionales. El parámetro $\bar{A}$ depende ampliamente del historial de consolidación del suelo y de la fracción de esfuerzo aplicado con respecto al de falla. Por otro lado, el parámetro B es utilizado comúnmente para verificar la condición de saturación total de una probeta bajo un incremento isotrópico de esfuerzo, ya que teóricamente bajo esta condición su valor tiende a la unidad.

2.4.8. Procedimientos Previos

2.4.8.1. Confección de Probeta

La cuidadosa preparación de probetas es vital para el éxito de los ensayos. Estas suelen ser cilíndricas y pueden ser inalteradas (talladas) o remoldeadas (reconstituidas), según lo requiera el estudio que se quiera llevar a cabo. La preparación de probetas inalteradas que provienen de bloques extraídos de calicatas requieren de un tallado meticuloso. Para ello, existen dispositivos especiales de tallado de muestras. Esta labor puede tomar varias horas, dado que manualmente se rebana el bloque o muestra con un cuchillo u hoja de sierra. Las muestras deben tener cohesión para poder realizar el tallado.

Por otro lado, la preparación de probetas remoldeadas suele realizarse mediante compactación o apisonamiento por capas de material húmedo dentro de un molde partido (wet tamping – moist tamping). Las normas ASTM D4767-11, ASTM D7181-11 y ASTM D2850-03a, establecen un mínimo de seis capas iguales, de modo tal que el suelo quede repartido homogéneamente en el molde y así evitar diferenciales de densidad que puedan influir en los resultados de los ensayos. En el caso de la preparación de probetas granulares sueltas, secas y sin cohesión, se requiere adicionalmente la incorporación de aire a succión en el molde para poder mantener la probeta sin que se desarme, debiendo colocarse la membrana tempranamente al comienzo de la confección de la probeta (se utiliza un molde especial que posibilita la confección sobre la cámara triaxial, evitando así el traslado que es prácticamente imposible en este caso). En estos casos, la tarea de confección es difícil de realizar, ya que cualquier movimiento brusco o golpe densifica la probeta o incluso la puede desarmar. Dado que suelos granulares sueltos son profusamente estudiados en Dinámica de Suelos, se han desarrollado diversos métodos de preparación de probetas para realizar ensayos triaxiales. Existen estudios que confirman que, dependiendo de la técnica de preparación de probetas, se inducen diferentes arreglos de granos (para una misma densidad), que a su vez resultan en diferentes rigideces (curvas esfuerzo – deformación), dilatación y ángulos de fricción movilizado máximo. Es por ello importante mencionar la técnica de preparación de probetas en informes o reportes de resultados de ensayos triaxiales.

La dimensión de una probeta quedará restringida por el tamaño de la cámara triaxial y marco de carga, y se verá condicionada por lo establecido en las normas ASTM D4767-11, ASTM D7181-11 y ASTM D2850-03a. Algunas de estas especificaciones son las siguientes:

- La probeta debe tener un diámetro mínimo de 33 [mm].
- La relación (altura promedio/diámetro promedio) debe encontrarse 2 y 2,5.
- Una medición individual de altura o diámetro no debe variar con respecto al promedio en más de 2 [%].
- El tamaño máximo absoluto de las partículas utilizadas para la confección de la probeta debe ser menor a 1/6 del diámetro de la probeta.

La fricción en los extremos de la probeta, cabezales superior e inferior, restringe las deformaciones laterales a estas superficies. Esto provoca una condición de esfuerzos y deformaciones no uniformes, lo cual puede influenciar las características de resistencia, características de cambio de

volumen en ensayos drenados y características de presión de poros en ensayos no drenados. De hecho, al haber esfuerzos cortantes en los extremos de la probeta, estos planos dejan de ser principales de esfuerzo, por lo que es necesario controlar esta situación a través del manejo de las dimensiones de la probeta, ya que invalida el típico análisis realizado con círculos de Mohr. Según Bishop y Henkel (1962) un rango entre 1,5 y 2,5 para la relación (altura promedio/diámetro promedio) es usualmente satisfactorio para hacer insignificante la influencia sobre las características de resistencia, produciéndose al menos un segmento central de probeta de condiciones uniformes (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2010), donde los esfuerzos aplicados si se comportan como principales.

2.4.8.2. Montaje de Probeta

Este procedimiento se refiere a todos los pasos necesarios que deben seguirse para ubicar la probeta en la cámara triaxial y dejarla lista para ser ensayada. En el caso de un ensayo de compresión triaxial UU, la probeta al ser ensayada no se le permite el drenaje y por ende modificación de su humedad inicial en ninguna de sus etapas. Por tanto, no es necesaria la utilización de piedras porosas, discos y tiras de papel filtro, ni tampoco cumplen función alguna las mangueras o líneas que van directamente hacia la probeta. Sólo es necesario que la probeta quede bien centrada en la cámara triaxial con respecto al pistón de carga axial, la utilización de cabezales y discos de acrílico e impermeables en los extremos de la probeta, la respectiva membrana, y o-rings y grasa para prevenir la entrada del agua de la cámara hacia la probeta.

En el caso de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, es totalmente similar el montaje, salvo distinciones que dicen relación con que en ellos si se permite el drenaje (excepto durante la etapa de corte en el ensayo de compresión triaxial CIU). En estos ensayos se utilizan discos porosos, discos de papel filtro y opcionalmente tiras de papel filtro. Estos implementos pueden utilizarse inicialmente húmedos o secos, pero preferiblemente en estado seco cuando el suelo es potencialmente hinchable. Los discos porosos se utilizan para distribuir homogéneamente el agua en la tapa y base de la probeta respectivamente. Entre ellos y la probeta se ubican discos de papel filtro que cumplen la función de proteger los discos porosos, evitando que se colmaten con partículas de suelo. Las tiras de papel filtro, emplazadas alrededor de la probeta y bajo la membrana, son altamente recomendables, sobre todo en suelos de muy baja permeabilidad; mejoran el drenaje durante las distintas etapas de los ensayos, facilitan el proceso de saturación y aceleran la consolidación e igualación de la presión de poros a través de la probeta (Bishop y Henkel, 1962). Las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 especifican que estas tiras no deben cubrir más de un 50 [%] del perímetro total de la probeta, ya que podría llegar a ser excesiva su influencia sobre la resistencia.

2.4.8.3. Otros

Otros procedimientos previos no son tan generales, ya que están relacionados con los componentes, tipo de equipo triaxial y forma en que este opera. Por lo tanto, en este apartado no hay más detalles sobre estos, y sólo resta mencionar el llenado de la cámara triaxial, lo cual es bastante obvio y que idealmente debería ser con agua desaireada.

2.4.9. Saturación

Esta es considerada la primera etapa de un ensayo de compresión triaxial convencional, específicamente de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID. Es necesario saturar completamente la probeta para poder medir correctamente durante el corte la variación en la presión de poros en ensayos no drenados y el cambio volumétrico en ensayos drenados. Asimismo y durante la consolidación, para obtener curvas que relacionan el cambio o deformación volumétrica con el tiempo más “suaves” y sin presentar cambios muy bruscos, la probeta ya debe encontrarse saturada al comienzo de esta etapa. Esto posibilita una interpretación correcta y la obtención de parámetros realmente confiables para la obtención de la velocidad de deformación a utilizarse durante el corte.

Es necesario tener en cuenta que durante el proceso de saturación debe evitarse pre-estresar (preconsolidar) la probeta, esto es producir esfuerzos efectivos mayores que el que se tendría al final de la consolidación. Esto es especialmente importante en suelos cohesivos, que son los que guardan un historial de consolidación, pero se opta por hacerlo una regla general para todos los tipos de suelos, incluidos los granulares.

En general, la saturación puede dividirse en tres sub-etapas: circulación de CO₂, percolación de agua desaireada y aplicación de contrapresión.

2.4.9.1. Circulación de CO₂

Esta sub-etapa no es contemplada en las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11, pero es altamente recomendable, ya que puede llegar a disminuir considerablemente el tiempo y nivel de contrapresión necesarios para alcanzar la saturación total, dada la mayor solubilidad que presenta el CO₂ con respecto al aire. La idea consiste, con las válvulas de salida abiertas, en hacer circular CO₂ a través de la probeta para ir empujando y reemplazando el aire que se encuentra en los poros. Un flujo de CO₂ que produzca un burbujeo constante de tres a cuatro burbujas por segundo se ha visto satisfactorio en términos de no producir grandes alteraciones en la estructura de la probeta. Aun así, es necesario establecer una pequeña presión de cámara con la finalidad de darle algo de confinamiento a la probeta, produciendo un cierto esfuerzo efectivo en ella para que ésta no se desarme durante el proceso. Esta presión de cámara debe ser lo suficientemente pequeña, de modo tal que no se pre-estrese la probeta.

2.4.9.2. Percolación de Agua Desaireada

Bajo una pequeña presión de cámara y con las válvulas de salida abiertas, se hace percolar agua desaireada a través de la probeta. En esta modalidad la circulación de agua desaireada se explica por una diferencia de cota entre la superficie del estanque de agua desaireada y las líneas de salida en la cámara triaxial. Generalmente, primero se hace circular agua en la zona inferior de la probeta, luego desde abajo hacia arriba, para finalmente hacer circular agua sólo en la parte superior. Esta técnica busca saturar las zonas perimetrales, y el avance homogéneo del frente de saturación desde abajo hacia arriba busca conducir el aire y CO₂ al exterior de la probeta. Durante este proceso se busca

saturar en la mayor cantidad posible el sistema, por ejemplo las líneas o mangueras que salen de la probeta, entre ellas las que van al transductor o manómetro que mide la presión de poros.

Claramente, la magnitud de la presión de cámara utilizada debe ser pequeña para no pre-estresar la probeta, pero la suficiente para impedir su hinchamiento.

Cabe destacar, en suelos cohesivos y/o muy impermeables es muy difícil percolar agua desaireada desde abajo hacia arriba. De hecho, en este tipo de suelos esto puede tomar varios días o incluso nunca concretarse. En estos casos es recomendable omitir este procedimiento, sólo manteniendo la circulación de agua por la zona inferior y superior de la probeta.

Por otro lado, en suelos muy permeables y sueltos puede ocurrir que la saturación total se alcance sólo percolando agua a través de la probeta, sin tener la necesidad de aplicar contrapresión.

También, se debe destacar que existen modificaciones y alternativas a este procedimiento de percolación de agua desaireada, que son regularmente utilizadas por distintos laboratorios de Mecánica de Suelos. Una de ellas es la percolación de agua desaireada bajo un pequeño vacío en vez de utilizar una pequeña presión de cámara, donde este es el encargado de producir cierto esfuerzo efectivo en la probeta con la finalidad de darle algo de firmeza y resistencia durante el paso del agua.

Al final de la etapa de percolación de agua desaireada, se debe verificar el grado de saturación de la probeta mediante la ejecución de un B-Test o medición del parámetro B de presión de poros de Skempton. Para fines prácticos, este parámetro puede definirse como:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (2-24)$$

$\Delta \sigma_3$ es un incremento isotrópico, y dentro de lo posible pequeño, de la presión de cámara, y Δu es el cambio resultante de presión de poros medido bajo condiciones no drenadas. Un valor teórico de $B = 1$ indica saturación total, pero se sabe que en la práctica este es difícilmente obtenible dado el nivel de precisión con que deberían registrarse las presiones de poros, entre otros aspectos. Además, el grado de saturación S_r no sigue una relación lineal con respecto al valor del parámetro B de presión de poros de Skempton, sino este se ve influenciado por otras variables como la presión absoluta del fluido llamada contrapresión σ_B (igual a 100 [kPa] cuando el agua se encuentra a presión atmosférica), la porosidad n del suelo y la compresibilidad de su esqueleto C_c . La ecuación (2-27) demuestra este postulado, siendo derivada a partir de la expresión teórica para el parámetro B (ecuación (2-25)) y de la ecuación (2-26) (Bardet and Sayed, 1993) para la compresibilidad del fluido C_f , que es principalmente agua, pero con gas.

$$B = \frac{1}{1 + n * \left(\frac{C_f}{C_c} \right)} \quad (2-25)$$

$$C_f = C_w + \frac{1 - S_r}{\sigma_B} \quad (2-26)$$

$$S_r = 1 - \frac{\sigma_B C_c}{n} \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \quad (2-27)$$

Donde:

C_w : Compresibilidad del agua, igual a 5/11 [1/GPa].

El análisis de la expresión (2-27) indica que resulta más difícil la saturación en suelos con alta compresibilidad. Por ejemplo, un valor de $B = 0,95$ se puede lograr en una arcilla preconsolidada (rígida), llegando a una saturación de 99,8 [%] si $n = 50$ [%], $C_s = 0,05$ [1/MPa] y $\sigma_B = 300$ [kPa]. En cambio, en una arcilla normalmente consolidada con $C_s = 0,5$ [1/MPa] se logra una saturación de 98,8 [%], si n y σ_B tienen los mismos valores.

Las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 establecen un valor de $B \geq 0,95$ para dar por concluida la etapa de saturación, aunque en la práctica para suelos granulares es recomendable un valor de $B \geq 0,98$ (Villalobos, 2014). Estas normas establecen el incremento de presión de cámara $\Delta\sigma_3$ comúnmente en un valor de 70 [kPa], pero es deseable la utilización de valores menores para evitar que la probeta se consolide en condiciones parcialmente saturadas.

2.4.9.3. Aplicación de Contrapresión

En esta sub-etapa se deben aplicar incrementos de contrapresión hasta alcanzar un valor final que permita disolver todo el gas presente en los poros y por ende posibilite la saturación de la probeta. La contrapresión es aplicada de este modo para no pre-estresar la probeta, lo cual si ocurre alteraría los resultados finales del ensayo. La idea es aumentar simultáneamente la presión de cámara y contrapresión en la misma magnitud, manteniendo siempre constante la diferencia entre ambas.

Donaghe y Townsend (1979) analizaron los efectos de las técnicas de saturación mediante la aplicación de contrapresión. Para ello, replicaron diversos ensayos de compresión triaxial CIU en una arcilla de alta plasticidad (CH) y limo de baja plasticidad (ML). Las conclusiones obtenidas se resumen en el siguiente postulado: “Durante la saturación, para evitar pre-estresar la probeta, no se deben producir/inducir esfuerzos efectivos mayores que el esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte”. Es decir, el mismo principio que se ha venido pregonando a los largo de todo el ítem 2.4.9. Para cumplir este postulado, se pueden proponer las siguientes medidas:

- La diferencia entre la presión de cámara y contrapresión durante la sub-etapa de aplicación de contrapresión por ningún motivo debe superar al esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte. Esto se explica porque la probeta durante y al final de esta sub-etapa se consolida bajo esta diferencia, es decir, se manifiesta como un esfuerzo efectivo de consolidación.
- La diferencia entre la presión de cámara y contrapresión durante la sub-etapa de aplicación de contrapresión no debe superar los 35 [kPa]. Esta medida no es estrictamente necesaria, pero es recomendable para dar cumplimiento a las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11.
- Los incrementos de contrapresión no deben superar al esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte. Aun así, en suelos cohesivos y/o muy impermeables igualmente se podría producir un leve pre-estrés durante las primeras fases de la aplicación de contrapresión.

Para asegurarse de que esto no ocurra, la elección de los incrementos de contrapresión debe realizarse en conjunto con la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión, debiéndose cumplir:

$$\begin{aligned} & (\text{presión de cámara} - \text{contrapresión})_{\text{durante aplicación de contrapresión}} \\ & + \text{incremento de contrapresión} \\ & < \text{esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte} \end{aligned} \quad (2-28)$$

Las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 establecen que cada incremento de contrapresión puede oscilar entre 35 [kPa] y 140 [kPa], sin embargo un incremento menor puede utilizarse para cumplir las medidas recién mencionadas.

Otro punto importante del mecanismo de aplicación de contrapresión es el tiempo que se debe esperar entre cada incremento. Cada incremento debe mantenerse hasta que la presión de poros se estabilice a través de toda la probeta, es decir, que la presión de poros en toda la probeta sea igual a la contrapresión total aplicada hasta ese momento. Cuando esto ocurre, se puede afirmar que la probeta se encuentra consolidada bajo ese esfuerzo efectivo que es igual a la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión. Por lo tanto, el tiempo de espera entre cada incremento dependerá principalmente del tipo suelo y de su permeabilidad, siendo cada vez menor a medida que la probeta avanza en su saturación.

Luego de cada incremento de contrapresión, y una vez estabilizada la presión de poros en toda la probeta, puede realizarse un B-Test o aplicarse un nuevo incremento hasta alcanzar la saturación prácticamente absoluta.

2.4.10. Consolidación

Segunda etapa de los ensayos de compresión triaxial convencionales CIU y CID. Su principal función es representar el nivel de tensiones iniciales del suelo en terreno, estableciéndose en estos casos bajo una secuencia tensional isotrópica. Para el caso isotrópico, la contrapresión se mantiene constante mientras se incrementa la presión de cámara, hasta alcanzar el esfuerzo de consolidación deseado. Este esfuerzo de consolidación genera un exceso de presión de poros, por lo cual y una vez alcanzado, se abren las válvulas de drenaje para que el espécimen consolide bajo él. Durante la consolidación, la probeta va disipando dicho exceso de presión de poros, de forma tal que van aumentando sus esfuerzos efectivos, llegando a un punto final en que la única presión de poros presente y legible es la contrapresión establecida en un comienzo. Se determina entonces el cambio volumétrico por medio del volumen de agua que fluye (sale) de la probeta, a través de cualquiera de los aparatos mencionados en el ítem 2.4.6.2. Tal cual fue explicado en el ítem 2.2.3.3, con los datos de cambio volumétrico medidos y registrados para distintos instantes de tiempo, se puede construir y analizar gráficas de deformación o variación volumétrica versus tiempo, con el fin de obtener de parámetros útiles (t_{90} y t_{50}) a ser utilizados en el cálculo de la velocidad de deformación para el proceso de corte.

Con respecto al asentamiento vertical que sufre una probeta durante la consolidación isotrópica en un ensayo de compresión triaxial convencional, rara vez se determina para cada instante de tiempo, siendo más que nada necesario determinar el asentamiento y cambio volumétrico total que

sufre la probeta desde el comienzo del ensayo hasta el final de la consolidación. Con estos datos pueden obtenerse la altura y área promedio de la probeta al comienzo de la etapa de corte, indispensables para realizar cálculos confiables durante esta etapa.

Durante la consolidación isotrópica convencional se produce una leve expansión radial, la cual usualmente tampoco se determina. El ensayo de consolidación realizado en un equipo edométrico evita esta situación, impidiendo la deformación radial ϵ_r de la muestra. Esta consolidación, como ya fue mencionado en el ítem 2.2.3, es del tipo anisotrópica, donde se sigue una trayectoria K_0 de tensiones. En el caso de ensayos triaxiales, la consolidación anisotrópica queda restringida a ensayos no convencionales y más que nada con fines investigativos. Esto se explica por el mayor trabajo que supone realizar este tipo de consolidación, teniendo que ir regulándose los esfuerzos axiales σ_a y radiales σ_r para que ϵ_r se mantenga nula, con el debido cuidado de mantener constante su relación en $K_0 = \sigma'_r/\sigma'_a$ hasta alcanzar los esfuerzos efectivos deseados.

Finalmente, la preconsolidación isotrópica de suelos cohesivos en laboratorio no es parte de un ensayo de compresión triaxial convencional. Sin embargo, y como dato adicional, ésta se logra consolidando hasta un cierto esfuerzo efectivo de consolidación y luego descargando y permitiendo que la probeta se expanda (absorba agua) hasta alcanzar el esfuerzo efectivo de consolidación final y razón de preconsolidación (OCR) deseados.

2.4.11. Corte o Aplicación de Esfuerzo Desviatorio

Esta es la última etapa de un ensayo triaxial, y en el caso de uno de compresión triaxial convencional, se lleva a falla la probeta a través del aumento de su esfuerzo axial por sobre el isotrópico definido durante la consolidación y que se mantiene constante como esfuerzo total radial o lateral. De este modo, y mediante la aplicación controlada de una carga con el pistón de carga axial, la probeta se va sometiendo a distintos estados tensionales, alcanzando la falla y de preferencia posteriormente el estado crítico.

Esta es la única etapa común en todos los ensayos de compresión triaxial convencionales, variando solamente en las condiciones bajo las cuales es aplicado el esfuerzo desviatorio y que determinan la velocidad de deformación a utilizar. Así, el esfuerzo desviatorio puede ser aplicado en condiciones drenadas, donde se mide paralelamente el cambio volumétrico durante el corte, o en condiciones no drenadas, donde se puede medir o no la presión de poros según sea el ensayo que se quiera llevar a cabo.

2.4.11.1. Velocidad de Carga

Tal como se informó en el ítem 2.4.4, en los ensayos de compresión triaxial convencionales la carga axial es aplicada a una velocidad constante, velocidad que depende netamente del tipo de ensayo que se realice.

Ensayo de Compresión Triaxial No Consolidado y No Drenado (UU)

En este ensayo no drenado el esfuerzo desviatorio es aplicado rápidamente, ya que no se contempla de forma paralela la medición de presión de poros. Por lo tanto, la velocidad de deformación queda principalmente determinada por la capacidad del laboratorista de registrar manualmente datos de carga, esto en el caso que la máquina triaxial no tenga un funcionamiento del tipo automático. Además, en la norma ASTM D2850-03a se establece una diferenciación entre la velocidad propuesta para cortar materiales de comportamiento frágil y plástico. Para materiales frágiles la velocidad propuesta es menor, ya que en ellos la falla se produce claramente acompañada de un peak en su curva de resistencia, necesitándose por ende más tiempo para poder realizar más lecturas en la cercanía de este punto. Así, la norma en cuestión establece, casi recomendativamente, las siguientes velocidades de deformación para materiales que fallan tentativamente entre un 3 y 6 [%] de deformación axial unitaria:

$$\text{En materiales plásticos:} \quad \dot{\epsilon} = 1,0 \left[\frac{\%}{\text{min}} \right] \quad (2-29)$$

$$\text{En materiales frágiles:} \quad \dot{\epsilon} = 0,3 \left[\frac{\%}{\text{min}} \right] \quad (2-30)$$

Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y No Drenado (CIU)

Este ensayo no drenado si contempla la medición paralela de la presión de poros en cada instante, teniendo que por tanto utilizarse una velocidad de deformación suficientemente lenta que permita la continua estabilización de la presión de poros a través de toda la probeta. La norma ASTM D4767-11 propone las siguientes expresiones para calcular la velocidad límite o máxima que podría utilizarse para cortar la probeta bajo estas condiciones:

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{10t_{50}} \quad (2-31)$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{10t_{50}} \quad (2-32)$$

Donde:

ϵ_{af} : Deformación axial unitaria tentativa en la falla, [%].

t_{50} : Tiempo necesario para alcanzar el 50 [%] de la consolidación primaria, ítem 2.2.3.3.

Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y Drenado (CID)

Este ensayo constituye ser el caso más desfavorable, donde la carga debe aplicarse lentamente posibilitando la completa y continua disipación del exceso de presión de poros a través del drenaje y en cada instante. Por lo tanto, los esfuerzos medidos y calculados son directamente

efectivos. La norma ASTM D7181-11 propone las siguientes expresiones para calcular la velocidad límite o máxima que podría utilizarse para cortar la probeta bajo estas condiciones:

Con tiras o jaula de papel filtro:

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{16t_{90}} \quad (2-33)$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{16t_{90}} \quad (2-34)$$

Sin tiras o jaula de papel filtro:

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{10t_{90}} \quad (2-35)$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{10t_{90}} \quad (2-36)$$

Donde:

t_{90} : Tiempo necesario para alcanzar el 90 [%] de la consolidación primaria, ítem 2.2.3.3.

La velocidad de carga en ensayos de compresión triaxial CID es aproximadamente diez veces más lenta que en ensayos de compresión triaxial CIU.

2.4.11.2. Consideraciones Sobre Cálculos

Información más detallada en relación a las fórmulas a ser utilizadas para calcular las distintas variables involucradas en ensayos de compresión triaxial convencionales, específicamente los de compresión triaxial CIU y CID, es presentada en el ítem 3.5.4 de esta memoria. Por ahora sólo se explicará algunas consideraciones que realizan las normas respectivas y que influyen directamente sobre las fórmulas que allí se presentan.

Altura, Área y Volumen de la Probeta al Comienzo de la Etapa de Corte

Es fundamental para un correcto cálculo e interpretación de los datos y resultados de ensayos de compresión triaxial convencionales, obtener confiablemente la altura, área y volumen de la probeta al comienzo de la etapa de corte.

En el ensayo de compresión triaxial UU, al no considerar las etapas de saturación y consolidación, se supone que la altura, área y volumen de la probeta al comienzo del corte, son datos de confección y que cualquier alteración que pudiera experimentar la probeta antes de cortarla es mínima y despreciable o así debería serlo en pos de ejecutar el ensayo correctamente.

Con respecto a los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, estos si consideran las etapas de saturación y consolidación, donde evidentemente la probeta sufrirá modificaciones a su altura, área

y volumen iniciales. Es importante por tanto determinar estas variaciones para así poder corregir los valores iniciales de confección y obtener valores representativos promedio al comienzo de la etapa de corte. La variación de altura se calcula como el descenso/ascenso del pistón de carga axial por sobre el cabezal superior de la probeta. La variación de volumen cuenta con dos componentes, una durante la saturación y otra durante la consolidación. La variación de volumen durante la saturación, en la mayoría de los casos, no es posible determinarla de forma directa. Es por ello que usualmente se utiliza una expresión (ecuación (3-4)) que contiene parámetros iniciales de la probeta y la variación de altura que ésta experimenta durante la saturación. La otra componente de cambio volumétrico se obtiene directamente de la diferencia de valores que marque la bureta o aparato de medición de cambio volumétrico respectivo.

Área de la Probeta Durante la Etapa de Corte

A medida que es aplicado el esfuerzo desviatorio, la probeta va sufriendo deformaciones y cambios de volumen que van modificando en cada instante el área promedio que esta posee. Las normas ASTM D2850-03a, ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 proponen fórmulas para ir calculando el área corregida para cada nivel de deformación, todo esto suponiendo que la probeta se deforma como un cilindro recto, lo cual claramente no es del todo cierto dada la fricción que se presenta en los extremos de la probeta. A continuación se presenta esta deducción:

- Se sabe que A_c , H_c y V_c denotan el área, altura y volumen de la probeta al comienzo de la etapa de corte. Entonces, si A es el área promedio después de un cambio ΔH_ϵ de altura y ΔV_ϵ de volumen, se sigue que:

$$A(H_c + \Delta H_\epsilon) = V_c + \Delta V_\epsilon \quad (2-37)$$

$$A = \frac{V_c + \Delta V_\epsilon}{H_c + \Delta H_\epsilon} \quad (2-38)$$

- La ecuación (2-38) es la presentada en la norma ASTM D7181-11 para el ensayo de compresión triaxial CID, donde ΔV_ϵ es positivo si la probeta ha aumentado de volumen durante el corte y negativo en caso contrario. Con respecto a ΔH_ϵ , este es siempre negativo, ya que la probeta siempre disminuye su altura en esta etapa en los ensayos de compresión. Por ello suele realizarse el siguiente arreglo:

$$A = \frac{V_c + \Delta V_\epsilon}{H_c - |\Delta H_\epsilon|} \quad (2-39)$$

- Considerando que la deformación axial unitaria $\epsilon_1 = \frac{|\Delta H_\epsilon|}{H_c}$ y que $A_c = \frac{V_c}{H_c}$, la ecuación (2-39) también puede ser escrita del siguiente modo:

$$A = \frac{1 + \frac{\Delta V_\epsilon}{V_c}}{1 - \frac{|\Delta H_\epsilon|}{H_c}} * \frac{V_c}{H_c} \quad (2-40)$$

$$A = \frac{A_c}{1 - \epsilon_1} \left(1 + \frac{\Delta V_\epsilon}{V_c} \right) \quad (2-41)$$

- En los ensayos de compresión triaxial UU y CIU, dado que no se admite el drenaje, se asume que la probeta no cambia de volumen durante el corte. En estricto rigor, esto no es cierto en ninguno de los dos. En el ensayo de compresión triaxial CIU, a pesar de encontrarse saturada la probeta, se producen mínimos y despreciables cambios de volumen producto de la compresión – expansión del agua intersticial y por deformaciones de las partículas de suelo. La compresión – expansión del agua de poros es ínfima, ya que la compresibilidad del agua es bajísima, y su inverso, el módulo de compresibilidad del orden de 2,2 [GPa]. En el ensayo de compresión triaxial UU ocurre lo mismo, pero además dado que en éste las probetas pueden estar en un estado de saturación parcial, pueden adicionársele cambios de volumen mucho más importantes producto de la compresión del aire que se encuentra en los poros. A pesar de lo expuesto, las normas de estos ensayos igualmente asumen cambio volumétrico nulo, con lo que la ecuación (2-41) se reduce a:

$$A = \frac{A_c}{1 - \epsilon_1} \quad (2-42)$$

Esfuerzos Totales en Ensayo de Compresión Triaxial CIU y CID

Según la norma ASTM D4767-11, los esfuerzos totales se calculan sustrayendo la contrapresión o presión de poros al comienzo de la etapa de corte, es decir, en estricto rigor no son totales. Esto está estipulado de este modo, ya que si se ensayan varias probetas bajo distintas contrapresiones, es la única forma de poder realizar un análisis y obtener parámetros geotécnicos en términos “totales”.

2.4.12. Diagrama p-q

Parámetros de esfuerzos compuestos tales como el esfuerzo desviatorio y el esfuerzo efectivo promedio son ampliamente utilizados en Mecánica de Suelos. Dos sets de estos parámetros son comúnmente usados, uno ha sido popularizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y el otro por la Universidad de Cambridge. Es de bastante común práctica tender a confundir estos parámetros y asignarles la misma notación, q y p' , a ambos grupos, ignorando que son numéricamente distintos. En efecto, un grupo constituye ser una notación bidimensional y el otro una tridimensional, pero dadas las condiciones axial simétricas típicas de un ensayo triaxial ($\sigma_2 = \sigma_3$), terminan siendo igual de útiles. Conceptualmente, los parámetros q (Cambridge) y t (MIT) son un esfuerzo desviatorio y están relacionados con la desangulación o cambio de forma, mientras que los

parámetros p' (Cambridge) y s' (MIT) son un esfuerzo efectivo medio que está relacionado con el cambio volumétrico.

En definitivas cuentas, en el caso de un ensayo triaxial, donde los esfuerzos son principales y dos de ellos son iguales, estos parámetros se definen del siguiente modo:

Cambridge:

$$p' = \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_r}{3} \quad (2-43)$$

$$q = q' = \sigma_a - \sigma_r = \sigma'_a - \sigma'_r \quad (2-44)$$

MIT:

$$s' = \frac{\sigma'_a + \sigma'_r}{2} \quad (2-45)$$

$$t = t' = \frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} = \frac{\sigma'_a - \sigma'_r}{2} \quad (2-46)$$

Donde:

σ'_a : Esfuerzo axial efectivo.

σ'_r : Esfuerzo radial efectivo.

Estos parámetros son definidos en términos de esfuerzos axiales y radiales, ya que ello permite realizar una distinción entre ensayos de compresión y extensión triaxial, donde las direcciones de los esfuerzos principales mayor y menor se intercambian. De este modo, en un ensayo de compresión triaxial $\sigma'_a = \sigma'_1$ y $\sigma'_r = \sigma'_3$ y viceversa en extensión. Esto implica que el parámetro q es positivo en ensayos de compresión y negativo en los de extensión.

Una de las aplicaciones de utilizar estos parámetros de esfuerzos compuestos es que permiten expresar el criterio de falla de Mohr – Coulomb (ecuación (2-10)) en los planos coordenados $q - p'$ y $t - s'$. Para los casos de compresión y extensión triaxial las siguientes expresiones modelan esta recta en estos planos:

Cambridge:

$$\text{Compresión} \rightarrow q = p' \left(\frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \right) + c' \left(\frac{6 \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} \right) \quad (2-47)$$

$$\text{Extensión} \rightarrow q = -p' \left(\frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \right) - c' \left(\frac{6 \cos \phi'}{3 + \sin \phi'} \right) \quad (2-48)$$

MIT:

$$\text{Compresión} \rightarrow t = s' \sin \phi' + c' \cos \phi' \quad (2-49)$$

$$\text{Extensión} \rightarrow t = -s' \sin \phi' - c' \cos \phi' \quad (2-50)$$

La figura 2-22 muestra graficadas estas líneas rectas en los planos $q - p'$ y $t - s'$, indicando su pendiente e intersección con la ordenada.

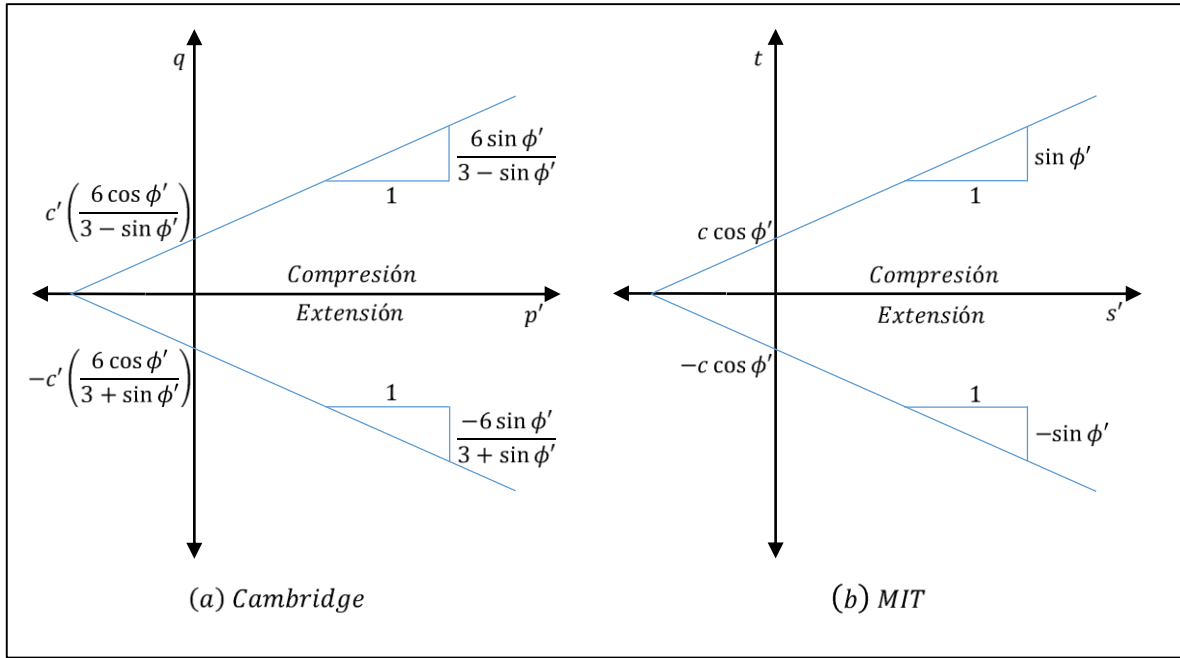


Figura 2-22: Criterio de falla de Mohr – Coulomb para ensayos triaxiales de compresión y extensión en el plano: (a) $q - p'$ y (b) $t - s'$.

2.4.12.1. Trayectoria de Tensiones

En el típico plano coordenado $\tau - \sigma$ un círculo de Mohr representa un estado tensional. Como ya se puede prever, la gran utilidad de los parámetros de esfuerzos compuestos es que permiten representar, en los planos coordenados $q - p$ y $t - s$, un estado tensional mediante un único punto. Por ende, si se grafica toda la secuencia tensional que se reproduce durante un ensayo triaxial, se puede obtener lo que se denomina una trayectoria de tensiones. Ahora, dependiendo si los parámetros de esfuerzos compuestos son calculados con esfuerzos totales o efectivos, será la forma y denominación que tenga dicha trayectoria de tensiones. Cuando se utilizan esfuerzos totales se denomina trayectoria de tensiones totales (TTT) y cuando los esfuerzos empleados son efectivos se denomina trayectoria de tensiones efectivas (TTE). En ensayos drenados, al no producirse exceso de presión de poros, ambas trayectorias tienen la misma forma y sólo difieren en su abscisa en un valor constante si es que fue utilizada contrapresión para alcanzar la saturación total (figura 2-24(a)). En cambio, en ensayos no drenados sí se produce exceso (positivo o negativo) de presión de poros durante el corte y éste es el responsable de que estas trayectorias sean totalmente distintas y que la

TTE pueda tomar formas curvas (figura 2-24(b), (c) y (d)). Cabe destacar, ambas trayectorias sólo difieren en la abscisa, de modo que $p' = p - u$ y $s' = s - u$, mientras que los parámetros compuestos q y t al ser un esfuerzo desviatorio son invariantes ante presiones de poros.

Para mayor claridad y simpleza en explicaciones posteriores, las ecuaciones (2-43) y (2-45) se pueden escribir equivalentemente de los siguientes modos:

Cambridge:

$$p' = \sigma_r' + \frac{q}{3} \quad (2-51)$$

$$p' = \sigma_a' - \frac{2q}{3} \quad (2-52)$$

MIT:

$$s' = \sigma_r' + t \quad (2-53)$$

$$s' = \sigma_a' - t \quad (2-54)$$

La figura 2-23 presenta esquemáticamente posibles trayectorias de tensiones totales en compresión y extensión, y para ambos sets de parámetros, junto a la trayectoria de tensiones efectivas típica de una consolidación isotrópica. Inicialmente, suponiendo un estado tensional inicial efectivo y contrapresión nulos, la probeta es sometida a consolidación isotrópica donde van aumentando los esfuerzos efectivos a medida que se disipa el exceso de presión de poros. La TTE de este tipo de consolidación sigue el eje de la abscisa, ya que los esfuerzos principales efectivos σ_a' y σ_r' se mantienen iguales entre sí. Así, se llega al estado tensional efectivo al comienzo de la etapa de corte representado por el punto O .

Como se puede intuir, esta trayectoria es distinta para una consolidación anisotrópica, ya que en ese caso existe continuamente una diferencia entre esfuerzos principales efectivos σ_a' y σ_r' , pero siempre manteniendo constante su relación en $K_0 = \sigma_r'/\sigma_a'$. En efecto, esta trayectoria tiene una inclinación constante, la cual viene dada por el coeficiente K_0 y es igual a $q/p' = (3(1 - K_0))/(1 + 2K_0)$ con el set de parámetros de Cambridge y $t/s' = (1 - K_0)/(1 + K_0)$ con el set del MIT.

Ya durante el corte la trayectoria de tensiones comúnmente seguida es la de compresión OB , donde se mantiene constante la presión de cámara (esfuerzo total radial σ_r) mientras se incrementa el esfuerzo total axial σ_a representado por el desviador de tensiones. Esta trayectoria tiene una pendiente de 3 : 1 para el set de Cambridge y de 1 : 1 para el del MIT, las cuales surgen de derivar las ecuaciones (2-51) y (2-53) respectivamente. La trayectoria de tensiones OA corresponde al caso de compresión manteniendo constante el esfuerzo total axial σ_a mientras se disminuye la presión de cámara. Esta trayectoria tiene una pendiente de -3 : 2 para el set de Cambridge y de -1 : 1 para el del MIT, las que a su vez se explican al derivar las ecuaciones (2-52) y (2-54).

La trayectoria de tensiones OC tiene la misma inclinación que la OB , pero distinto sentido, dado que representa el caso de extensión disminuyendo σ_a y manteniendo constante σ_r . Del mismo

modo, la trayectoria OD tiene la misma inclinación que la OA , pero sentido contrario, ya que corresponde al caso de extensión con σ_a constante mientras se aumenta σ_r .

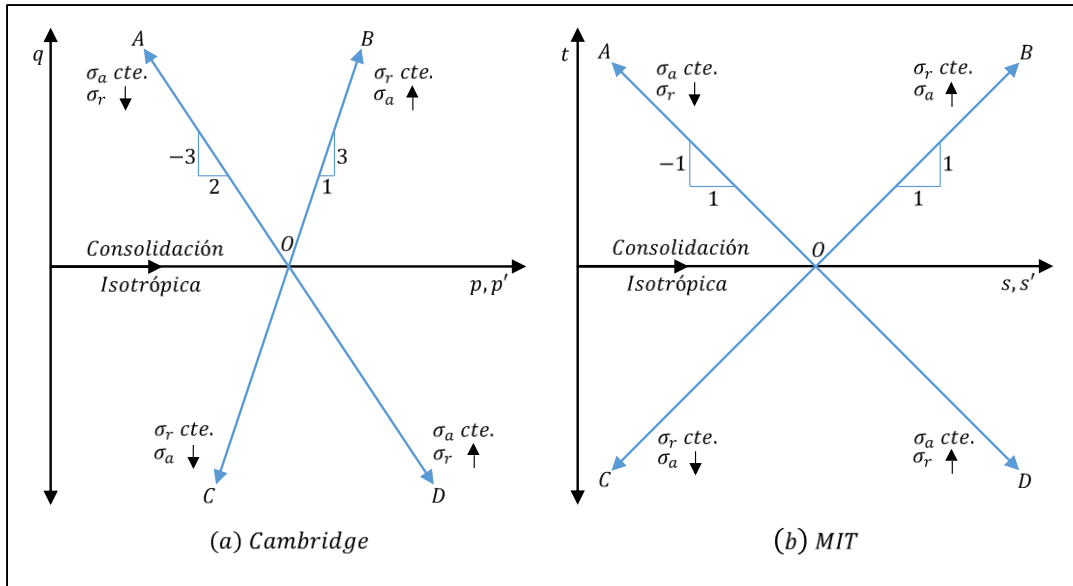


Figura 2-23: Trayectoria de tensiones totales (TTT) en ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente.

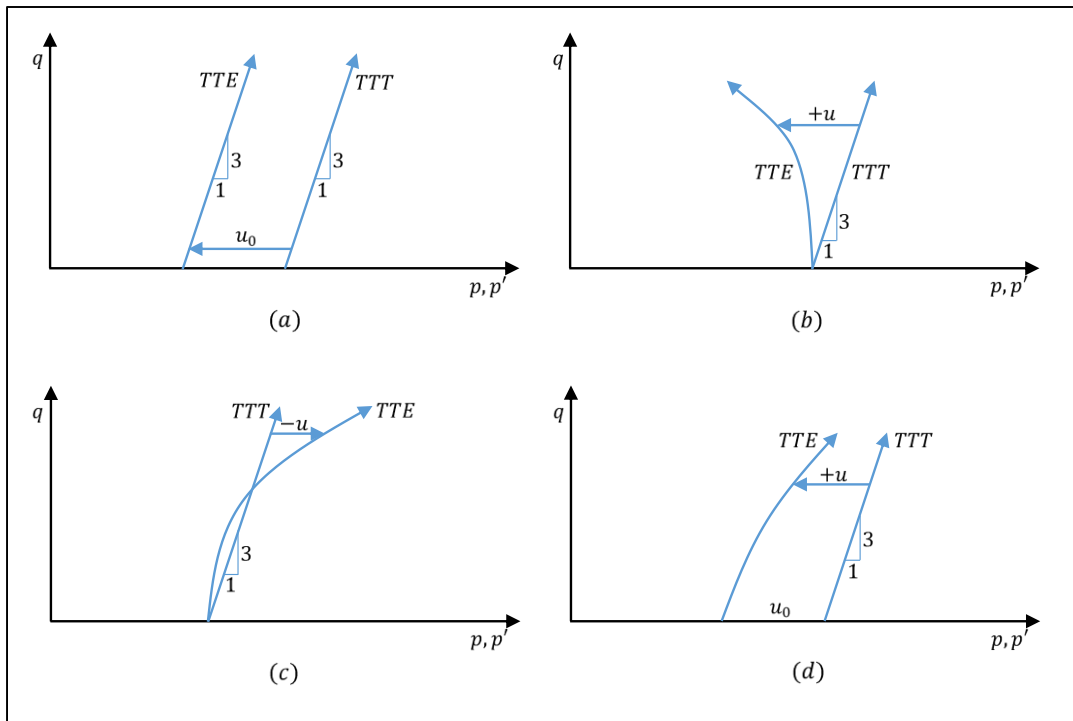


Figura 2-24: Trayectoria de tensiones totales (TTT) y efectivas (TTE) en ensayos convencionales de compresión triaxial CIU y CID en el plano $q - p$. (a) Ensayo de compresión triaxial CID bajo contrapresión u_0 , (b) Ensayo de compresión triaxial CIU en suelo suelto o normalmente consolidado, (c) Ensayo de compresión triaxial CIU en suelo denso o preconsolidado y (d) Ensayo de compresión triaxial CIU bajo contrapresión u_0 en suelo denso o preconsolidado.

Ya definidas las inclinaciones teóricas de las TTT de distintas modalidades de ensayos triaxiales, la figura 2-24 se encarga de mostrar algunas TTT y TTE de ensayos convencionales de compresión triaxial CIU y CID, graficadas en conjunto en el plano $q - p$ con el fin de visualizar mejor las diferencias entre ellas.

Finalmente, la intersección en los puntos de máximo esfuerzo desviatorio de las trayectorias de tensiones con la línea del criterio de falla de Mohr – Coulomb (figura 2-22), permiten determinar parámetros geotécnicos de resistencia al corte efectivos (drenados) y totales (no drenados) en la falla dependiendo de cuales sean las trayectorias trazadas y utilizadas (TTE o TTT). Dentro del marco de la Mecánica de Suelos del estado crítico, las trayectorias de tensiones permiten definir superficies de fluencia y la línea de estado crítico. Modelos elastoplásticos como Cam clay requieren de información relacionada a parámetros elásticos, plásticos y de estado crítico. Estos datos pueden ser obtenidos en ensayos triaxiales con el objeto de definir las relaciones constitutivas elastoplásticas y así contar con los esfuerzos y deformaciones debidos a un estado de cargas solicitantes. Por medio de las ecuaciones de la elasticidad y plasticidad, estas últimas incluyen superficies de fluencia y ley de flujo que relaciona las deformaciones plásticas.

2.4.12.2. Observaciones

Desde ahora en adelante para los distintos fines explicativos y análisis de resultados de esta memoria, se utilizarán los parámetros de esfuerzos compuestos p' y q . Esto no quiere decir que los parámetros s' y t no sirvan, sino simplemente es una elección personal, ya que los comportamientos esperados son cualitativamente similares.

2.4.13. Teoría de la Elasticidad Aplicada a Ensayos Triaxiales

Ya fue expuesto con anterioridad que los suelos presentan un comportamiento eminentemente elastoplástico, desarrollando generalmente deformaciones plásticas prácticamente a la par con las elásticas para las tensiones a las que es sometido en proyectos de Ingeniería Geotécnica habituales de fundaciones, represas, excavaciones y túneles. Además, los suelos son por lo general anisotrópicos, ya que sus propiedades varían principalmente con la profundidad y también en el plano horizontal. Por lo tanto, asumir que en un suelo sus propiedades elásticas no varían en ninguna dirección (isotrópico), es un supuesto discutible al menos. Sin embargo, esta es la hipótesis simplificada que se maneja y utiliza en la práctica y no sólo en análisis estáticos.

El comportamiento de un modelo elástico isotrópico puede ser definido mediante cinco constantes elásticas, las cuales no son independientes entre sí, requiriéndose sólo dos para estudiar la respuesta en su totalidad. Estas son el módulo de elasticidad o de Young E (Young, 1807) y el módulo de Poisson μ (Poisson, 1829).

Dicho esto, la ley de Hooke generalizada se puede escribir en forma matricial y vectorial del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\mu/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & 1/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & -\mu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (2-55)$$

La expresión (2-55) relaciona completamente las deformaciones con los esfuerzos en función de la matriz de flexibilidad para un material isotrópico y elástico – lineal.

La constante elástica G se denomina módulo de corte y refleja el cambio de forma bajo volumen constante. El módulo de corte está relacionado con el esfuerzo de corte y la deformación de corte, esto es:

$$\tau_{xy} = 2G\epsilon_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2G\epsilon_{yz} = G\gamma_{yz}, \quad \tau_{zx} = 2G\epsilon_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (2-56)$$

Además, el módulo de corte G puede ser determinado conociendo el módulo de elasticidad E y el de Poisson μ (Davis y Selvadurai, 1996) según la ecuación (2-57).

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2-57)$$

Las otras dos constantes elásticas son el módulo de compresibilidad K y la constante de Lamé λ (Lamé, 1852). El módulo de compresibilidad refleja el cambio de volumen bajo forma constante y también se puede expresar en función de E y μ (ecuación (2-58)).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (2-58)$$

La constante de Lamé no es producto de una evidencia física, sino más bien aparece del rearrreglo de las expresiones elásticas normales, pudiendo expresarse como:

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (2-59)$$

La relación matricial general de deformación – esfuerzo (2-55) se puede invertir para expresar la relación esfuerzo – deformación (2-60) en función de la matriz rigidez.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\mu} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1 - \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1 - \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 - \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 - \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

2.4.13.1. Ensayos Triaxiales Drenados

En esfuerzos principales efectivos y deformaciones principales (típico de ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas), es decir, sin esfuerzos y deformaciones de corte, (2-55) y (2-60) se reducen a:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \end{bmatrix} \quad (2-61)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\mu} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu \\ \mu & 1-\mu & \mu \\ \mu & \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (2-62)$$

Como ya se ha dicho, en un ensayo triaxial se dan condiciones axial simétricas, esto es: $\sigma'_2 = \sigma'_3$ y $\epsilon_2 = \epsilon_3$ en uno de compresión, y $\sigma'_1 = \sigma'_2$ y $\epsilon_1 = \epsilon_2$ en uno de extensión. Considerando esto y la notación definida en 2.4.12, (2-61) y (2-62) pueden ser reducidos y escritos del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_a \\ \epsilon_r \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -2\mu \\ -\mu & 1-\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_a \\ \sigma'_r \end{bmatrix} \quad (2-63)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma'_a \\ \sigma'_r \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\mu} \begin{bmatrix} 1-\mu & 2\mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_a \\ \epsilon_r \end{bmatrix} \quad (2-64)$$

Adicionalmente, se define la deformación volumétrica ϵ_p (suma de las deformaciones normales) y la deformación de corte o desviadora ϵ_q , las que para el caso de un ensayo triaxial se pueden expresar matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_a \\ \epsilon_r \end{bmatrix} \quad (2-65)$$

La convención que es utilizada normalmente dice que las deformaciones unitarias ϵ_p , ϵ_a y ϵ_r son positivas cuando implican una disminución de la cantidad que miden (volumen V o volumen específico v , altura H y diámetro D respectivamente). Esto puede expresarse según las siguientes expresiones:

$$\epsilon_p = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta v}{v} \quad (2-66)$$

$$\epsilon_a = -\frac{\Delta H}{H} \quad (2-67)$$

$$\epsilon_r = -\frac{\Delta D}{D} \quad (2-68)$$

Por otro lado, los parámetros p' y q definidos en 2.4.12 pueden escribirse matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} p' \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma'_a \\ \sigma'_r \end{bmatrix} \quad (2-69)$$

En forma inversa resulta:

$$\begin{bmatrix} \sigma'_a \\ \sigma'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 \\ 1 & -1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p' \\ q \end{bmatrix} \quad (2-70)$$

Si se reemplaza (2-70) en (2-63) y la matriz resultante en (2-65), es posible relacionar ϵ_p y ϵ_q con los parámetros p' y q por medio de la matriz de flexibilidad del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & 1/3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p' \\ q \end{bmatrix} \quad (2-71)$$

En forma inversa por medio de la matriz de rigidez se obtiene:

$$\begin{bmatrix} p' \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_q \end{bmatrix} \quad (2-72)$$

La diagonal de ceros en (2-71) y (2-72) indica que no existe vínculo entre los efectos volumétricos y distorsionales para un material elástico – isotrópico.

Ahora, según la expresión $q = 3G\epsilon_q$ al realizar un ensayo triaxial drenado, es posible obtener el módulo de corte G de la pendiente inicial de la curva resultante en el plano coordinado $q - \epsilon_q$. Además, si se tiene en cuenta que $\epsilon_q = 2(\epsilon_a - \epsilon_r)/3$ y la relación de deformaciones de Poisson $\epsilon_r = -\epsilon_a\mu$, se puede obtener la relación elástica entre q y ϵ_a (ecuación (2-73)), donde su pendiente inicial es el módulo de elasticidad E .

$$q = 3G\epsilon_q = 2G(\epsilon_a - \epsilon_r) = 2G(1 + \mu)\epsilon_a = E\epsilon_a \quad (2-73)$$

La relación entre ϵ_p y ϵ_a también es usualmente empleada en la práctica. Para derivarla se debe tener en cuenta que $\epsilon_p = \epsilon_a + 2\epsilon_r$ y reemplazar la relación de deformaciones de Poisson, con lo que resulta:

$$\epsilon_p = (1 - 2\mu)\epsilon_a \quad (2-74)$$

Finalmente, también se puede obtener la relación entre ϵ_p y ϵ_q . Para ello, de la expresión (2-51) se sabe que en un ensayo de compresión triaxial CID el incremento de tensiones es $\delta q = 3\delta p'$, con lo cual y utilizando (2-72), es posible demostrar que:

$$\frac{\delta \epsilon_p}{\delta \epsilon_q} = \frac{G}{K} \quad (2-75)$$

A modo de resumen, la figura 2-25 muestra curvas esquemáticas de ensayos de compresión triaxial CID donde se ajusta una línea recta en la parte inicial para obtener las distintas constantes elásticas.

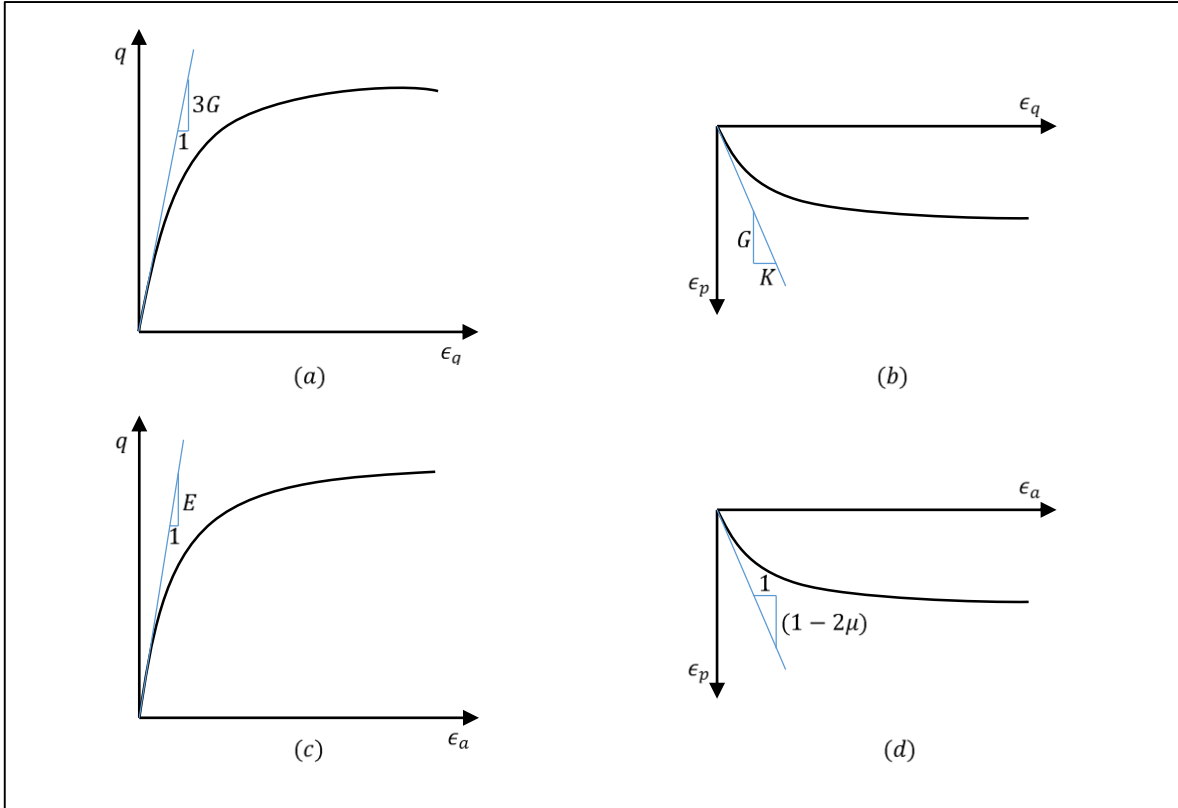


Figura 2-25: Constantes elásticas deducidas de la pendiente inicial de curvas de ensayos de compresión triaxial CID. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación desviadora ϵ_q , (b) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación desviadora ϵ_q , (c) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (d) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .

2.4.13.2. Ensayos Triaxiales Sin Drenaje

Si ahora se realiza un análisis similar, pero en términos de esfuerzos totales (típico de ensayos triaxiales no drenados bajo volumen constante), es posible escribir las ecuaciones de equilibrio sin necesidad de introducir la presión de poros y los procesos analíticos pueden a menudo ser guiados con menos dificultad en términos de esfuerzos totales que efectivos. En este caso se está en presencia de una ley formalmente análoga a la de Hooke, con una serie de constantes elásticas equivalentes. Por ejemplo, (2-71) expresada en términos totales es:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K_u & 0 \\ 0 & 1/3G_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2-76)$$

En (2-76), bajo volumen constante y de forma diferencial, $\delta\epsilon_p = 0$, lo cual implica que:

$$K_u = \infty \quad (2-77)$$

A su vez, y reemplazando (2-77) en (2-58), se concluye que:

$$\mu_u = \frac{1}{2} \quad (2-78)$$

La condición de volumen constante no reprime el cambio de forma de la muestra de suelo, por lo que de (2-76) se puede concluir que la pendiente inicial de la curva en el plano coordinado $q - \epsilon_q$ será nuevamente $3G$, como en el ensayo drenado. En otras palabras, como el esfuerzo desviatorio no se ve afectado por la presión de poros, entonces el cambio de forma es el mismo con y sin condiciones de drenaje. Así, el módulo de corte es el mismo para ambas situaciones, esto es:

$$G = G_u \quad (2-79)$$

Haciendo uso nuevamente de (2-58), la igualdad (2-79) puede expresarse como:

$$\frac{E_u}{2(1 + \mu_u)} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2-80)$$

Ahora, si se incorpora la condición (2-78), se llega a:

$$E_u = \frac{3E}{2(1 + \mu)} = 3G_u = 3G \quad (2-81)$$

La ecuación (2-81) indica claramente que en la curva esfuerzo desviatorio q – deformación axial ϵ_a se observarán diferentes pendientes iniciales si se permite o no el drenaje. Además, en el caso no drenado esta pendiente es igual a la pendiente inicial de la curva $q - \epsilon_q$.

Por otro lado, si se tiene en cuenta que el esfuerzo octaédrico es exactamente lo mismo que el esfuerzo promedio o parámetro p , la ecuación (2-13) puede expresarse alternativamente y de forma diferencial como $\delta u = \delta p$. Esto establece que bajo condiciones elásticas y no drenadas todo el incremento del esfuerzo promedio es tomado como un incremento de presión de poros. Esta ecuación y el incremento de tensiones totales en un ensayo de compresión triaxial CIU ($\delta p = \delta q/3$) conllevan a que $\delta q = 3\delta u$. Finalmente, al reemplazar esta última relación en la forma diferencial de (2-76), se obtiene que:

$$\delta u = G_u \delta \epsilon_q = G \delta \epsilon_q \quad (2-82)$$

Alternativamente, utilizando las expresiones para la deformación desviadora y la relación de deformaciones de Poisson, se puede obtener la relación elástica entre δu y $\delta \epsilon_a$. Esto es:

$$\delta u = \frac{2G}{3}(\delta \epsilon_a - \delta \epsilon_r) = \frac{2G}{3}(1 + \mu)\delta \epsilon_a = \frac{E}{3}\delta \epsilon_a \quad (2-83)$$

Las expresiones (2-82) y (2-83) señalan que también es posible obtener el módulo de corte G y el de elasticidad E como la pendiente inicial de las curvas que relacionan la presión de poros con la deformación desviadora y con la deformación axial durante el corte no drenado.

Como síntesis de lo expuesto en este apartado, la figura 2-26 presenta curvas esquemáticas de ensayos de compresión triaxial CIU donde se ajusta una línea recta en la parte inicial para obtener las distintas constantes elásticas.

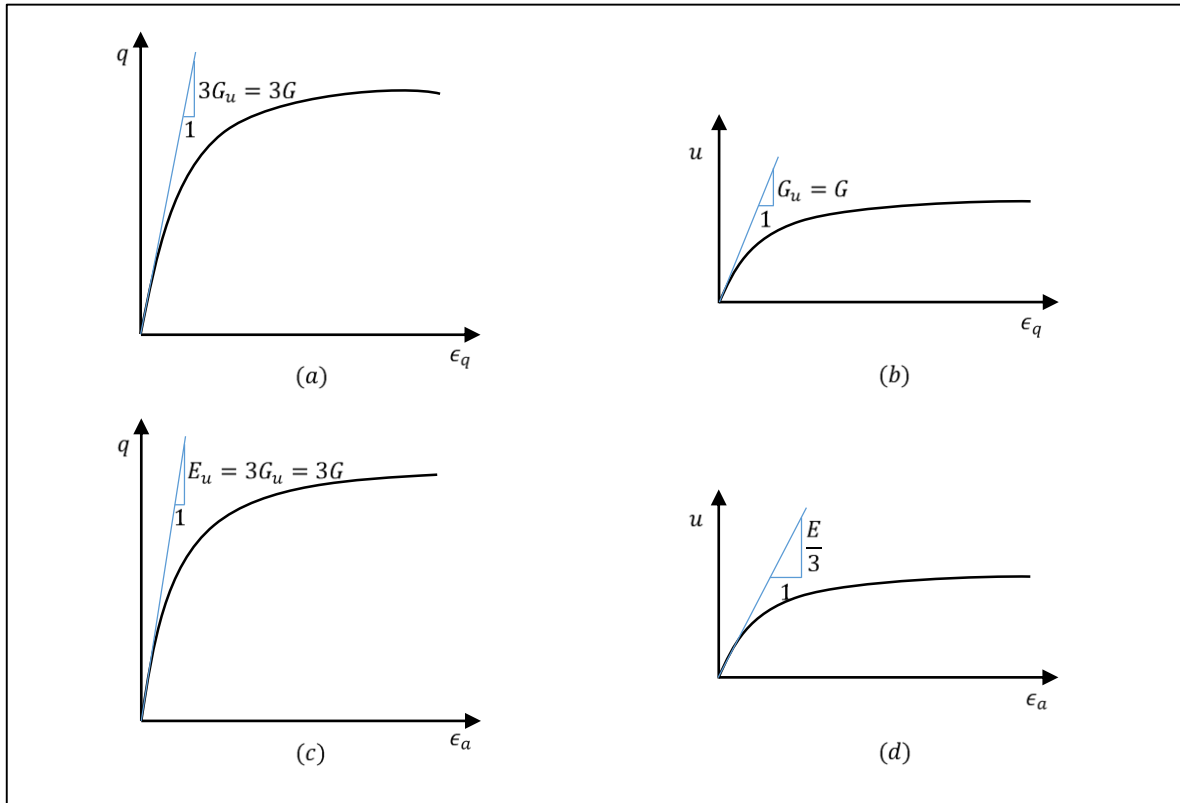


Figura 2-26: Constantes elásticas deducidas de la pendiente inicial de curvas de ensayos de compresión triaxial CIU. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación desviadora ϵ_q , (b) Presión de poros u – Deformación desviadora ϵ_q , (c) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a , (d) Presión de poros u – Deformación axial ϵ_a .

2.4.13.3. Observaciones

La respuesta puramente elástica del suelo está restringida a un rango muy pequeño de deformación del orden de 0,002 [%] de deformación angular en arenas (Mitchell y Soga, 2005). En efecto, esta sería la explicación de por qué para obtener las distintas constantes elásticas sólo se recurre a la pendiente inicial de las curvas obtenidas de los distintos ensayos que se ejecuten. Empíricamente se puede observar que las constantes elásticas son distintas para distintos esfuerzos efectivos de consolidación. Ello implica que en la práctica la determinación del valor a adoptar tenga

que hacerse en cada caso atendiendo a los esfuerzos iniciales, de peso propio, existentes en cada punto, interpolando o extrapolando los resultados de los ensayos realizados.

2.4.14. Estado Crítico en Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID

Como ya se dijo en el ítem 2.3.4, el estado crítico es un estado final que se da cuando se alcanzan grandes deformaciones y en el cual no se experimentan cambios en el volumen ni en los esfuerzos efectivos. Para el caso de ensayos triaxiales se suele utilizar el concepto de estados tensionales representados por los parámetros compuestos p' y q , ya que en estos ensayos es mucho más evidente y sencilla su determinación, y dado que permiten su asociación con modelos elastoplásticos. También, para mayor simplicidad en la explicación y dada la finalidad de esta memoria, este apartado está pensado en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, es decir, en estado de saturación total y con p' y q siempre positivos.

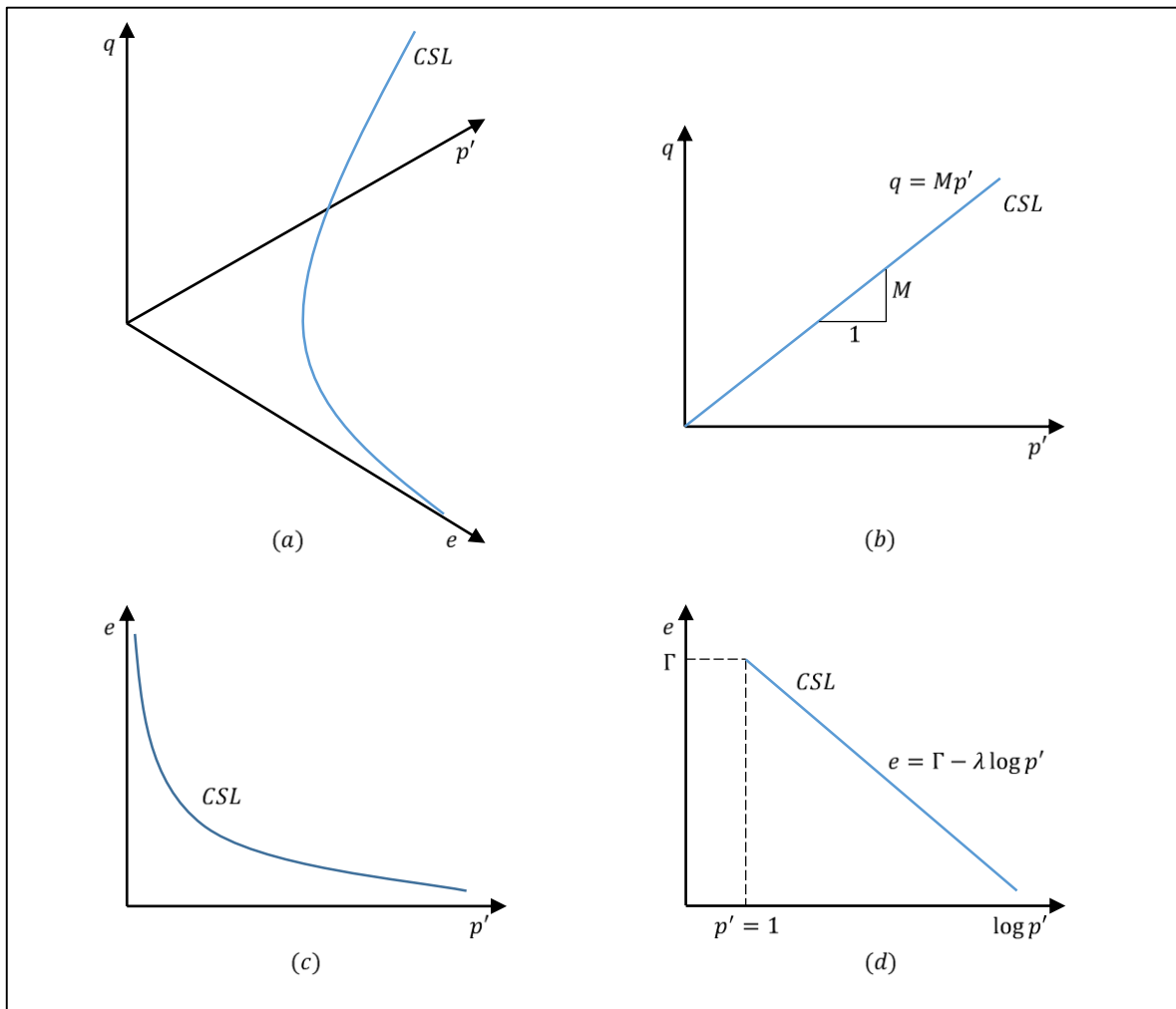


Figura 2-27: Línea de estado crítico en: (a) Espacio (p' , q , e), (b) Plano $q - p'$, (c) Plano $e - p'$ y (d) Plano $e - \log p'$.

En este contexto, y como se puede apreciar en la figura 2-27(a), es posible definir en el espacio (p', q, v) o (p', q, e) una curva espacial análoga a la mostrada en la figura 2-16 para representar todas las combinaciones posibles de estados tensionales y relaciones de vacíos o volúmenes específicos susceptibles de ser alcanzados en esta condición final por un suelo en particular. La curva espacial en cuestión tiene una proyección lineal en el plano $q - p'$ (figura 2-27(b)), la cual pasa por el origen a no ser que el suelo posea cohesión verdadera. Sobre el plano $e - p'$ se aprecia una proyección curva típica (figura 2-27(c)), la cual en el plano $e - \log p'$ suele linealizarse (figura 2-27(d)). En fin, estas son diferentes formas para presentar la línea de estado crítico (critical state line, CSL).

La línea de estado crítico, para el caso de $c' = 0$ y en el plano $q - p'$, tiene una pendiente M que se puede expresar en función del ángulo de fricción efectivo en estado crítico ϕ'_{cri} , esto es:

$$M = \frac{6 \sin \phi'_{cri}}{3 - \sin \phi'_{cri}} \quad (2-84)$$

Ahora, la ecuación (2-85) representa la linealización ideal en el plano $e - \log p'$ con intercepto Γ (para $p' = 1$) y pendiente λ .

$$e = \Gamma - \lambda \log p' \quad (2-85)$$

Por otro lado, el comportamiento de un suelo durante el corte dependerá de su estado inicial, representado por los parámetros $(p', q$ y e o $v)$, con respecto a la línea de estado crítico. Para estados iniciales por sobre la línea de estado crítico, se tendrá un comportamiento esencialmente contractivo, y bajo esta línea, esencialmente dilatante. En los ensayos de compresión triaxial CIU los movimientos en el plano $e - \log p'$ son horizontales hasta alcanzar la línea de estado crítico (sin cambio de volumétrico) y se explican por variaciones en la presión de poros, aumento de ésta para estados iniciales por sobre la línea de estado crítico y disminución para estados iniciales bajo esta línea.

Con respecto a las curvas obtenidas durante el corte, en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID es el esfuerzo desviatorio el que tiende a un valor constante para grandes deformaciones. Obviamente, lo mismo ocurre con el volumen en el ensayo de compresión triaxial CID y la presión de poros en el ensayo de compresión triaxial CIU, lo cual ratifica la convergencia a un estado crítico bajo estado tensional efectivo constante. En este sentido, en ensayos de compresión triaxial CID se espera que en estado crítico las muestras de un suelo particular, independiente de su estado de densidad inicial y bajo un mismo esfuerzo efectivo de consolidación, teóricamente converjan al mismo esfuerzo desviatorio (estado tensional efectivo) (figura 2-28(a)) y relación de vacíos (figura 2-28(b)). Por su parte, en ensayos de compresión triaxial CIU se espera que en estado crítico las muestras de un suelo particular, independiente de su esfuerzo efectivo de consolidación y con la misma relación de vacíos al comienzo del corte, converjan también teóricamente al mismo esfuerzo desviatorio (estado tensional efectivo) (figura 2-29).

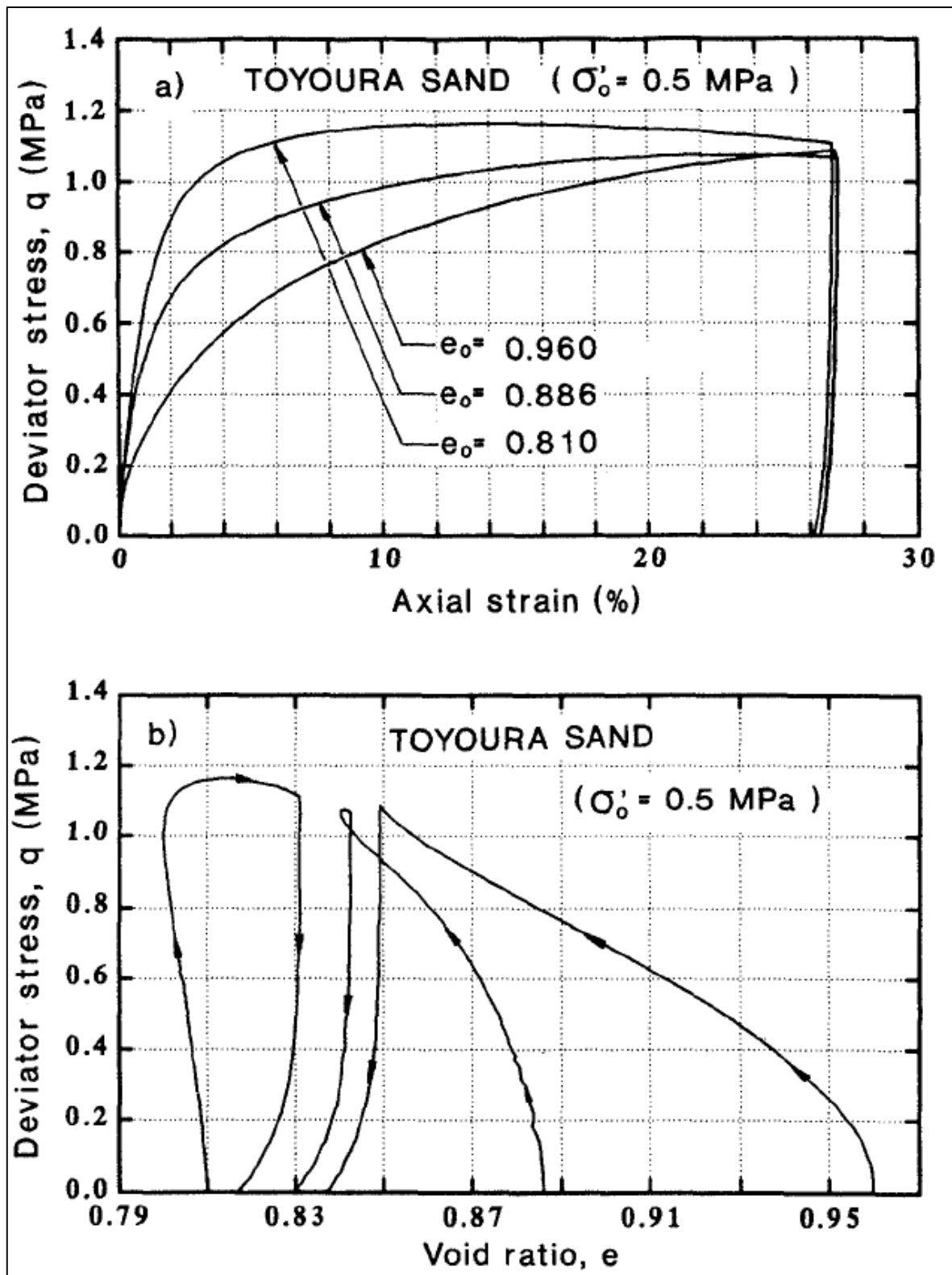


Figura 2-28: Ensayos de compresión triaxial CID en arena de Toyoura con distintas relaciones de vacíos iniciales e_0 y bajo el mismo esfuerzo efectivo de consolidación $\sigma'_0 = 0.5$ [MPa]. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (b) Esfuerzo desviatorio q – Relación de vacíos e (Verdugo e Ishihara, 1996).

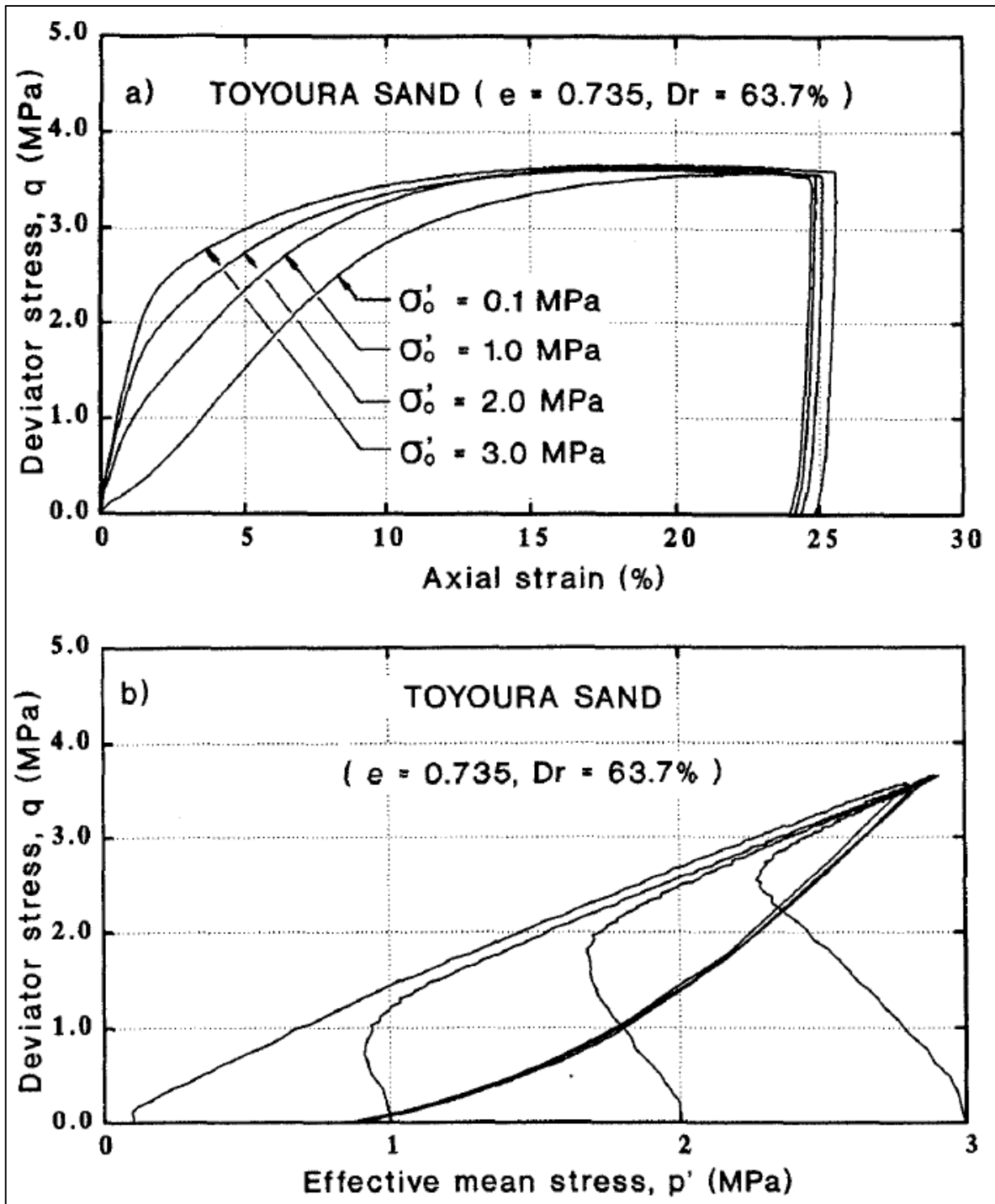


Figura 2-29: Ensayos de compresión triaxial CIU en arena de Toyoura con la misma relación de vacíos $e=0,735$ al comienzo de la etapa de corte y bajo distintos esfuerzos efectivos de consolidación σ'_0 . (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (b) Esfuerzo desviatorio q – Esfuerzo efectivo medio p' (Trayectorias de tensiones efectivas) (Verdugo e Ishihara, 1996).

2.4.15. Comportamiento Durante Ensayos de Compresión Triaxial Convencionales

En este apartado se presenta el comportamiento cualitativo aproximado de los suelos durante ensayos de compresión triaxial convencionales. Para ello, y en específico para los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, se recurre a conceptos asociados a un modelo elastoplástico de modo de explicar aproximada y muy generalmente el comportamiento de los suelos. Las características del modelo corresponden a las de Cam clay, modelo que integra la teoría elastoplástica y la rigidización por deformación (strain hardening) o hinchamiento por descarga (swelling), lo cual va más allá del modelo elastoplástico perfecto. Las componentes de este modelo, algunas de las cuales ya fueron nombradas y definidas en el ítem 2.2.3.1, se pueden resumir en cuatro: (a) relaciones elásticas (magnitud de las deformaciones elásticas), (b) superficie de fluencia (¿está ocurriendo deformación plástica?), (c) potencial plástico (mecanismo de las deformaciones plásticas) y (d) ley de endurecimiento (magnitud de las deformaciones plásticas). En este sentido, este modelo utiliza superficies de plastificación de geometría elíptica, donde su tamaño viene dado por el esfuerzo de preconsolidación p'_c y su forma por la pendiente de la línea de estado crítico M . La ley de flujo que utiliza es asociativa, es decir, los vectores de incremento de deformación plástica son normales a la superficie de fluencia, lo cual se traduce en curvas de potencial plástico idénticas a las superficies de fluencia. Por último, el modelo Cam clay, tal como su nombre lo indica, está pensado para modelar arcillas blandas entregando resultados razonables. Acá, su utilización es general y está pensado como un modelo académico para entender de forma apropiada y aproximada el comportamiento tanto de suelos cohesivos como granulares, utilizando para ello el concepto de esfuerzo de preconsolidación equivalente (ítem 2.2.3.2) y atendiendo a la correspondencia de comportamiento entre suelos sueltos con normalmente consolidados y densos con fuertemente preconsolidados.

2.4.15.1. Ensayo de Compresión Triaxial No Consolidado y No Drenado (UU)

Como se dijo en el ítem 2.4.4, en este ensayo la probeta es cortada bajo condiciones no drenadas, sin medir la presión de poros y sin considerar las etapas previas de saturación y consolidación. De hecho, y como se verá a continuación, el análisis de resultados está fuertemente condicionado por el estado de saturación inicial de la probeta.

Ensayo de Compresión Triaxial UU en Probetas Saturadas de Suelo Cohesivo

En probetas idénticas y totalmente saturadas de suelo cohesivo ocurre que el esfuerzo desviatorio en la falla es independiente de la presión de confinamiento. Esto se da porque los esfuerzos efectivos o estado tensional efectivo al comienzo de la etapa de corte es/son el/los mismo(s) cualquiera sea la presión de cámara (esfuerzo principal menor total) con que se ensaye, por lo cual deben fallar bajo el mismo esfuerzo desviatorio o carga axial. A su vez, esto se explica porque al estar completamente saturadas las probetas, toda la presión de cámara es resistida directamente por el agua de poros, no ocurriendo modificación alguna sobre los esfuerzos efectivos iniciales. Es más, los esfuerzos principales menor y mayor en términos efectivos en la falla son los mismos para todas las probetas ensayadas a distintas presiones de cámara, es decir, todas tienen el mismo círculo de Mohr o estado tensional efectivo en la falla.

Lo explicado en el párrafo anterior puede ser apreciado en la figura 2-30, donde se ve claramente que bajo estas condiciones la envolvente de falla o criterio de falla de Mohr – Coulomb en términos totales resulta en una línea horizontal con $\phi_u = 0$ y una cohesión aparente c_u , cohesión que en este caso se le denomina comúnmente como resistencia al corte no drenada. También se puede observar el único y coincidente círculo de Mohr efectivo en la falla, el cual se asocia a parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte (ϕ' y c') muy distintos a los totales o no drenados.

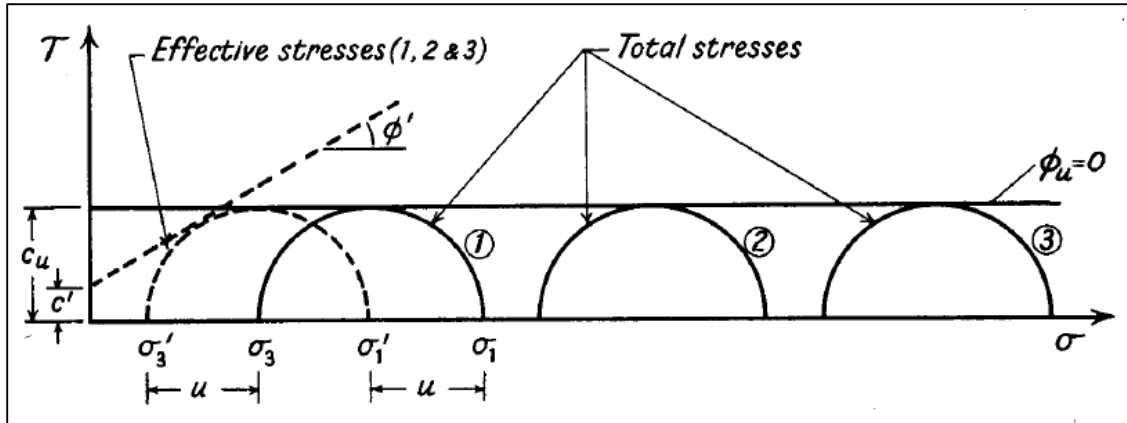


Figura 2-30: Círculos de Mohr de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas de suelo cohesivo saturado y bajo distintas presiones de confinamiento (Bishop y Henkel, 1962).

En la figura 2-31 también puede observarse este comportamiento en el plano $q - p'$, donde al ensayarse probetas idénticas de suelo cohesivo saturado bajo distintas presiones de confinamiento, se obtienen distintas trayectorias de tensiones totales (TTT), pero todas con su finalización en la misma línea de resistencia (mismo esfuerzo desviatorio). Del mismo modo, es extensible la idea de un único círculo de Mohr efectivo en la falla a una única trayectoria de tensiones efectivas (TTE) que intersecta a la línea de estado crítico (CSL), es decir, las probetas fallan en estado crítico.

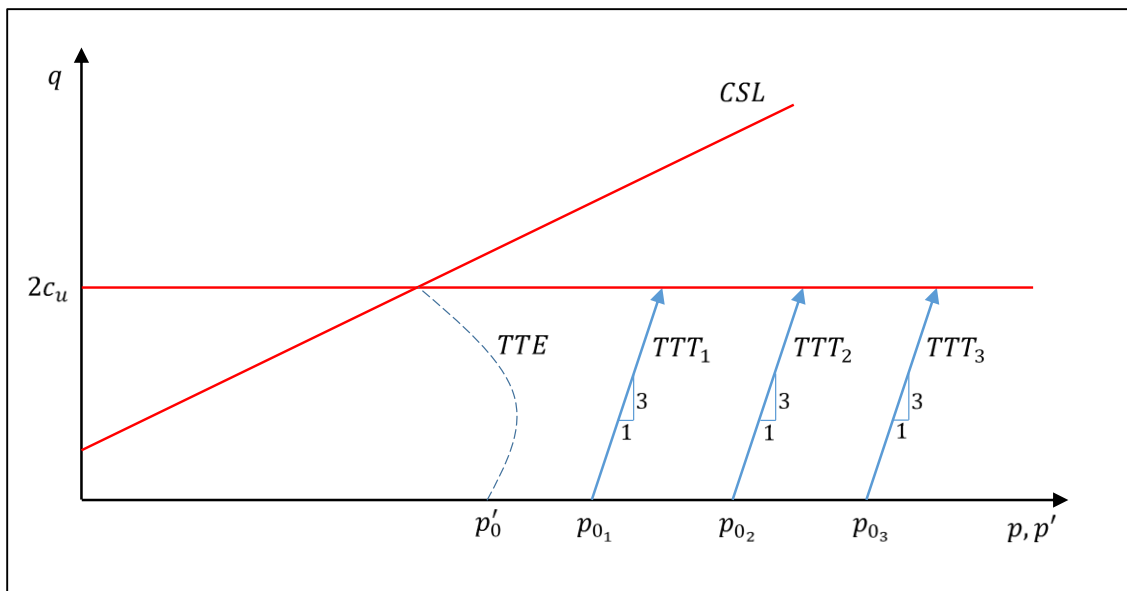


Figura 2-31: Trayectorias de tensiones totales (TTT) y efectivas (TTE) obtenidas de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas de suelo cohesivo saturado y bajo distintas presiones de confinamiento.

Ensayo de Compresión Triaxial UU en Probetas Parcialmente Saturadas de Suelo Cohesivo

En probetas idénticas y parcialmente saturadas de suelo cohesivo ocurre que el esfuerzo desviatorio en la falla no es independiente de la presión de confinamiento, sino que aumenta con ella. Esto se explica porque a mayor presión de cámara, mayor es la cantidad de aire intersticial comprimido y, por ende, mayor es el esfuerzo traspasado directamente al esqueleto del suelo, es decir, mayores son los esfuerzos efectivos al comienzo de la etapa de corte. Sin embargo, se debe destacar que el aumento de esfuerzo desviatorio producto de una mayor presión de confinamiento se vuelve progresivamente más pequeño a medida que el aire es comprimido y pasa en solución, y cesa cuando las presiones de cámara son suficientemente grandes como para posibilitar la saturación total de la probeta.

El comportamiento descrito puede ser apreciado en la figura 2-32, viéndose reflejado en una envolvente de falla en términos totales bastante recta y con una notoria pendiente para presiones de confinamiento bajas. A medida que se alcanzan presiones de cámara más importantes, esta envolvente de falla se va haciendo curva con una consecuente disminución de su pendiente, hasta llegar a confinamientos de tal magnitud que posibilitan la saturación total antes de comenzar a cortar y, por consiguiente, una zona final de envolvente de falla horizontal.

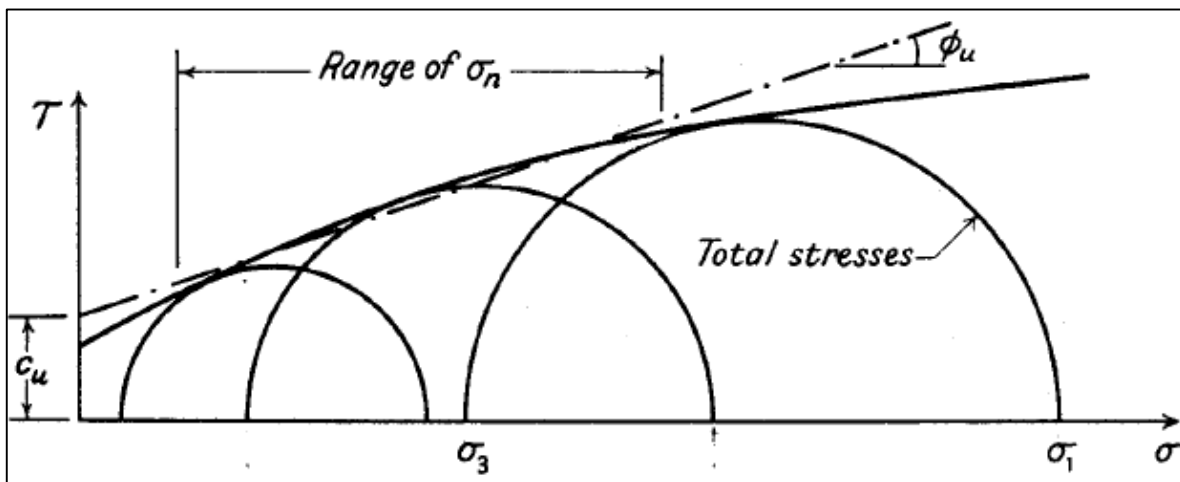


Figura 2-32: Círculos de Mohr en esfuerzos totales de ensayos de compresión triaxial UU en probetas idénticas y parcialmente saturadas de suelo cohesivo y bajo distintas presiones de confinamiento.

2.4.15.2. Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y Drenado (CID)

Las consideraciones necesarias con respecto al modelo elastoplástico ya fueron realizadas al comienzo del ítem 2.4.15, sólo debiendo destacarse y recordarse que este es sólo un modelo y que lo que aquí se presenta es el comportamiento de los suelos en su estado más general, por lo cual podría diferir considerablemente del real. Además, se agrega que se asume que la línea de estado crítico (CSL) y superficie de plastificación pasan por el origen, es decir, que no hay cohesión verdadera.

Probeta Normalmente Consolidada o Suelta ($p'_0 = p'_c$)

El punto inicial A_1 , que está sobre la superficie de plastificación, corresponde al esfuerzo efectivo de consolidación p'_0 y que a su vez es igual al esfuerzo de preconsolidación p'_c que define el tamaño de la superficie de plastificación inicial. En este caso, se está frente a una probeta normalmente consolidada, lo cual se establece como suelta en términos granulares dado que el esfuerzo de preconsolidación equivalente que había sido fijado por la compactación fue suficientemente bajo como para ser superado y definir un nuevo p'_c igual a p'_0 .

Al aplicar el esfuerzo el esfuerzo desviatorio q en estas condiciones drenadas, la trayectoria de tensiones efectivas (TTE) de pendiente 3:1 está dirigida hacia el exterior de la superficie de plastificación, produciendo deformaciones que ya desde un comienzo tienen una parte irreversible, con una componente volumétrica de compresión (dilatancia negativa). Las deformaciones volumétricas elásticas de compresión se explican por un aumento del esfuerzo efectivo medio p' (ecuación (2-71)) y las plásticas de compresión por una continua expansión de la superficie de plastificación. La intensidad de la compresión volumétrica va disminuyendo a medida que aumenta el valor de q , hasta que la TTE llega a la línea de estado crítico (CSL) en el punto C_1 , quedándose ahí donde la distorsión de la probeta ocurre a volumen constante.

El comportamiento cualitativo general aquí expuesto puede ser visualizado en la siguiente figura:

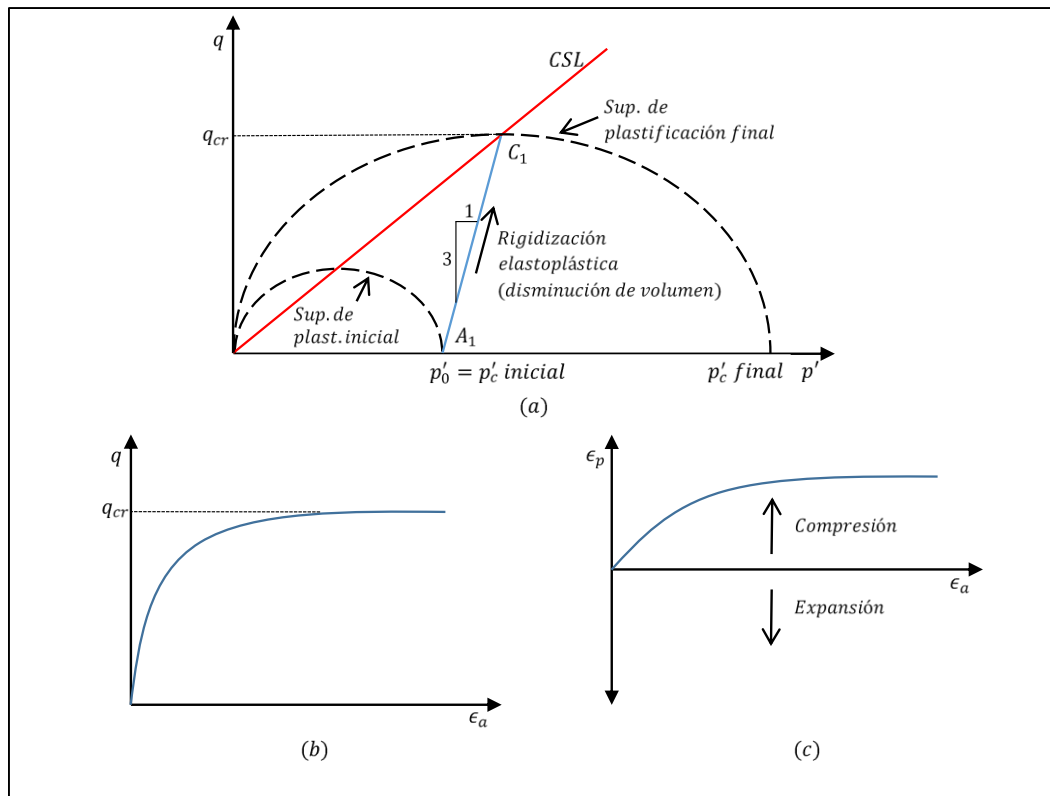


Figura 2-33: Comportamiento de probeta normalmente consolidada o suelta en ensayo de compresión triaxial CID.
(a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .

Probeta Ligeramente Preconsolidada (p'_0 ligeramente inferior a p'_c)

El punto inicial A_2 , que corresponde al esfuerzo efectivo de consolidación p'_0 , es interior a la superficie de plastificación. En este caso, el comportamiento es elástico hasta alcanzar dicha superficie en el punto B_2 (compresión volumétrica elástica), y a partir de entonces el comportamiento es análogo al descrito en el caso anterior, hasta llegar a la línea de estado crítico (CSL) en el punto C_2 .

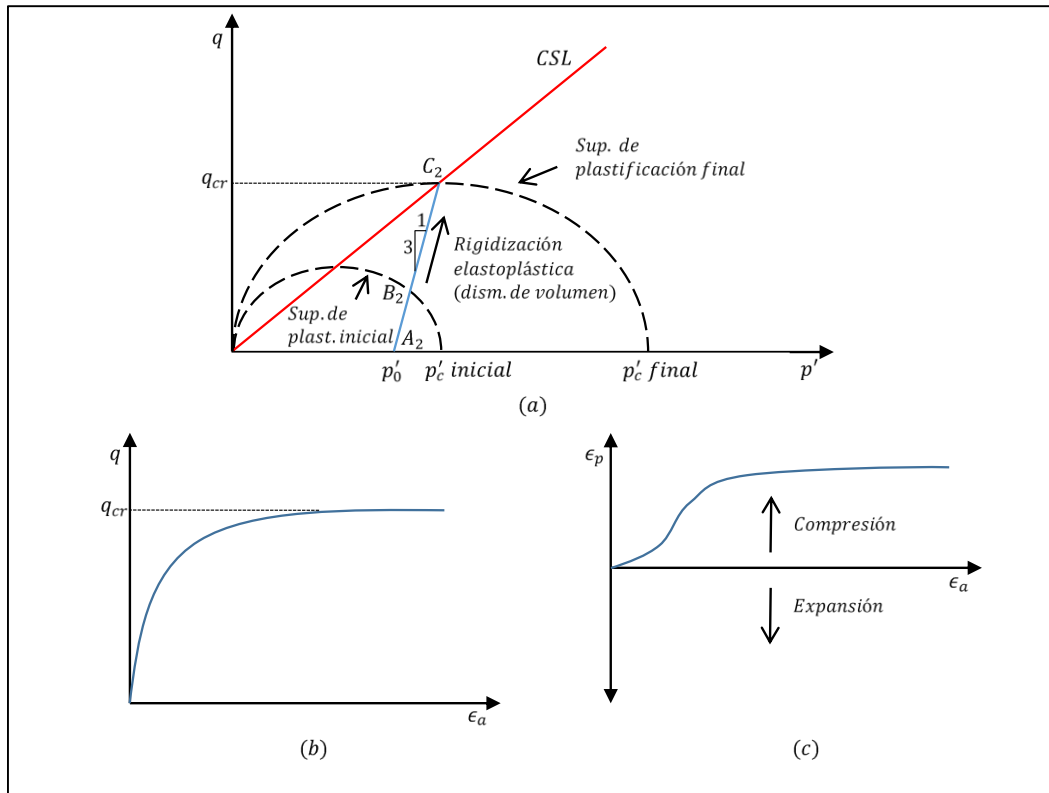


Figura 2-34: Comportamiento de probeta ligeramente preconsolidada en ensayo de compresión triaxial CID.
(a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_p – Deformación axial ϵ_a .

Probeta Fuertemente Preconsolidada o Densa ($p'_0 \ll p'_c$)

El punto inicial A_3 , que corresponde al esfuerzo efectivo de consolidación p'_0 , es muy interior a la superficie de plastificación, donde su tamaño está definido por el esfuerzo de preconsolidación p'_c . En este caso, se está frente a una probeta fuertemente preconsolidada, lo cual se establece como densa en términos granulares dado el alto esfuerzo de preconsolidación equivalente que había fijado por la compactación para llegar a la densidad requerida.

El comportamiento es de nuevo elástico hasta llegar a la superficie de plastificación en el punto B_3 (compresión volumétrica elástica), a partir del cual comienzan a ocurrir deformaciones plásticas. Sin embargo, al contrario de lo que ocurría en los casos anteriores y producto de la baja relación de vacíos de la probeta, las partículas tienden a montarse unas sobre otras para proseguir

corte, con el resultado macroscópico de un esponjamiento de la estructura del suelo o aumento de volumen (dilatancia positiva). Este aumento de volumen a partir del punto B_3 tiene una parte elástica producto de la disminución del esfuerzo efectivo medio p' (ecuación (2-71)) y una parte plástica como consecuencia de la disminución del tamaño de la superficie de plastificación, hasta que la trayectoria de tensiones efectivas (TTE) llega a la línea de estado crítico (CSL) en el punto C_3 , quedándose ahí donde la distorsión de la probeta ocurre a volumen constante.

El comportamiento aquí expuesto se ve reflejado en una curva esfuerzo desviatorio q – deformación axial ϵ_a con una clara resistencia peak (punto B_3) y una posterior rama descendente hasta alcanzar una resistencia crítica menor. Por su parte, la curva de deformación volumétrica presenta una compresión elástica hasta llegar al punto B_3 , a partir del cual ocurre una expansión o reblandecimiento elastoplástico hasta llegar a un volumen constante en estado crítico. Todo esto puede ser apreciado en la siguiente figura:

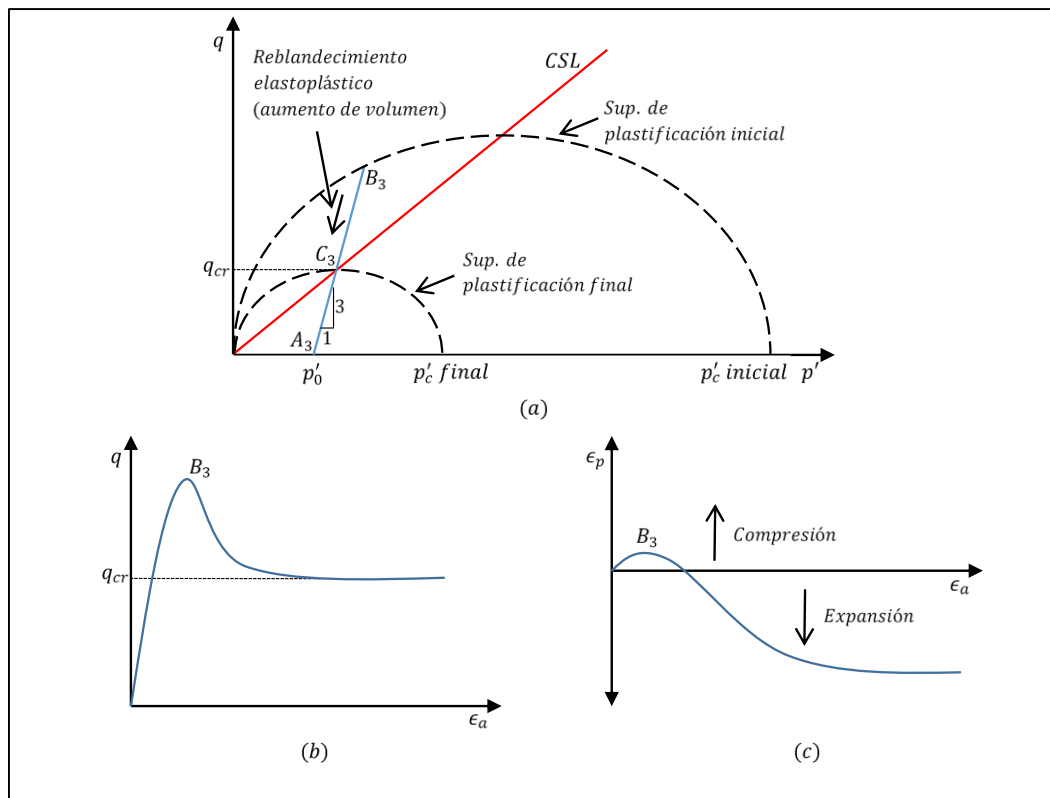


Figura 2-35: Comportamiento de probeta fuertemente preconsolidada en ensayo de compresión triaxial CID. (a) Trayectoria de tensiones, (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a y (c) Deformación volumétrica ϵ_v – Deformación axial ϵ_a .

2.4.15.3. Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y No Drenado (CIU)

Nuevamente, las consideraciones necesarias con respecto al modelo elastoplástico ya fueron realizadas al comienzo del ítem 2.4.15, sólo debiendo destacarse y recordarse que este es sólo un modelo y que lo que aquí se presenta es el comportamiento de los suelos en su estado más general, por lo cual podría diferir considerablemente del real. Además, se agrega que se asume que la línea de

estado crítico (CSL) y superficie de plastificación pasan por el origen, es decir, que no hay cohesión verdadera, y que las trayectorias de tensiones totales y efectivas parten del mismo punto en el eje coordenado p' , es decir, se asume que no hay contrapresión inicial aplicada o en su defecto que los esfuerzos totales se calculan como dicta la norma ASTM D4767-11 (descontando la contrapresión).

Probeta Normalmente Consolidada o Suelta ($p'_0 = p'_c$)

La idea es esencialmente la misma con respecto a lo visto anteriormente, con la gran salvedad de que en este caso la condición impuesta de no drenaje implica que la deformación volumétrica total ϵ_p debe ser nula. Sólo ocurren cambios de volumen pequeñísimos y despreciables a nivel de agua de poros y partículas de suelo, y que son los que explican los cambios en la presión de poros (ecuación (2-19)). Entonces, el incremento de deformación volumétrica total $\delta\epsilon_p$ tiene un sumando elástico $\delta\epsilon_p^e$ y otro plástico $\delta\epsilon_p^p$:

$$\delta\epsilon_p = \delta\epsilon_p^e + \delta\epsilon_p^p = 0 \quad (2-86)$$

La trayectoria de tensiones totales (TTT), dirigida hacia el exterior de la superficie de plastificación, sigue una pendiente de 3:1 tal cual como se vio en casos anteriores. La trayectoria de tensiones efectivas (TTE) se curva hacia la izquierda, indicando una disminución del esfuerzo efectivo medio p' , lo cual según la ecuación (2-71) provoca una expansión elástica ($\delta\epsilon_p^e < 0$), por lo cual esta trayectoria debe despegarse de la superficie de plastificación para que así esta se expanda y se origine una compresión plástica ($\delta\epsilon_p^p > 0$) que compense su contraparte elástica de modo tal que siempre se cumpla la ecuación (2-86). La relación $p - p' = u$ indica un continuo aumento de la presión de poros, hasta que la TTE alcanza la línea de estado crítico (CSL) en el punto C_1 donde ya no se modifican los esfuerzos efectivos ni por ende la presión de poros u .

Probeta Ligeramente Preconsolidada (p'_0 ligeramente inferior a p'_c)

El comportamiento es elástico hasta alcanzar la superficie de plastificación en el punto B_2 , por lo cual la trayectoria de tensiones efectivas (TTE) debe ser vertical indicando no variación del esfuerzo efectivo medio y de la deformación volumétrica elástica ($\delta p' = \delta\epsilon_p^e = 0$). A partir del punto B_2 , el comportamiento es análogo al caso anterior, hasta que la TTE alcanza la línea de estado crítico en el punto C_2 . En este caso, y comparado con el anterior, es menor el aumento de la presión de poros u , al ser menor también la disminución del esfuerzo efectivo medio p' .

Probeta Fuertemente Preconsolidada o Densa ($p'_0 \ll p'_c$)

El comportamiento es elástico hasta alcanzar la superficie de plastificación en el punto B_3 (trayectoria de tensiones efectivas vertical), a partir del cual la TTE se curva indicando un aumento del esfuerzo efectivo medio p' , lo cual provoca una compresión elástica ($\delta\epsilon_p^e > 0$) que debe ser compensada por una expansión plástica ($\delta\epsilon_p^p < 0$, disminución del tamaño de la superficie de plastificación), para que así se mantenga la deformación volumétrica total nula (ecuación (2-86)). En

este caso, se aprecia un aumento de la presión de poros hasta alcanzar el punto B_3 , a partir del cual ésta comienza a disminuir e incluso llegando a ser negativa, hasta llegar a un valor constante cuando la TTE alcanza la línea de estado crítico (CSL) en el punto C_3 .

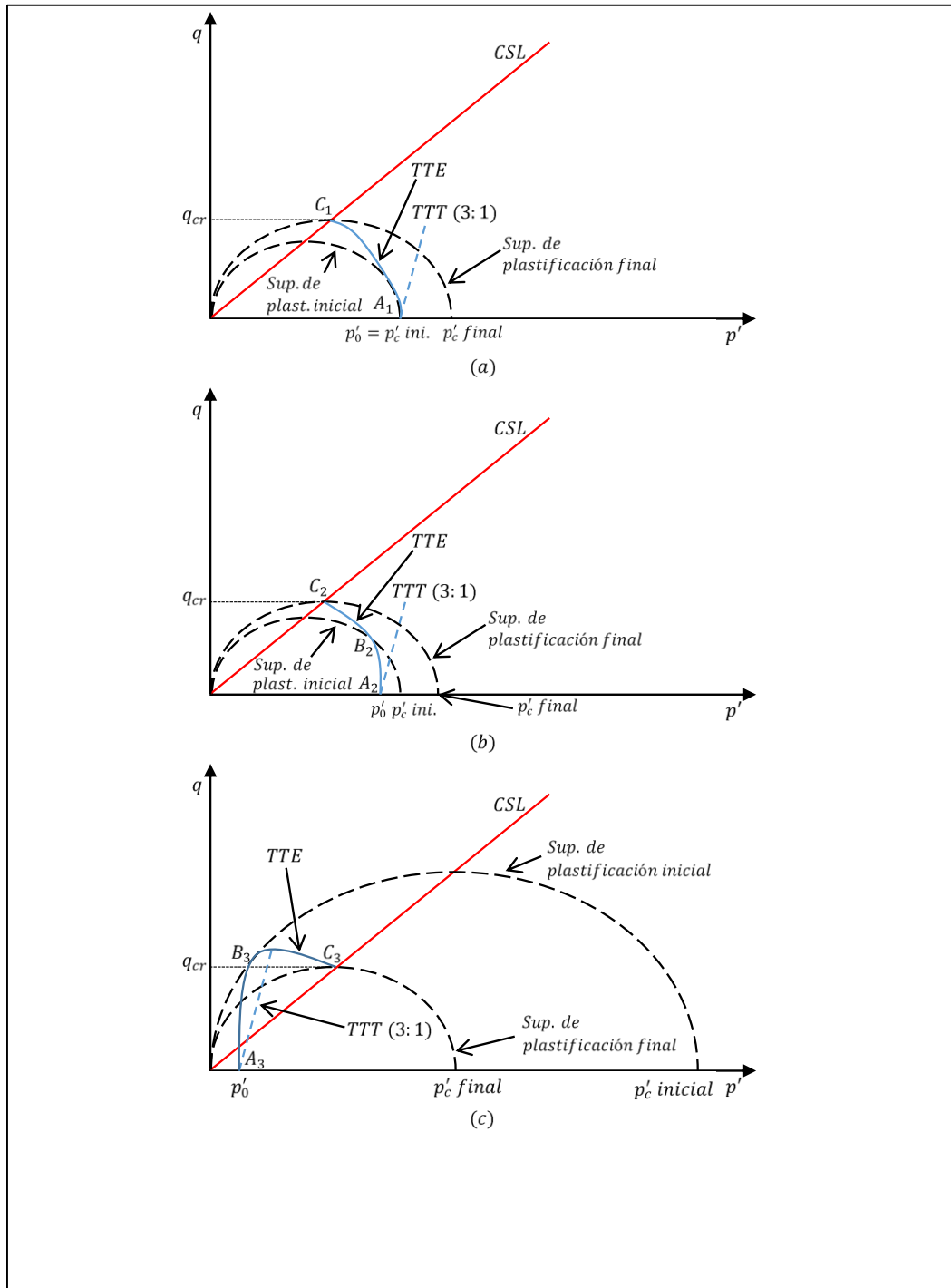


Figura 2-36: Trayectoria de tensiones en ensayo de compresión triaxial CIU. Probeta: (a) Normalmente consolidada o suelta, (b) Ligeramente preconsolidada y (c) Fuertemente preconsolidada o densa.

2.4.15.4. Observación

Quizás la observación más importante que se puede hacer con respecto al comportamiento durante los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, es la relación que existe entre los cambios de volumen (CID) y las variaciones de presión de poros (CIU), lo cual es uno de los conceptos más importantes de la Mecánica de Suelos. En efecto, en los ítem 2.4.15.2 y 2.4.15.3 se vio como en probetas normalmente consolidadas o sueltas la tendencia era a disminuir el volumen en el ensayo drenado y a aumentar la presión de poros en el no drenado, y en probetas fuertemente preconsolidadas o densas la tendencia era a aumentar el volumen en el ensayo drenado y a disminuir la presión de poros en el no drenado.

2.5. Recopilación Bibliográfica de Investigaciones en Mezclas de Arena – Limo con Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID

2.5.1. Comportamiento “Reverso” de Mezcla Arena – Limo

Comportamiento “Normal”

Antes de explayarse sobre el comportamiento “reverso” que presentan ciertas mezclas de arena – limo, es necesario ilustrar y exponer el comportamiento no drenado típicamente observado en arenas limpias, y su secuencia que es clasificada como comportamiento “normal”. A bajas presiones, la arena posee poca contractividad, y la dilatación encontrada después de pasar el punto de transformación de fase (quasi – steady state, QSS, punto donde ocurre el cambio de comportamiento contractivo a dilatante) causa fuertes presiones de poros negativas dentro del espécimen. Esto dirige la trayectoria de tensiones efectivas (TTE) a la derecha, hacia esfuerzos efectivos medios más altos, y esto, por ende, causa el aumento continuo del esfuerzo desviatorio hacia el punto de estado crítico. El comportamiento de la arena es completamente estable hasta que el punto de estado crítico es alcanzado.

La TTE central en la figura 2-37 indica un patrón de comportamiento más contractivo experimentado a presiones efectivas de confinamiento medias a altas. El esfuerzo desviatorio aumenta y alcanza un peak inicial antes que un aumento adicional en la presión de poros cause su disminución y la caída de la TTE hacia un valor mínimo. El comportamiento no drenado de la arena a lo largo de esta porción declinante de la TTE es inestable en el sentido que la arena no puede sostener un esfuerzo desviatorio constante. Sin embargo, a medida que la TTE cruza el punto de transformación de fase, la dilatación produce presiones de poros negativas, y la TTE consecuentemente se dirige hacia más altos esfuerzos efectivos medios y esfuerzos desviatorios. Este comportamiento estable continúa hasta que el punto de estado crítico es alcanzado.

La tercera TTE, a las más altas presiones efectivas de confinamiento en la figura 2-37, indica largas tendencias contractivas, resultando en un continuo aumento de la presión de poros. La TTE alcanza un peak inicial, después del cual declina hasta alcanzar el punto de estado crítico. En este caso, la presión efectiva de confinamiento es tan alta que no se registra punto de transformación de fase ni tendencia dilatante. Pasado el punto de mayor esfuerzo desviatorio, el comportamiento no

drenado llega a ser inestable. Este patrón de comportamiento no drenado encarna lo que es generalmente considerado como licuefacción.

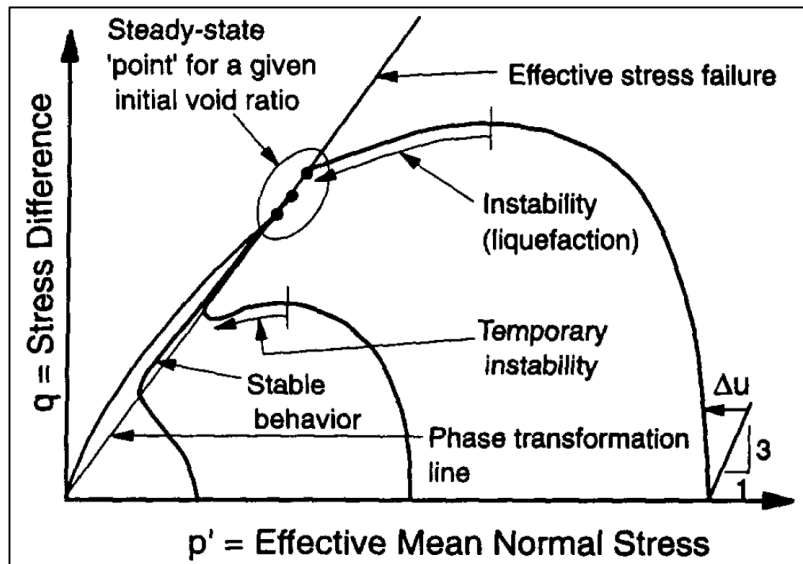


Figura 2-37: Secuencia de comportamiento “normal” a partir tres diferentes ensayos de compresión triaxial CIU sobre la misma arena limpia depositada a la misma relación de vacíos inicial (Yamamuro y Lade, 1998).

Comportamiento “Reverso”

Yamamuro y Lade (1998) realizaron 10 ensayos de compresión triaxial CIU sobre una arena de Nevada con 7 [%] de finos no plásticos, a una densidad relativa inicial de 30 [%], y a esfuerzos efectivos de consolidación en el rango entre 25 y 6000 [kPa]. Ellos encontraron un comportamiento “reverso” para los ensayos realizados a bajos esfuerzos efectivos de consolidación, tal como puede ser apreciado en la figura 2-38. El ensayo no drenado realizado con un esfuerzo efectivo de consolidación de 25 [kPa] licuó completamente a esfuerzo desviatorio nulo. A medida que era aumentado el esfuerzo efectivo de consolidación, la arena limosa se iba volviendo más estable. Esto era indicado por el aumento de la relación entre el esfuerzo desviatorio en el punto de transformación de fase (quasi – steady state) y el esfuerzo desviatorio en el peak inicial ($q(q_{ss})/q(peak)$). Esto representa un comportamiento “reverso” para las arenas, ya que ellas normalmente exhiben la tendencia opuesta de aumento de inestabilidad a medida que se aumenta el esfuerzo efectivo de consolidación (figura 2-37). La tendencia “reversa” de aumento de estabilidad se desarrolló hasta que se alcanzó un esfuerzo efectivo de consolidación de 4000 [kPa], para posteriormente producirse un aumento de inestabilidad con el último ensayo realizado bajo un esfuerzo efectivo de consolidación de 6000 [kPa].

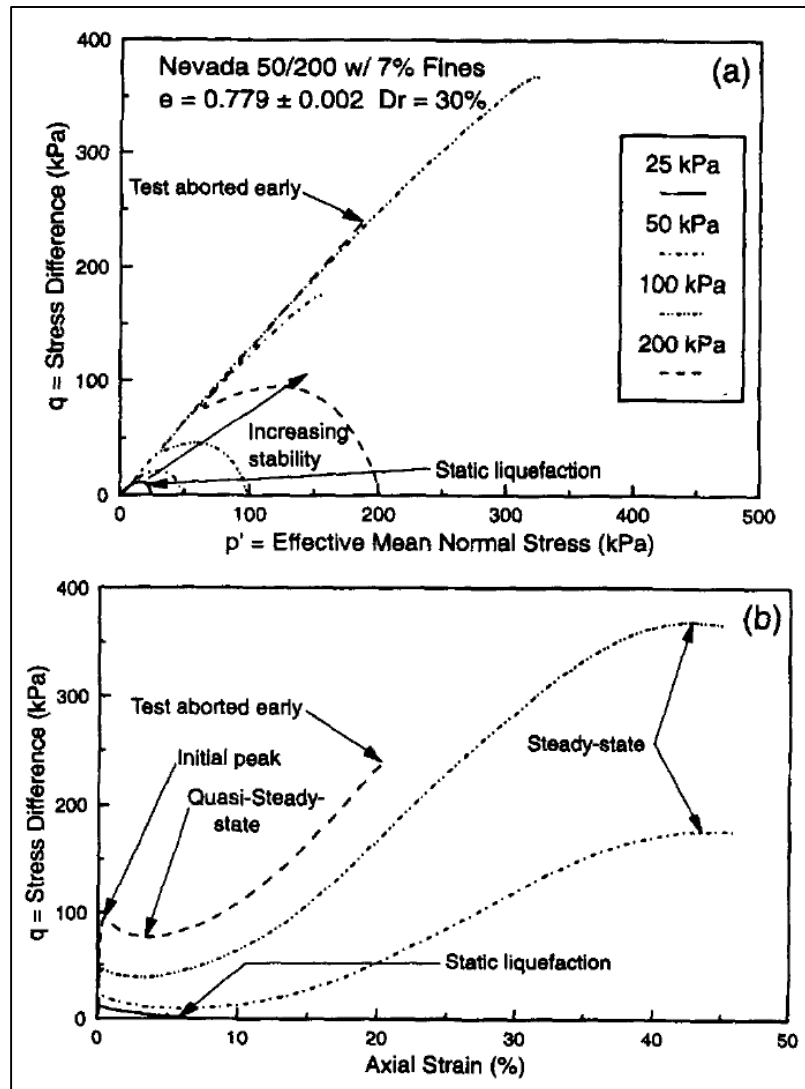


Figura 2-38: Comportamiento “reverso” en arena de Nevada con 7 [%] de finos y a bajos esfuerzos efectivos de consolidación. (a) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) y (b) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_a (Yamamuro y Lade, 1998).

2.5.2. Líneas de Estado Crítico

Hay relativamente pocas investigaciones disponibles con respecto a líneas de estado crítico en mezclas de arena – limo con un amplio rango de contenido de finos. Aun así, los resultados de investigaciones disponibles pueden ser divididos en dos grupos, dependiendo de las posiciones de las líneas de estado crítico de las mezclas de arena – limo. Las pendientes de las líneas de estado crítico cambian con el contenido de finos en el grupo 1, mientras las líneas de estado crítico son más o menos paralelas a cierto nivel de esfuerzos en el grupo 2.

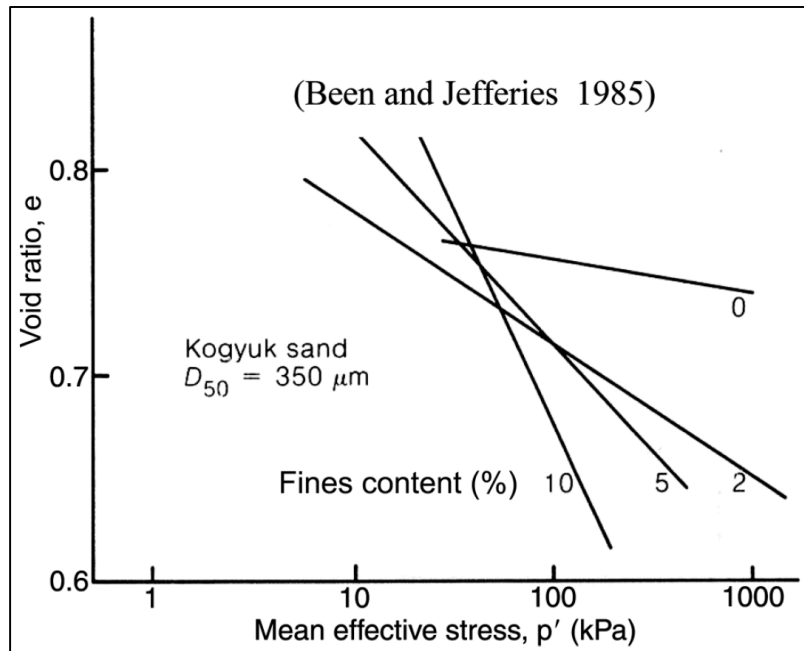


Figura 2-39: Líneas de estado crítico para arenas con contenidos de finos entre 0 [%] y 10 [%] (Been y Jefferies, 1985).

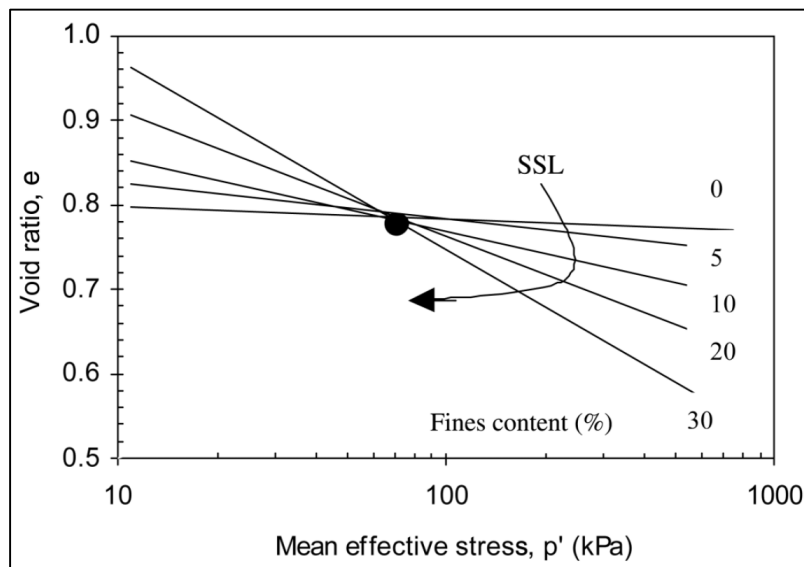


Figura 2-40: Efecto idealizado del contenido de finos y del nivel de esfuerzos efectivos en las líneas de estado crítico en el plano $e - \ln p'$ (Bouckovalas et al., 2003).

Grupo 1

Been y Jefferies (1985) observaron que la pendiente de la línea de estado crítico aumentaba (negativamente) con un aumento en el contenido de limo (figura 2-39). El contenido de limo de las muestras que analizaron estuvo en el rango entre 0 [%] y 10 [%]. Bouckovalas et al. (2003) propusieron un efecto idealizado del contenido de limo y el nivel de esfuerzos efectivos sobre la línea de estado crítico (figura 2-40): a medida que el contenido de limo aumenta, la línea de estado crítico

rota en sentido horario alrededor de un punto pivote en el plano $e - \ln p'$. La ubicación de las líneas de estado crítico se basó en ensayos sobre 42 arenas patrón, de las cuales 16 fueron arenas limpias, 17 fueron arenas con contenido de limo entre 0 [%] y 5 [%], 6 fueron arenas con contenido de limo entre 5 [%] y 10 [%], y las 3 restantes fueron arenas con 12 [%], 21 [%] y 48 [%] de contenido de limo. Más datos son necesarios para obtener una conclusión clara acerca de la ubicación de la línea de estado crítico para arenas con contenidos de limo superiores al 10 [%]. Si este estudio puede ser extendido a todos los suelos limosos es también cuestionable.

Grupo 2

Zlatovic e Ishihara (1995) obtuvieron líneas de estado crítico para mezclas de arena y limo no plástico. Ellos encontraron que las líneas de estado crítico se movían hacia abajo en el plano $e - \log p'$ hasta que el contenido de limo aumentaba a aproximadamente un 30 [%]; las líneas de estado crítico se movían entonces hacia arriba para representar el comportamiento del limo limpio. Thevanayagam et al. (2002) reportaron resultados similares. La ubicación de las líneas de estado crítico se desplazaba hacia abajo desde la posición de la arena limpia hasta alcanzar la posición correspondiente de una mezcla de arena – limo con un contenido de finos de un 40 [%]. Las líneas de estado crítico entonces se movían hacia arriba a la posición para un contenido de finos de un 100 [%], lo cual es limo limpio (figura 2-41). Naeini y Baziar (2004) observaron la misma tendencia.

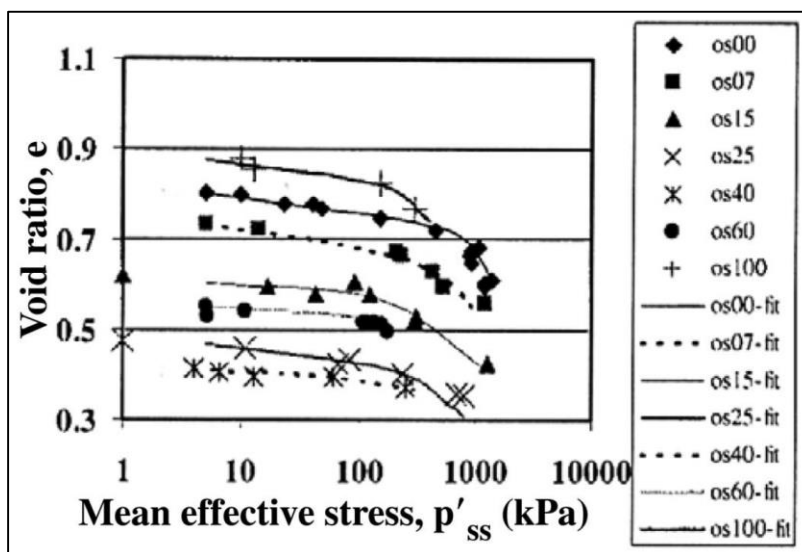


Figura 2-41: Líneas de estado crítico para arenas con contenido de finos entre 0 [%] y 100 [%] (Thevanayagam et al., 2002).

Factores que Controlan la Línea de Estado Crítico

Las pendientes de las líneas de estado crítico de mezclas de arena – limo son controladas por muchos factores, tales como la plasticidad del limo y la naturaleza de la arena y del limo. En los ensayos del grupo 1 y 2, Bouckovalas et al. (2003), Zlatovic e Ishihara (1995), y Thevanayagam et

al. (2002) utilizaron limos no plásticos. Sin embargo, no hay información para la plasticidad de los limos utilizados por Naeini y Baziar (2004) y Been y Jefferies (1985).

Poulos et al. (1985) mostraron que la pendiente de la línea de estado crítico es afectada por la gradación del suelo y la angularidad de sus granos. Cambios menores en la gradación pueden causar significativos cambios en la pendiente de la línea de estado crítico, y un aumento de la angularidad de los granos generalmente aumenta la pendiente de la línea de estado crítico. Olson (2001) también estableció que la angularidad de los granos podría afectar la pendiente de la línea de estado crítico más significativamente que el contenido de finos; él utilizó una base de datos con 38 especímenes de arena, arena limosa, limo arenoso, y limo. Él no observó tendencia alguna entre la línea de estado crítico y el contenido de finos.

CAPÍTULO 3. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

3.1. Introducción

En el presente capítulo se entrega un manual de procedimientos para realizar los ensayos de compresión triaxial CIU y CID en el laboratorio LEMCO y con el equipo triaxial marca “Humboldt” que se dispone. Este procedimiento está basado en las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 que rigen estos ensayos, con las debidas modificaciones para ser ejecutado con el equipo e implementos disponibles.

Cabe destacar, el procedimiento aquí expuesto es algo distinto al que se utilizó en los ensayos ejecutados para esta memoria, al menos en lo que se refiere a la obtención del área y volumen al comienzo de la etapa de corte, ya que en ese caso era necesario determinar con mucha mayor confiabilidad la relación de vacíos final de cada probeta.

3.2. Procedimientos Previos

3.2.1. Confección de Probeta

Las probetas utilizadas en este tipo de ensayos son cilíndricas y el procedimiento adoptado para su confección depende del tipo de probeta escogida. Ambas normas, ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11, poseen especificaciones idénticas con respecto a la preparación de las probetas a ensayar. Algunos de los puntos a destacar, y que ya fueron explicitados en el ítem 2.4.8.1, son los siguientes:

- La probeta debe tener un diámetro mínimo de 33 [mm].
- La relación (altura promedio/diámetro promedio) debe encontrarse 2 y 2,5.
- Una medición individual de altura o diámetro no debe variar con respecto al promedio en más de 2 [%].
- El tamaño máximo absoluto de las partículas utilizadas para la confección de la probeta debe ser menor a 1/6 del diámetro de la probeta.

Las probetas utilizadas para los diferentes ensayos de compresión triaxial en el laboratorio LEMCO son de 50 [mm] de diámetro y 100 [mm] de altura. Dicho esto, el tamaño máximo absoluto de partículas para este diámetro, es el dado por el tamiz N°4 (4,75 [mm]), por lo que el primer paso antes de confeccionar una probeta remoldeada es cortar el material en dicho tamiz.

A continuación se describen los procedimientos de confección para cada tipo de probeta utilizados por el laboratorio LEMCO, sólo detallándose un poco más el procedimiento asociado a probetas remoldeadas.

3.2.1.1. Confección de Probeta Inalterada

Remitirse al ítem 6.2 de cualquiera de las normas ASTM D4767-11 o ASTM D7181-11. Sólo se destaca el hecho que debe realizarse una o más determinaciones de humedad en el material recortado de la muestra y se debe determinar la masa y dimensiones de la probeta. Se debe realizar un mínimo de tres mediciones de altura (120° de separación) y al menos tres mediciones de diámetro en los cuartos puntos de la altura, esto para determinar la altura y diámetro promedio de la probeta. Con estos datos se calcula el volumen de la probeta, su densidad húmeda y densidad seca, siendo estos los valores que formarán parte del informe de ensayo.

3.2.1.2. Confección de Probeta Remoldeada

Remitirse al ítem 6.3 de cualquiera de las normas ASTM D4767-11 o ASTM D7181-11. El método de confección utilizado por el laboratorio LEMCO es el moist – tamping, o también conocido como wet – tamping o wet – deposition. La probeta es compactada a una densidad y humedad especificada, las cuales dependerán de los requerimientos del mandante y de la modelación que quiera realizarse del terreno. El método consiste en apisonar cada capa hasta que la masa de suelo húmeda acumulada en el molde es compactada a un volumen conocido.

Tal como se dijo en el ítem 2.4.8.1, en el caso de probetas sueltas, secas y sin cohesión, se requiere adicionalmente la incorporación de aire a succión en el molde para poder mantener la probeta sin que se desarme, debiendo colocarse la membrana tempranamente al comienzo de la confección de la probeta (se utiliza un molde especial que posibilita la confección sobre la cámara triaxial, evitando así el traslado que es prácticamente imposible en este caso). Independiente de esto, la mayoría de las veces la muestra si contiene humedad, originándose una cohesión aparente que permite que la probeta se mantenga en pie, con lo cual el método utilizado por el laboratorio LEMCO es el estándar. En relación a este último, un breve procedimiento “paso a paso” se presenta a continuación:

- 1) Registrar densidad seca y humedad de confección. Con estos datos se calcula la densidad húmeda de confección, la cual en conjunto con las dimensiones y, por ende, volumen deseado de la probeta, permiten calcular la masa húmeda de suelo necesaria para la confección.
- 2) Agregar agua sobre la masa de suelo seco hasta alcanzar la humedad deseada. Tener la precaución de preparar una cantidad de material un poco mayor a la que es calculada utilizando los datos de confección. El material debe ser mezclado homogéneamente y en la menor cantidad de tiempo posible para evitar pérdidas de material y humedad, o aumentos de esta última. Una vez mezclado, la fuente contenedora debe ser sellada con papel plástico “film” para dejarse curando durante al menos 16 [hrs] antes de la compactación. El curado asegura una distribución uniforme de la humedad y en algunos materiales plásticos el desarrollo de capas adsorbidas y propiedades especiales.
- 3) Preparar el molde partido. El uso de una mica por sobre sus paredes es opcional y se utiliza en suelos sin mucha cohesión para darle firmeza a la probeta durante su confección. Si se usa este implemento, el volumen deseado de probeta debe ser calculado considerando un diámetro inferior al inicial en una cantidad igual a dos veces el espesor de la mica. También, puede ser

recomendable untar algún agente lubricante sobre las paredes del molde, esto con la finalidad de facilitar la remoción de la mica.

Cabe destacar, existen moldes donde la probeta confeccionada es retirada mediante extrusión. No se recomienda su uso, ya que este método tiende a cambiar las dimensiones, a densificar y a causar heterogeneidades en la probeta.

- 4) Con el material curado y el molde partido preparado, se puede comenzar la compactación por capas para la confección de la probeta. Las(s) norma(s) establecen un mínimo de seis capas, esto con el objetivo de repartir homogéneamente la masa de suelo dentro del volumen especificado. Además, éstas establecen que el pisón debe tener un diámetro menor o igual a la mitad del diámetro de confección de la probeta. Al agregar al molde la masa de material correspondiente a una capa, el material restante en la fuente contenedora debe mantenerse sellado con papel plástico “film” para evitar disminuciones o aumentos de humedad. La superficie de cada capa debe ser escarificada antes de la adición del material para la siguiente capa, ya que con ello se asegura una mejor adhesión entre las mismas. En el laboratorio LEMCO, se considera adecuado para probetas de 100 [mm] de altura, un total de ocho capas del mismo espesor, donde la masa repartida equitativamente por capa es apisonada hasta alcanzar la altura deseada. Es deseable otorgar una cantidad e intensidad lo más parecida de golpes por capa, aunque esto no es una necesidad absoluta.
- 5) Con la probeta formada, y sus extremidades perpendiculares al eje longitudinal, se procede a determinar su masa y dimensiones con los dispositivos adecuados. Para la masa se utiliza una balanza calibrada de 0,01 [grs] de precisión y para las dimensiones un pie de metro de 0,02 [mm] respectivamente. Ambas normas establecen un mínimo de tres mediciones de altura (120° de separación) y tres mediciones de diámetro en los cuartos puntos de la altura, esto para determinar la altura y diámetro promedio de la probeta. Además, se debe realizar una o más determinaciones de humedad en el material en exceso utilizado para preparar la probeta. Con estos datos se recalcula el volumen de la probeta, su densidad húmeda y densidad seca, siendo estos los valores que formarán parte del informe de ensayo.

3.2.2. Montaje de Probeta

3.2.2.1. Preparaciones

Antes de montar la probeta en la cámara triaxial se debe hacer las siguientes preparaciones:

- 1) Inspeccionar la membrana en busca de orificios, defectos y fugas. Si se encuentra alguno descartarla inmediatamente.
- 2) Colocar la membrana en el expansor de membrana y aplicarle un vacío a través del ducto que tiene disponible para ello. La membrana debe quedar lo más estirada posible sobre el expansor, para que posteriormente al liberar el vacío y ajustarse la membrana a la probeta, no queden huecos susceptibles de llenarse de aire. La función de la membrana es aislar el agua que es utilizada para aplicar confinamiento a la probeta en cuestión. Cabe destacar, podría ser necesaria la utilización de dos membranas si es que la probeta poseyera partículas afiladas o susceptibles de romperla;

en este caso se debe considerar dos veces el espesor de la membrana para fines de corrección del esfuerzo desviatorio para cada nivel de deformación.

- 3) Comprobar que los discos porosos y líneas de drenaje de la probeta no estén obstruidas haciendo pasar aire o agua por donde corresponda. Los discos porosos cumplen la función de distribuir más homogéneamente el agua en la tapa y base de la probeta respectivamente.
- 4) Reunir discos de papel filtro y tiras o jaulas de papel filtro. Los discos de papel filtro son prácticamente obligatorios dado que su no utilización implica una posible obstrucción de los discos porosos con partículas de suelo. Con respecto a las tiras o jaulas de papel filtro, son opcionales, y mejoran el drenaje durante las distintas etapas de los ensayos.
- 5) Ubicar base de cámara triaxial en una posición cómoda para el laboratorista, con el objetivo de minimizar el desplazamiento de la probeta y evitar posibles accidentes.

3.2.2.2. Método de Montaje

- 1) Expulsar y eliminar, dentro de lo posible, las burbujas que puedan haber en las líneas que conectan con los recipientes que contienen a los “bladders”.
- 2) Dependiendo del tipo de suelo que fue utilizado para confeccionar la probeta, decidir si se utilizarán en estado húmedo o seco los discos porosos, discos de papel filtro y tiras o jaulas de papel filtro. Para materiales potencialmente hinchables, que poseen minerales arcillosos, es recomendable utilizarlos en estado seco. Para los materiales restantes un estado húmedo puede facilitar su colocación.
- 3) Para saturar discos porosos hacerlos hervir en agua durante 10 [min] aproximadamente, con esto se facilita su desobstrucción si es que no fueron descartados anteriormente. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- 4) Saturar discos, tiras y jaulas de papel filtro, sumergiéndolas dentro de lo posible en agua desaireada.
- 5) Untar grasa sobre los cabezales superior e inferior para prevenir la filtración del agua de la cámara hacia la probeta.
- 6) Colocar sobre la base de la cámara triaxial un disco poroso saturado, e inmediatamente sobre él, un disco de papel filtro saturado.
- 7) Colocar cuidadosamente sobre el disco de papel filtro la probeta a ensayar.
- 8) Colocar sobre la probeta el otro disco de papel filtro saturado, e inmediatamente sobre él, otro disco poroso saturado.
- 9) Colocar la jaula o tiras de papel filtro saturado alrededor de la probeta, de modo que no cubran más de un 50 [%] de su perímetro, ya que podría llegar a ser excesiva su influencia sobre la resistencia. Estas tiras o jaula deben tener una longitud superior a la probeta, pudiendo llegar hasta los discos porosos o ingresar levemente hasta el cabezal superior e inferior respectivamente. Para pegarlas se utiliza regularmente “masking tape”, pudiendo utilizarse otro elemento adhesivo

similar. Posteriormente se considera una corrección al esfuerzo desviatorio producto de la resistencia que le proporciona a la probeta el uso de las tiras o jaula de papel filtro.

- 10) El expansor con la membrana se hace pasar a través de la probeta y una vez alcanzada la posición deseada, se libera el vacío aplicado anteriormente. La idea es que quede un excedente de membrana más o menos igual en cada extremo de la probeta (cabezales superior e inferior). Con esto la membrana queda adherida y ajustada a la probeta. Posteriormente se considera una corrección al esfuerzo desviatorio producto de la rigidez aportada por la membrana.
- 11) Utilizar el anillo partido para colocar dos o-rings sobre la membrana y cabezal inferior de la probeta. Con esto se asegura el completo sellado en esta zona.
- 12) Posar otros dos o-rings sobre el anillo partido, el cual se hace pasar a través de la probeta y se deja en espera mientras se coloca y acomoda el cabezal superior. Este cabezal ya debería tener fijadas las líneas de drenaje superior, con lo que una vez bien acomodado y centrado, se liberan sobre él y la membrana los o-rings en cuestión. Con esto se asegura el completo sellado de la zona superior.
- 13) Retirar cuidadosamente el anillo partido de alrededor de la probeta.
- 14) Revisar y ajustar alineamiento de la probeta y de los demás implementos.
- 15) Revisar que el o-ring que tiene la base de la cámara triaxial esté bien establecido, ya que este es fundamental para que la tapa de la cámara quede bien posicionada y sellada.
- 16) Elevar el pistón de carga axial, adosado a la cámara triaxial, hasta su posición máxima. Luego, ensamblar tapa de cámara triaxial a su base y apretarla utilizando las perillas que posee para ello.
- 17) Llevar varias veces el pistón de carga axial en contacto con el cabezal superior de la probeta para permitir el correcto asentamiento y alineamiento del pistón con la tapa. Durante este procedimiento, se debe tener cuidado de no aplicar una carga axial sobre la probeta superior al 0,5 [%] de la carga axial estimada en la falla. Finalmente, dejar el pistón en contacto con el cabezal y fijarlo con la perilla lateral que posee.
- 18) Colocar la cámara triaxial en la plataforma de carga. Se debe tener cuidado de no pasar a llevar el LSCT (Linear Strain Conversion Transducer), ya que es una pieza extremadamente sensible a movimientos laterales.

3.2.3. Llenado de Cámara Triaxial

- 1) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, desconectar la línea “BLADDER A”.
- 2) Conectar la línea auxiliar de salida de aire a la parte superior de la cámara triaxial. Además, se debe colocar un recipiente que reciba el agua que saldrá por esta línea una vez que la cámara se haya llenado por completo.
- 3) Conectar la línea “CELL” de la sección “WATER CONNECTION” del panel a la entrada “CELL” de la cámara triaxial. Verificar que todas las válvulas de la cámara se encuentren cerradas, excepto la que está conectada con el panel.

- 4) Verificar que el panel se encuentre conectado a la red de agua potable.
- 5) Verificar que el pistón de carga axial esté en contacto con el cabezal superior de la probeta y que se encuentre fijado con la perilla lateral que posee la cámara triaxial.
- 6) Abrir llave de red de agua potable.
- 7) En el panel, mover lentamente la válvula “CELL” hacia la posición “FILL”. Las distintas conexiones en el panel deberían tener la disposición que muestra la figura 3-1.



Figura 3-1: Disposición del panel de distribución durante llenado de cámara triaxial.

- 8) Esperar a que se llene la cámara triaxial. Una vez llena, moverla lenta y cuidadosamente para permitir evacuar las burbujas de aire por la salida superior.
- 9) Cuando se estima que las burbujas son despreciables, mover la válvula “CELL” del panel hacia su posición central.
- 10) Desconectar la línea auxiliar conectada a la parte superior de la cámara triaxial.
- 11) Cerrar llave de red de agua potable.
- 12) En el panel, volver a conectar la línea “BLADDER A”.

3.2.4. Otros

- 1) Verificar conexiones en controlador de presión, aparato de medición de cambio volumétrico y prensa de carga. Además, verificar la presencia de dispositivos necesarios a usarse durante el ensayo, como son, dispositivo de medición de presión de poros, válvula solenoide, etc.
- 2) Verificar que el estanque de agua desaireada tenga un suministro suficiente, sino seguir procedimiento indicado en ANEXO G para su llenado y desaireado.
- 3) Verificar que los recipientes que contienen a los “bladders *A* y *B*” se encuentren llenos de agua, y que los mismos “bladders” no se encuentren excesivamente inflados. En caso contrario, seguir procedimiento indicado en ANEXO H.
- 4) Verificar que el aparato de medición de cambio volumétrico esté completamente saturado en su interior. Dado que este aparato es del tipo “caja negra”, no se puede saber a ciencia cierta su estado de saturación. Por ello, cada cierto tiempo de uso se recomienda enjuagarlo siguiendo el procedimiento indicado en ANEXO I.
- 5) Encender computador y abrir software “Humboldt”.
- 6) Encender controlador de presión (“Device 1”).
- 7) Encender prensa de carga (“Device 2”).
- 8) En el software, presionar la pestaña “New Test” y seleccionar el ensayo que se realizará, ya sea Consolidado No Drenado (“Consolidated Undrained”) o Consolidado Drenado (“Consolidated Drained”), tal como se muestra en la figura 3-2.

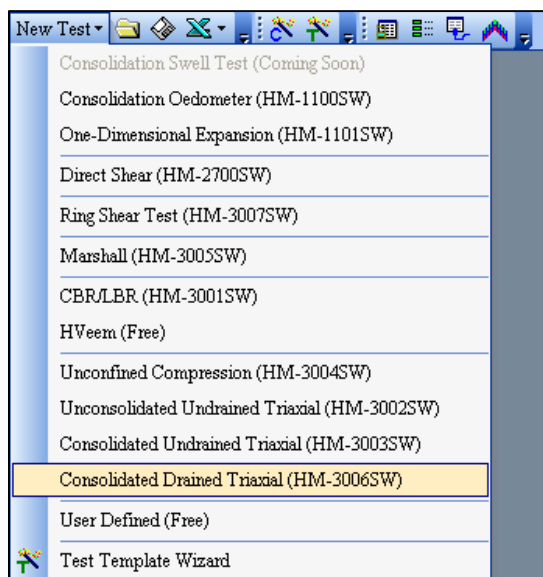


Figura 3-2: Selección de ensayo en software “Humboldt”.

- 9) Verificar que los dispositivos se encuentren interconectados con el software colocando el cursor sobre la barra lateral “Pressure/Load Controllers”. En la sección 1 (“Select Device”) se pueden observar directamente los equipos que se encuentran interconectados con el software. En este caso aparecen ambos dispositivos (“Device 1 y 2”). Además, en la parte inferior izquierda de la

pantalla se puede observar que en “Connected Devices” aparece el número 2, lo que corrobora esto. Todo esto puede ser apreciado en la figura 3-3.

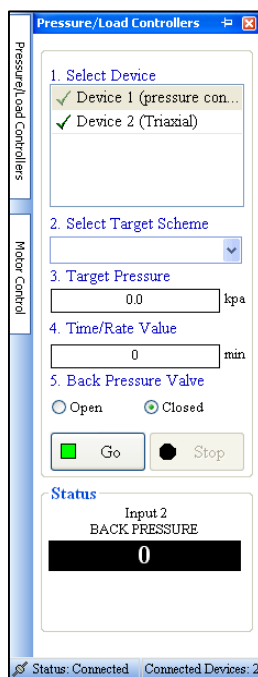


Figura 3-3: Pressure/Load Controllers.

Si alguno de los dispositivos no aparece conectado, se debe ir a la pestaña “Tools” y seleccionar “Scan Connected Devices”, luego verificar que se reconozcan los dispositivos.

Si hecho el último paso aún no se reconocen los dispositivos, entonces estos se deben apagar, volver a encender y repetir el procedimiento para verificar su interconexión con el software hasta que sean reconocidos.

- 10) En el manómetro que conecta con la línea de presión de aire del laboratorio (figura 3-4), verificar que el suministro de presión sea de aproximadamente 900 [kPa], sino aumentar manualmente con el regulador que tiene en su parte superior.



Figura 3-4: Manómetro de laboratorio LEMCO.

- 11) Verificar que la llave de paso de presión hacia el panel del equipo se encuentre abierta (figura 3-5).



Figura 3-5: Llave de paso de presión abierta.

- 12) En el panel, específicamente en la sección “SYSTEM AIR PRESSURE” (figura 3-6), revisar que su manómetro marque aproximadamente 900 [kPa], sino aumentar manualmente con el regulador que el panel posee para esto.



Figura 3-6: System Air Pressure.

- 13) Nuevamente en el software “Humboldt”, es necesario “llamar” las calibraciones que están guardadas en el controlador de presión y prensa de carga. Para ello, dirigirse a “Calibration” y luego a “Retrieve Calibration”, aparecerá la ventana emergente de la figura 3-7, seleccionar “Device 1 (pressure controller) -Connected” y presionar en “Retrieve”. Ahora, aparecerá la ventana de la figura 3-8, esperar a que el software reconozca los distintos transductores y luego presionar en “Store”.

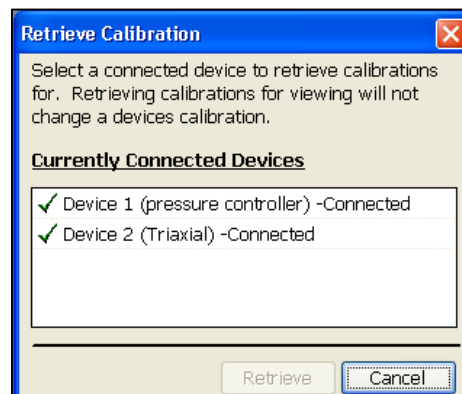


Figura 3-7: Retrieve Calibration.

Retrieve Device 1 (pressure controller) Calibration(s)

If Calibrations are not displayed appropriately to your right, click the buttons above each column to re-retrieve calibration.

Retrieve Input 1 Calibration
Retrieve Input 2 Calibration
Retrieve Input 3 Calibration
Retrieve Input 4 Calibration

Value Name	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4
Device ID	1	1	1	1
Input Name Configuration	CELL PRESSURE	BACK PRESSURE	PRESSURE 1	VOLUME 1
Configuration Zero	0	0	0	0
Configuration Max	900	500	700	108,1
Calibration Zero	4461	4866	4633	342
Calibration Zero Set	True	True	True	True
Calibration Max	7769	6693	7180	4127
Calibration Max Set	True	True	True	True
Calibration Gain	1	1	1	1
Calibration Slope	0,2721	0,2737	0,2748	0,0286
Use Custom Name	☐ Use custom name	☐ Use custom name	☐ Use custom name	☐ Use custom name
Custom Input Name				
Store Input Calibration	☒ Store calibration	☒ Store calibration	☒ Store calibration	☒ Store calibration

Store Cancel

Figura 3-8: Retrieve Device 1 (pressure controller) Calibration(s).

- 14) Repetir la secuencia del punto 13), pero ahora seleccionar “Device 2 (Triaxial) –Connected” y presionar en “Retrieve”. Aparecerá la ventana de la figura 3-9, esperar a que el software “Humboldt” reconozca los distintos transductores y luego presionar en “Store”

Retrieve Device 2 (Triaxial) Calibration(s)

If Calibrations are not displayed appropriately to your right, click the buttons above each column to re-retrieve calibration.

Retrieve Input 1 Calibration
Retrieve Input 2 Calibration
Retrieve Input 3 Calibration
Retrieve Input 4 Calibration

Value Name	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4
Device ID	2	2	Uncalibrated	Uncalibrated
Input Name Configuration	LOAD 1	DISPLACEMENT 2	Uncalibrated	Uncalibrated
Configuration Zero	0	0	Uncalibrated	Uncalibrated
Configuration Max	10	50	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Zero	2525	2644	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Zero Set	True	True	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Max	13522	40749	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Max Set	True	True	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Gain	8	8	Uncalibrated	Uncalibrated
Calibration Slope	0,0009	0,0013	Uncalibrated	Uncalibrated
Use Custom Name	☐ Use custom name	☐ Use custom name	☐ Use custom name	☐ Use custom name
Custom Input Name				
Store Input Calibration	☒ Store calibration	☒ Store calibration	☐ Store calibration	☐ Store calibration

Store Cancel

Figura 3-9: Retrieve Device 2 (Triaxial) Calibration(s).

- 15) Dirigirse a la sección “Project Information” (figura 3-10) y llenar los datos que se consideren necesarios.

Project Explorer		Project Information	
Project Information	Test Units	Metric	
Specimen A	Test Standard	American Standard Test Method (ASTM)	
Information	Project Name		
Setup	Project Number		
Tabulation	Sample Location		
Specimen B	Client		
Information	Job Number		
Setup	Sample Number		
Tabulation	Sample Description		
Specimen C	Date of Sampling		
Information	Sampling Time		
Setup	Date of Receiving Sample		
Tabulation	Received Time		
Specimen D	Boring Number		
Information	Remarks		
Setup			
Tabulation			

Figura 3-10: Project Information.

Specimen A Sample Information				
Specimen Information	Initial Specimen Parameters	Saturation Stage Parameters	Consolidation Stage Parameters	Final Specimen Parameters
Specimen Information				
Soil Description				
Depth				
Test Procedure				
Sample Type		Remolded		
Moulding Date				
Test Date				
Liquid Limit				
Plastic Limit				
Specific Gravity		2,650		
Test Temperature		Measured		
		Test temperature is measured in Fahrenheit		
Filter Paper Strips		Used		
Membrane Thickness (mm)		0,305		
Remarks				
Filter Paper Strips				
Copy Specimen Information				

Figura 3-11: Specimen Information.

16) Se puede ensayar hasta 4 probetas a distintos esfuerzos efectivos de consolidación para poder definir correctamente una envolvente de falla. Por tanto, dependiendo de la probeta que se esté ensayando, dirigirse a su sub-sección “Information” y a la pestaña “Specimen Information” (figura 3-11), luego llenar los datos correspondientes. Obligatoriamente se debe:

- Ingresar gravedad específica en “Specific Gravity”.
- Ingresar espesor de la membrana en “Membrane Thickness” (regularmente 0,3048 [mm]).
- Ingresar temperatura de ensayo en “Test Temperature”, aunque al no cambiar el valor por defecto el error es despreciable.

- Indicar el uso o no uso de tiras o jaula de papel filtro.

17) En la pestaña “Initial Specimen Parameters” (figura 3-12):

- Presionar “Specimen Dimensions Worksheet”, se desplegará la ventana de la figura 3-13, ingresar las medidas de altura y diámetro de la probeta.
- Presionar “Initial Moisture Information Worksheet”, se desplegará la ventana de la figura 3-14, ingresar los datos asociados al contenido de humedad.
- En “Initial Specimen Moist Weight”, ingresar masa húmeda de la probeta.

Specimen A Sample Information	
Specimen Information	Initial Specimen Parameters
Initial Specimen Parameters	
Specimen Dimensions Worksheet Click here to enter height and diameter information	
Initial Height (mm)	100,360
Initial Diameter (mm)	50,193
Initial Area (cm ²)	19,787
Initial Volume (cm ³)	198,581
Initial Moisture Information Worksheet Click here to enter trianning information	
Initial Moisture Content (%)	16,91
Initial Specimen Moist Weight (g)	410,120
Initial Dry Density (g/cm ³)	1,767
Initial Wet Density (g/cm ³)	2,065
Initial Saturation (%)	89,60
Initial Void Ratio	0,50
Initial Specimen Parameters	
Copy Specimen Information	

Figura 3-12: Initial Specimen Parameters.

Parameters	
Height Readings	Diameter Readings
1: 0,000 mm	1: 0,000 mm
2: 0,000 mm	2: 0,000 mm
3: 0,000 mm	3: 0,000 mm
Calculated Values	
Average Height:	0,000 mm
Average Diameter:	0,000 mm
Sample Area:	0,000 cm ²
Volume:	0,000 cm ³
Ok Cancel	

Figura 3-13: Specimen Dimensions Worksheet.

Parameters			
	Top Third	Middle Third	Bottom Third
Moist Weight of Soil + Container:	0,000	0,000	0,000
Weight of Dry Soil + Container:	0,000	0,000	0,000
Weight of Container:	0,000	0,000	0,000

Calculated Values				
Water Contents:	0.00	0.00	0.00	%
Average Water Contents:	0,00			%

Figura 3-14: Initial Moisture Information Worksheet.

3.3. Saturación

Tal como se dijo en el ítem 2.4.9, es necesario saturar completamente las probetas para poder medir correctamente durante el corte la variación en la presión de poros en ensayos no drenados y el cambio volumétrico en ensayos drenados.

En general, la saturación puede dividirse en tres sub-etapas: circulación de CO₂, percolación de agua desaireada y aplicación de contrapresión.

3.3.1. Circulación de CO₂

- 1) Verificar que el pistón de carga axial esté en contacto con el cabezal superior de la probeta y que se encuentre fijado con la perilla lateral que posee la cámara triaxial.
- 2) Con un pie de metro, medir la longitud de pistón que queda por sobre la cámara triaxial. Registrar esta medición como “LPS” (lectura al principio de la saturación) en milímetros.
- 3) Conectar un flujómetro al tanque con CO₂ y seguidamente su línea con otro flujómetro que se utiliza para una regulación más precisa.
- 4) Sumergir línea restante del último flujómetro en un recipiente con agua. Girar levemente la válvula del tanque y del primer flujómetro, para luego ajustar utilizando el último flujómetro hasta alcanzar un flujo que produzca un burbujeo constante de tres a cuatro burbujas por segundo.
- 5) En el controlador de presión, verificar que el regulador manual tenga todo el recorrido posible.
- 6) En el controlador de presión, tarar en cero las presiones de “CELL” y “BACK”. Con el regulador manual de presión, establecer una presión de cámara entre 15 y 20 [kPa]. Para que esta presión actúe sobre la probeta, se debe verificar que en la sección “WATER CONNECTION” del panel estén conectadas las líneas “CELL” y “BLADDER A”, que la válvula “CELL” esté en su posición central, que en la sección “AIR CONNECTION” del panel esté conectada la línea “CONTROLLER” y que su válvula esté en “ON”, y por último que en la cámara triaxial la válvula “CELL” esté abierta. Esta presión de cámara es utilizada para producir cierto esfuerzo efectivo en la probeta y así mantenerla sin desarmarse mientras el CO₂ circula a través de ella y ayudando

a expulsar el aire hacia su exterior. Mediante la práctica se ha encontrado que con estos valores de presión de cámara y flujo de CO₂ la probeta no sufre mayor alteración.

- 7) Conectar línea restante del flujómetro a línea “BASE” derecha de la cámara triaxial y abrir su válvula. Seguidamente abrir válvula “BASE” izquierda, sumergir su línea en un recipiente con agua, y dejar circulando CO₂ por al menos 5 [min]. En el recipiente con agua se debería notar un burbujeo, esto indica que el CO₂ está circulando por las líneas inferiores.
- 8) Pasados los 5 [min], cerrar válvula “BASE” izquierda y abrir válvula “TOP” derecha. Sumergir esta línea “TOP” en el recipiente con agua para verificar el flujo de CO₂ a través de la probeta. Dejar circulando el gas por al menos 15 [min] y repetir el proceso con la línea “TOP” izquierda.
- 9) Cerrar válvula “BASE” derecha, conectar línea del flujómetro a línea “TOP” derecha y abrir su válvula. Si es que no se ha hecho, abrir válvula “TOP” izquierda, sumergir su línea en un recipiente con agua, y dejar circulando CO₂ por al menos 5 [min].
- 10) Desmontar equipo para la circulación de CO₂, cerrar válvula del tanque y válvulas de la cámara triaxial.

3.3.2. Percolación de Agua Desaireada

- 1) Mantener presión de cámara aplicada durante fase de circulación de CO₂. Las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 establecen que este valor no debe superar los 35 [kPa], a no ser que sea debidamente justificado para controlar el hinchamiento. En general, para evitar pre-stresar la probeta, este valor no debe superar por ningún motivo al esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte.
- 2) Levantar una distancia prudente el pistón de carga axial, por ejemplo 5 [mm] desde el cabezal superior, y fijarlo con la perilla lateral que posee. Esto se debe hacer por precaución, ya que la probeta igual puede hinchar bajo la presión de cámara aplicada (aunque lo ideal es que no suceda).
- 3) En el panel, en la sección “WATER CONNECTION”, desconectar la línea “BLADDER B”.
- 4) El aparato de cambio volumétrico debe tener sus válvulas en posición bypass (central).
- 5) En el panel, girar válvula “PWP” hacia la posición “FILL”.
- 6) En la cámara triaxial, conectar línea “BASE” derecha con línea que sale desde la válvula solenoide. Esta válvula responde a pulsos eléctricos respecto de su apertura y cierre, los cuales son enviados por una bobina llamada solenoide. Eventualmente, este sistema es controlable vía software.
- 7) En el software, seleccionar la barra lateral “Pressure/Load Controllers” (figura 3-3), seleccionar “Device 1” y abrir la válvula solenoide seleccionando “Open” y presionando “Go”. De este modo, el agua desaireada vendrá por gravedad desde el estanque de agua desaireada, pasará por el panel de distribución (línea inferior “PWP”), luego por el aparato de medición de cambio volumétrico, para finalmente pasar a través de la válvula solenoide e ingresar por la línea “BASE” derecha.
- 8) En la cámara, abrir válvulas “BASE” derecha y “BASE” izquierda. Colocar un recipiente bajo la línea “BASE” izquierda para recibir el agua que cae por esta línea. Se debe mantener este flujo

hasta se sature esta línea, es decir, que no salgan más burbujas de ella. Con esto, se logra la saturación de la zona perimetral inferior y la expulsión del aire y/o CO₂ que pueda contener el disco poroso de este sector.

- 9) Cerrar válvula “BASE” izquierda y abrir “TOP” derecha. Colocar un recipiente bajo la línea “TOP” derecha para recibir el agua que cae por esta línea. Mantener este flujo hasta que se sature esta línea, es decir, que no salgan más burbujas de ella. Con esto, se logra un avance homogéneo del frente de saturación desde abajo hacia arriba, empujando en su camino el aire o CO₂ hacia el exterior.
- 10) Repetir punto anterior, pero con línea “TOP” izquierda.
- 11) En suelos cohesivos y/o relativamente impermeables es muy difícil percolar agua desaireada desde abajo hacia arriba. De hecho, en este tipo de suelos este procedimiento puede tomar varios días o incluso nunca concretarse dentro de un tiempo razonable. En estos casos, se recomienda saturar directamente las líneas “TOP”; para ello, se conecta una línea “TOP” con la línea que sale desde la válvula solenoide, mientras la restante expulsa agua hasta que no salgan más burbujas de ella.
- 12) Cerrar un momento todas las válvulas “BASE” y “TOP” en la cámara, verificar que línea “BASE” derecha esté conectada con la línea que sale desde la válvula solenoide, y conectar las líneas “TOP” derecha e izquierda al dispositivo de medición de presión de poros.
- 13) Abrir las válvulas “BASE” derecha y “TOP” derecha e izquierda. Seguidamente, abrir manualmente el despiche que está al comienzo del dispositivo de medición de presión de poros para posibilitar el llenado y la evacuación de las burbujas que puedan quedar en estas líneas. Una vez dejen de salir burbujas, se debe cerrar el despiche en cuestión.
- 14) En el panel, girar válvula “PWP” hacia su posición central.
- 15) En el panel, conectar la línea “BLADDER B”.
- 16) Esperar un tiempo razonable a que se establezca la presión de poros que se visualiza en la pantalla del controlador de presión. Una vez ocurra aquello, tarar la presión de poros “PRES” en el controlador en cuestión.
- 17) Finalmente, se debe verificar el nivel de saturación de la probeta a través de la medición del parámetro B de presión de poros de Skempton. Para fines prácticos, y tal como se indicó en el ítem 2.4.9.2, el parámetro B de presión de poros se puede definir del siguiente modo:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (2-24re)$$

$\Delta \sigma_3$ es un incremento en la presión de cámara y Δu es el cambio resultante de presión de poros medido bajo condiciones no drenadas. Si $B < 1$, es porque aún hay aire o CO₂ presente y se debe incrementar sucesivamente la contrapresión hasta disolver el gas atrapado. Ambas normas establecen un valor de $B \geq 0,95$ para dar por concluida la etapa de saturación, aunque en la práctica para suelos granulares es recomendable un valor de $B \geq 0,98$. Por su parte, las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 recomiendan un $\Delta \sigma_3 = 70$ [kPa] para suelos cohesivos, y la experiencia del laboratorio ha establecido un $\Delta \sigma_3$ entre 40 y 50 [kPa] para suelos granulares.

Dicho esto, para realizar la medición del parámetro B de presión de poros:

- Cerrar válvula “BASE” derecha en la cámara o válvula solenoide en el software “Humboldt”.
- Con el regulador de presión, incrementar manualmente la presión de cámara en $\Delta\sigma_3$.
- Medir el cambio en la presión de poros Δu una vez que se haya estabilizado en toda la probeta.
- Con $\Delta\sigma_3$ y Δu , calcular B . Si B es menor que el valor esperado, disminuir manualmente a la presión de cámara que había inicialmente y pasar a la etapa de aplicación de contrapresión. En caso contrario, se puede pasar directamente a la etapa de consolidación.

3.3.3. Aplicación de Contrapresión

Gran parte de la teoría asociada a la aplicación de contrapresión ya fue expuesta en el ítem 2.4.9.3. Sólo cabe re-destacar que se deben aplicar incrementos de contrapresión hasta alcanzar un valor final que permita disolver todo el gas presente en los poros y por ende posibilite la completa saturación de la probeta. La contrapresión es aplicada de este modo para no pre-estresar la probeta, es decir, evitar inducir esfuerzos efectivos mayores que el esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte. La idea es aumentar simultáneamente la presión de cámara y contrapresión en la misma magnitud, manteniendo siempre constante la diferencia entre ambas. Se debe cumplir lo siguiente:

- Para dar cumplimiento a las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11, la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión durante la sub-etapa de aplicación de contrapresión no debe superar los 35 [kPa], a no ser que sea debidamente justificado para controlar la hinchamiento. Además, esta diferencia por ningún motivo debe superar al esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte.

En general, basta con mantener los 15 a 20 [kPa] de presión de cámara aplicados desde el comienzo de la sub-etapa de circulación de CO_2 . Esto se explica por la forma en que trabaja el controlador de presión, ya que al aplicar con el regulador manual una presión, lo que se fija en realidad es la diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión, contrapresión que hasta antes de esta etapa fue siempre nula.

- Los incrementos de contrapresión no deben superar al esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte ni tampoco los 140 [kPa]. Aun así, en suelos cohesivos y/o muy impermeables igualmente se podría producir un leve pre-estrés durante las primeras fases de la aplicación de contrapresión. Para asegurarse de que esto no ocurra, la elección de los incrementos de contrapresión debe realizarse en conjunto con la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión, debiéndose cumplir la ecuación (2-28).

$$\begin{aligned}
 & (presión\ de\ cámara - contrapresión)_{durante\ aplicación\ de\ contrapresión} \\
 & + incremento\ de\ contrapresión \\
 & < esfuerzo\ efectivo\ de\ consolidación\ al\ comienzo\ de\ la\ etapa\ de\ corte
 \end{aligned}
 \tag{2-28re}$$

- Cada incremento de contrapresión debe mantenerse hasta que la presión de poros se estabilice a través de toda la probeta, es decir, que la presión de poros en toda la probeta llegue igual a la contrapresión total aplicada hasta ese momento.

Finalmente, se debe destacar que esta fase de la saturación se puede realizar de forma manual o automática utilizando el software “Humboldt”. El método manual se recomienda para suelos con un porcentaje de finos no muy importante (menor a un 20 [%]) y que no presenten gran plasticidad, ya que con ellos se puede saturar la probeta bastante rápido y sin tener que esperar en demasía entre cada incremento. El método automático es recomendable y necesario para suelos finos y con algo de plasticidad, donde el tiempo de espera entre incrementos y el tiempo total de saturación no es menor.

3.3.3.1. Método Manual de Aplicación de Contrapresión

- 1) En la cámara triaxial, verificar que válvula “BASE” derecha, conectada a través de su línea a la válvula solenoide, esté cerrada. La válvula “BASE” izquierda también debe estar cerrada.
- 2) En la cámara, verificar que válvulas “TOP” derecha e izquierda, conectadas a través de sus líneas al dispositivo de medición de presión de poros, se encuentren abiertas.
- 3) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, verificar que válvula “PWP” esté en su posición central y que esté conectada la línea “BLADDER B”.
- 4) En el software “Humboldt”, verificar que esté abierta la válvula solenoide.
- 5) El aparato de medición de cambio volumétrico debe tener sus válvulas en posición bypass (central).
- 6) Si es que se considera suficiente, mantener presión cámara (diferencia entre presión de cámara y contrapresión) aplicada desde fase de circulación de CO₂. Este valor debe cumplir con las medidas anteriormente mencionadas.
- 7) En el controlador, tarar presión de poros y contrapresión, aunque a esta altura ambas ya deberían ser cero.
- 8) En el software “Humboldt”, y para la probeta que se está ensayando, dirigirse a la sub-sección “Information”, luego a “Saturation Stage Parameters” y llenar los datos que ahí piden e información necesaria (figura 3-15).
 - En “Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data”, poner “NO”.
 - En “Automatically Grab B-Values from Tabulated Data”, poner “NO”.
 - “Initial Reference Height Reading” y “Final Reference Height Reading” se ingresan una vez finalizada la saturación.

Specimen A Sample Information																					
Specimen Information	Initial Specimen Parameters																				
Saturation Stage Parameters <table> <tr> <td>Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Initial Burette Reading (cc)</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Final Burette Reading (cc)</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Initial Reference Height Reading (mm)</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Final Reference Height Reading (mm)</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Height After Saturation (mm)</td> <td>100,360</td> </tr> <tr> <td>Area After Saturation (cm²)</td> <td>19,787</td> </tr> <tr> <td>Volume After Saturation (cm³)</td> <td>198,581</td> </tr> <tr> <td>Automatically Grab B-Values from Tabulated Data</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>B-Value</td> <td>0,00</td> </tr> </table> Saturation Stage Parameters		Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data	No	Initial Burette Reading (cc)	0,00	Final Burette Reading (cc)	0,00	Initial Reference Height Reading (mm)	0,000	Final Reference Height Reading (mm)	0,000	Height After Saturation (mm)	100,360	Area After Saturation (cm ²)	19,787	Volume After Saturation (cm ³)	198,581	Automatically Grab B-Values from Tabulated Data	No	B-Value	0,00
Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data	No																				
Initial Burette Reading (cc)	0,00																				
Final Burette Reading (cc)	0,00																				
Initial Reference Height Reading (mm)	0,000																				
Final Reference Height Reading (mm)	0,000																				
Height After Saturation (mm)	100,360																				
Area After Saturation (cm ²)	19,787																				
Volume After Saturation (cm ³)	198,581																				
Automatically Grab B-Values from Tabulated Data	No																				
B-Value	0,00																				

Copy Specimen Information

Figura 3-15: Saturation Stage Parameters.

9) Ahora, se procede a aplicar el primer incremento de contrapresión. Para ello:

- En la cámara triaxial abrir válvula “BASE” derecha y verificar que esté abierta la válvula solenoide en el software “Humboldt”.

En el controlador:

- Presionar la tecla “TARGET”.
- Presionar “F2” (“SET TARGET”) e ingresar la contrapresión deseada.
- Presionar nuevamente “TARGET” para escapar.
- Presionar “F4” (“RUN”) y seguidamente “F2” (“RUN TARGET”).
- Esperar que el controlador llegue al valor de contrapresión deseado y que la presión de poros se estabilice en toda la probeta. Dado que este método manual se utilizaría sólo en suelos bastante permeables, un tiempo de espera de 5 [min] podría ser más que suficiente
- Presionar “STOP” para fijar el incremento y verificar que la presión de poros “PRES” sea igual o muy similar a la contrapresión total “BACK” aplicada hasta ese momento. En caso que esto no sea así, se debe volver a aplicar el incremento de contrapresión y esperar más tiempo para que la presión de poros se estabilice.

El controlador de presión aumenta simultánea y automáticamente la presión de cámara, de forma que se mantenga siempre constante la diferencia entre la presión de cámara y contrapresión.

10) Si se quiere añadir otro incremento de contrapresión, volver al punto 9). Si se quiere realizar una medición del parámetro B de presión de poros, se deben seguir los mismos pasos que en la medición de B durante la etapa de percolación de agua desaireada.

- Cerrar válvula “BASE” derecha en la cámara o válvula solenoide en el software “Humboldt”.
 - Con el regulador de presión, aumentar manualmente la presión de cámara en $\Delta\sigma_3$.
 - Medir el cambio en la presión de poros Δu cuando esta se haya estabilizado en toda la probeta.
 - Con $\Delta\sigma_3$ y Δu , calcular el parámetro B . Si B es menor que el valor esperado, disminuir manualmente a la presión de cámara que había inicialmente, volver al punto 9) y aplicar otro incremento de contrapresión. En caso contrario, se da por finalizada la saturación de la probeta.
- 11) Registrar parámetro B de presión de poros al final de la saturación en el apartado “B-Value” de la pestaña “Saturation Stage Parameters” (figura 3-15).
- 12) Finalizado el proceso de saturación, posar el pistón de carga axial sobre el cabezal superior de la probeta, fijarlo con su perrilla lateral, y finalmente con un pie de metro medir la longitud de pistón que queda por sobre la cámara triaxial. Esta lectura se denomina “LFS” (lectura al final de la saturación) y es igual a “LPC” (lectura al principio de la consolidación), debiendo ser registradas en milímetros.
- 13) Para que los cálculos sean realizados correctamente durante la etapa de corte, es sumamente importante ingresar la información referente a “Initial Reference Height Reading” y “Final Reference Height Reading” (figura 3-15). Estas alturas iniciales y finales de referencia durante la saturación, permiten contabilizar la variación de altura y volumen que experimenta la probeta durante esta etapa del ensayo. Ingresarlas del siguiente modo:

$$\text{Initial Reference Height Reading} = LPS \quad (3-1)$$

$$\text{Final Reference Height Reading} = LFS \quad (3-2)$$

$$\text{Variación de altura durante saturación} = \Delta H_s = LFS - LPS \quad (3-3)$$

$$\text{Variación de volumen durante saturación} = \Delta V_s = \frac{3 * V_0 * \Delta H_s}{H_0} \quad (3-4)$$

Donde:

LPS : Lectura al principio de la saturación.

LFS : Lectura al final de la saturación.

V_0 : Volumen inicial de la probeta.

H_0 : Altura inicial de la probeta.

En las ecuaciones (3-3) y (3-4) un resultado negativo indica una disminución de la altura y el volumen durante la saturación.

3.3.3.2. Método Automático de Aplicación de Contrapresión

- 1) En el software “Humboldt”, verificar que esté cerrada la válvula solenoide.

- 2) En la cámara, verificar que válvula “BASE” derecha, conectada a través de su línea a la válvula solenoide, esté abierta. La válvula “BASE” izquierda debe estar cerrada.
- 3) En la cámara, verificar que válvulas “TOP” derecha e izquierda, conectadas a través de sus líneas al dispositivo de medición de presión de poros, se encuentren abiertas.
- 4) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, verificar que la válvula “PWP” esté en su posición central y que esté conectada la línea “BLADDER B”.
- 5) El aparato de medición de cambio volumétrico debe tener sus válvulas en posición bypass (central).
- 6) Si es que se considera suficiente, mantener presión cámara (diferencia entre presión de cámara y contrapresión) aplicada desde fase de circulación de CO₂. Este valor debe cumplir con las medidas anteriormente mencionadas.
- 7) En el controlador de presión, tarar presión de poros y contrapresión, aunque a esta altura ambas ya deberían ser cero.
- 8) En el software “Humboldt”, y para la probeta que se está ensayando, dirigirse a la sub-sección “Information”, luego a “Saturation Stage Parameters” y llenar los datos que ahí piden e información necesaria (figura 3-15).
 - En “Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data”, poner “NO”.
 - En “Automatically Grab B-Values from Tabulated Data”, poner “YES”.
 - “Initial Reference Height Reading” y “Final Reference Height Reading” se ingresan una vez finalizada la saturación.
- 9) En la sub-sección “SETUP”, específicamente en la pestaña “Phase 1: Saturation”, llenar cada una de las sub-pestañas.
 - Completar la sub-pestaña “Saturation Channels” como se muestra en la figura 3-16.
 - Completar la sub-pestaña Logging Type (figura 3-17) del siguiente modo:
 - En “Condition”, poner “Pressure Increment Interval”.
 - En “Value”, ingresar la magnitud de los incrementos de contrapresión. Se debe tener en cuenta que este mismo valor es utilizado por el software Humboldt para realizar mediciones del parámetro *B* de presión de poros de forma automática.
 - En “Time to Pressure Value”, poner el tiempo que se quiere usar para llegar al valor de presión de cámara y contrapresión deseados (tiempo para llegar a la totalidad del incremento). En general, este valor no es muy importante y pierde importancia si se siguen las medidas anteriormente mencionadas para elegir la diferencia entre presión de cámara y contrapresión e incrementos de contrapresión. Además, si los incrementos no son de gran magnitud, dejar este valor en 0 es más que suficiente, ya que el software por defecto asume 45 segundos.
 - En “Time to Spend at Pressure Value”, ingresar el tiempo que se desea mantener cada incremento de contrapresión. Como se dijo anteriormente, este valor debe ser suficiente

para que se establezca la presión de poros a través de toda la probeta. Se recomienda utilizar valores elevados (por ejemplo 1 [hr]) de tal modo que la saturación se concrete en un tiempo no menor (12-24 [hr]) en el caso de suelos muy finos, impermeables y/o cohesivos.

Specimen A Test Setup		
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation	Phase 3: Shear
Saturation Channel(s)	Logging Type	Stop Condition
Shear Stage Logging Inputs		
Select Cell Pressure Device (HM2450A Required)	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Select Cell Pressure Input	◆ Input 1 (CELL PRESSURE)	
Select Back Pressure Device (HM2450A Required)	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Select Back Pressure Input	◆ Input 2 (BACK PRESSURE)	
Select Pore Pressure Device (Required)	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Select Pore Pressure Input	◆ Input 3 (PRESSURE)	
Select Volume Change Device (Optional)	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Select Volume Change Input	◆ Input 4 (VOLUME)	
Shear Stage Logging Inputs		
		Open Template Run Test

Figura 3-16: Saturation Channels.

Specimen A Test Setup		
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation	Phase 3: Shear
Saturation Channel(s)	Logging Type	Stop Condition
Logging Type		
Condition	Pressure Increment Interval	
Value	25,0	
Time to Pressure Value	0	
Time to Spend at Pressure Value	01:00:00	
Logging Type		
		Open Template Run Test

Figura 3-17: Logging Type - Saturation.

- Completar la sub-pestaña “Stop Condition” (figura 3-18) del siguiente modo:

- En “B-Value”, ingresar el valor del parámetro B de presión de poros para que se dé por finalizada la saturación. $B \geq 0,95$ para suelos cohesivos y para suelos granulares se recomienda $B \geq 0,98$.
- “Pressure Max” es otra condición de detención y dice relación con la máxima contrapresión hasta la que se está dispuesto a llegar para saturar la probeta.

Se pueden ingresar ambas condiciones de detención o sólo una de ellas, dado que la saturación se detiene cuando se cumple al menos una.

- 10) En la sub-sección “SETUP”, específicamente en la pestaña “Phase 1: Saturation”, presionar “Run Test” para comenzar esta fase. Una vez terminada la saturación, el software avisará, teniendo que detenerse manualmente.
- 11) Se recomienda corroborar la saturación de la probeta realizando manualmente una medición del parámetro B de presión de poros, tal como ha sido indicado en el punto 10) del “Método Manual de Aplicación de Contrapresión”.

Specimen A Test Setup					
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation				
Saturation Channel(s)	Logging Type				
Stop Condition <table border="1"> <tr> <td>B-Value</td> <td>0.98</td> </tr> <tr> <td>Pressure Max</td> <td>400</td> </tr> </table>		B-Value	0.98	Pressure Max	400
B-Value	0.98				
Pressure Max	400				
Open Template Run Test					

Figura 3-18: Stop Condition - Saturation.

- 12) Finalizado el proceso de saturación, posar el pistón de carga axial sobre el cabezal superior de la probeta, fijarlo con su perrilla lateral, y finalmente con un pie de metro medir la longitud de pistón que queda por sobre la cámara triaxial. Esta lectura se denomina “LFS” (lectura al final de la saturación) y es igual a “LPC” (lectura al principio de la consolidación), debiendo ser registradas en milímetros.
- 13) Para que los cálculos sean realizados correctamente durante la etapa de corte, es sumamente importante ingresar la información referente a “Initial Reference Height Reading” y “Final Reference Height Reading” (figura 3-15). Para ingresar estas alturas de referencia, seguir las instrucciones del punto 13) del “Método Manual de Aplicación de Contrapresión”.

3.4. Consolidación

La consolidación intenta reproducir el nivel de tensiones iniciales del suelo en terreno, estableciéndose en este caso bajo una secuencia tensional isotrópica. Asimismo, la interpretación de las curvas que relacionan la deformación o variación volumétrica con el tiempo, entregan parámetros útiles para el cálculo de la velocidad de deformación o corte a utilizarse durante la etapa de corte.

3.4.1. Procedimientos Previos

- 1) Verificar que en la cámara estén cerradas las válvulas “BASE” derecha e izquierda y abiertas las válvulas “TOP” derecha e izquierda. Además, estas dos últimas deben estar conectadas a través de sus líneas al dispositivo de medición de presión de poros y la válvula “BASE” derecha a través de su línea a la válvula solenoide.
- 2) En el controlador de presión, la presión de poros debería ser igual o muy similar a la contrapresión. Esto sucede por el hecho de que la probeta se encuentra consolidada bajo ese esfuerzo efectivo, que es igual a la diferencia entre la presión de cámara y la presión de poros. Teniendo en cuenta este valor de presión de poros, posteriormente se deberá aumentar la presión de cámara hasta que su diferencia sea igual al esfuerzo efectivo de consolidación que se desea al comienzo de la etapa de corte.

Por ejemplo, se tiene:

Presión de Cámara: “CELL” = 200 [kPa].

Contrapresión: “BACK” = 180 [kPa].

Presión de Poros: “PRES” = 181 [kPa].

Por lo tanto, al final de la saturación, la probeta se encuentra consolidada $(200 - 181) = 19$ [kPa]. Dicho esto, si se quiere que el esfuerzo efectivo de consolidación al comienzo de la etapa de corte sea de 50 [kPa], posteriormente se deberá aumentar la presión de cámara hasta $(181 + 50) = 231$ [kPa].

- 3) En la pestaña “Consolidation Stage Parameters”, llenar los datos que se piden e información necesaria (figura 3-19).
 - En “Automatically Grab Pressure Values from Tabulated Data”, poner “NO”.
 - En “Cell Pressure” y “Back Pressure”, ingresar presión de cámara calculada en el punto anterior y como contrapresión registrar la actual presión de poros que indica el controlador.
 - En “Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data” poner “YES”. Esta instrucción indica al software que deben registrarse la lectura inicial y final del aparato de cambio volumétrico durante la consolidación, para así contabilizar el cambio de volumen durante esta etapa.
 - “Initial Reference Height” y “Final Reference Height” son ingresados una vez terminada la consolidación.

Specimen A Sample Information				
Specimen Information	Initial Specimen Parameters	Saturation Stage Parameters	Consolidation Stage Parameters	Final Specimen Parameters
<u>Pressure Settings</u>				
Automatically Grab Pressure Values from Tabulated Data No				
Cell Pressure (KPa)		400,000		
Back Pressure (KPa)		300,000		
Effective Consolidation Pressure (KPa)		100,000		
<u>Consolidation State Parameters</u>				
Automatically Grab Burette Values from Tabulated Data Yes				
Initial Burette Reading (cc)		51,62		
Final Burette Reading (cc)		0,00		
Initial Reference Height (mm)		0,000		
Final Reference Height (mm)		0,000		
Height After Consolidation (mm)		100,360		
Area After Consolidation (cm ²)		14,643		
Volume After Consolidation (cm ³)		146,961		
Area After Consolidation (cm ²)				
Copy Specimen Information				

Figura 3-19: Consolidation Stage Parameters.

4) En la sub-sección “SETUP”, específicamente en la pestaña “Phase 2: Consolidation”, llenar cada una de las sub-pestañas.

- Completar la sub-pestaña “Consolidation Channels” como se muestra en la figura 3-20. Elegir la dirección del flujo en el apartado “Valve” según las siguientes indicaciones:
- Si el brazo palanca del aparato de medición de cambio volumétrico está ubicado al centro, entonces tendrá carrera suficiente en ambos sentidos (arriba y abajo), por lo que se puede seleccionar cualquier posición para la válvula en el aparato de medición de cambio volumétrico (“Flow Up” o “Flow Down”).
- Si el brazo palanca del aparato de medición de cambio volumétrico está por debajo de la posición central, se recomienda seleccionar “Flow Up”.
- En caso contrario, se recomienda seleccionar “Flow Down”.

Se debe tener en cuenta que en el caso de un ensayo de compresión triaxial CID, el flujo debe ser necesariamente establecido como “Flow Down” para registrar correctamente las variaciones volumétricas durante la etapa de corte. Por lo tanto, se debe tener la precaución que haya el recorrido suficiente en esa dirección.

- En la sub-pestaña “Logging Type” (figura 3-21), se deben ingresar los intervalos de tiempo para graficar las curvas de la consolidación. Para ello, se debe presionar en “Click here to create/edit the logging time table”, aparecerá la ventana emergente de la figura 3-22, donde se deben ingresar los tiempos en los cuales se quiere recolectar lecturas de cambio volumétrico. Cabe destacar, el software “Humboldt” trae por defecto una tabla de tiempos de recolección. Sin embargo, para la mayoría de los suelos se recomienda utilizar los tiempos que indica la tabla 3-1. Según la experiencia del laboratorio, estos tiempos son adecuados

para definir correctamente las curvas de la consolidación, aunque están sujetos a cambios según el tipo de suelo y tiempo que demore en consolidar.

Specimen A Test Setup		
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation	Phase 3: Shear
Consolidation Channels	Logging Type	Stop Condition
Consolidation Stage Logging Input		
Select Volume Device	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Select Volume Input	◆ Input 4 (VOLUME)	
Valve	Flow Up	
Select Pressure Controller Device (HM2450A Optional)	✓ Device 1 (pressure controller) -Connected	
Consolidation Stage Logging Input Open Template Run Test		

Figura 3-20: Consolidation Channels.

Specimen A Test Setup		
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation	Phase 3: Shear
Consolidation Channels	Logging Type	Stop Condition
Logging Condition		
Condition	Elapsed Time Table	
Click here to create/edit the logging time table.		
Table Interval 1	00:00:00	
Table Interval 2	00:00:00	
Table Interval 3	00:00:00	
Table Interval 4	00:00:00	
Table Interval 5	00:00:00	
Table Interval 6	00:00:00	
Table Interval 7	00:00:00	
Table Interval 8	00:00:00	
Table Interval 9	00:00:00	
Table Interval 10	00:00:00	
Table Interval 11	00:00:00	
Table Interval 12	00:00:00	
Table Interval 13	00:00:00	
Table Interval 14	00:00:00	
Click here to create/edit the logging time table.		
Open Template Run Test		

Figura 3-21: Logging Type - Consolidation.

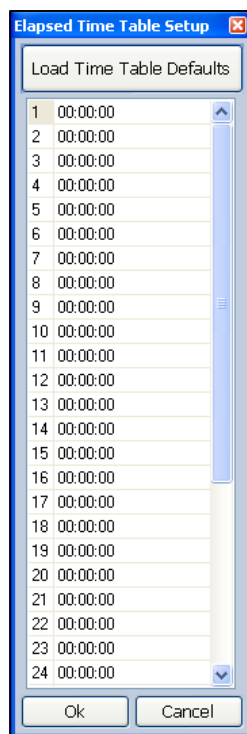


Figura 3-22: Elapsed Time Table Setup.

Tabla 3-1: Tiempos de recolección utilizados regularmente por el laboratorio LEMCO durante la consolidación.

N°	Tiempo
1	0:00:06
2	0:00:10
3	0:00:15
4	0:00:20
5	0:00:45
6	0:01:00
7	0:02:00
8	0:04:00
9	0:06:00
10	0:09:00
11	0:12:00
12	0:16:00
13	0:20:00
14	0:25:00
15	0:40:00
16	1:00:00
17	1:30:00
18	2:00:00
19	3:00:00
20	4:00:00
21	6:00:00
22	8:00:00
23	12:00:00
24	24:00:00
25	48:00:00

- En la sub-pestaña “Stop Condition” (figura 3-23), seleccionar “User Stop”.



Figura 3-23: Stop Condition - Consolidation.

- 5) En el aparato de medición de cambio volumétrico, mover la válvula izquierda a la posición “Volumen Change” y la válvula derecha a la posición ingresada en la sub-pestaña “Consolidation Channels” (figura 3-20). Esta disposición se muestra en la figura 3-24.

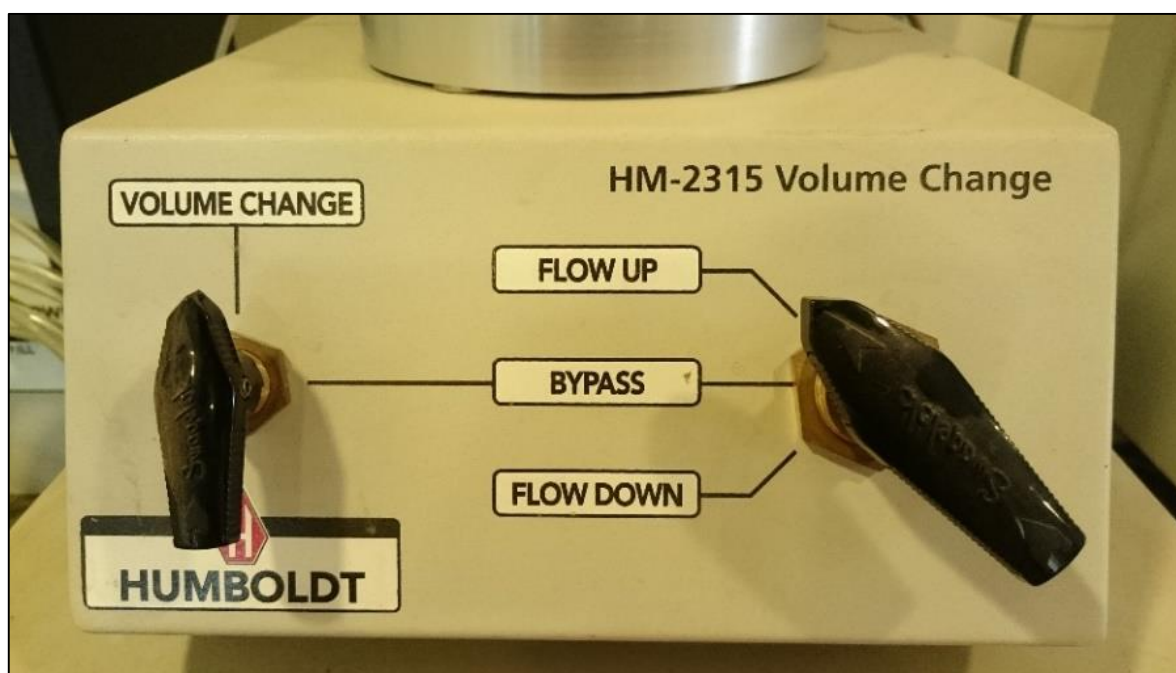


Figura 3-24: Disposición de válvulas en aparato de medición cambio volumétrico durante la consolidación.

3.4.2. Inicio Fase de Consolidación

- 1) En el software “Humboldt”, y en la pestaña “Phase 2: Consolidation”, presionar “Run Test”.

[illegible]

Figura 3-25: Solicitud de condición de partida de consolidación.

- 2) Se abrirá la tabla de registro de datos y pedirá una condición de partida (figura 3-25). Ingresar, dependiendo de la dirección del flujo, una lectura de bureta levemente superior o inferior a la que actualmente se indica en amarillo en el software “Humboldt”. Si la dirección del flujo es “Flow Down”, el valor ingresado debe ser 0,1 o 0,2 [cc] menor, y viceversa en caso que la dirección del flujo sea “Flow Up”. Presionar “Ok” para continuar.
- 3) Aparecerá una ventana denominada “Effective Pressure”. En el controlador de presión, incrementar manualmente la presión de cámara hasta alcanzar el valor que se indica en esta ventana. Luego, presionar “Done” para continuar con el ensayo.
- 4) Finalmente, abrir lentamente la válvula “BASE” derecha para permitir el drenaje en la probeta.
- 5) El software irá registrando los datos de cambio volumétrico de acuerdo a los intervalos de tiempo seleccionados en la sub-pestaña “Logging Type” (figura 3-21).
- 6) Para dar por finalizada la consolidación presionar en “Stop Test”. Existen varios criterios para dar por finalizada la consolidación, aunque todos convergen al mismo principio, esto es, que haya sido completamente disipado el exceso de presión de poros. Recordar que para el análisis de la curva que relaciona la deformación con el logaritmo del tiempo, se requiere terminar la consolidación primaria y alcanzar suficientemente la consolidación secundaria. Por motivos de tiempo y considerando una simple relación costo/beneficio, esto regularmente no se hace y se detiene el proceso de consolidación cuando se ha alcanzado un porcentaje importante de la consolidación total, o lo que es equivalente, cuando no se registran cambios volumétricos de

importancia y/o ha sido disipado la mayor parte del exceso de presión de poros. En fin, se recomienda no utilizar un único criterio de detención, sino una mezcla de ellos.

- Que la presión de poros sea muy similar o la misma que había antes de incrementar la presión de cámara. Además, al cerrar la válvula “BASE” derecha en la cámara triaxial, la presión de poros no debe aumentar ostensiblemente.
 - Que no exista más cambio volumétrico o que este sea muy pequeño, es decir, que cualquiera de las curvas de consolidación tienda a ser horizontal o a tener una pendiente muy pequeña.
 - Que esté completamente bien definida la curva de consolidación.
- 7) Una vez finalizada la consolidación, cerrar válvula “BASE” derecha, posar y fijar el pistón de carga axial sobre el cabezal superior de la probeta, y realizar medición de la longitud de pistón que queda por sobre la cámara triaxial. Esta medición se debe realizar con un pie de metro y registrarse como “LFC” (lectura al final de la consolidación) en milímetros.
- 8) En el software “Humboldt”, redirigirse a la sub-sección “Information”, luego a “Consolidation Stage Parameters” (figura 3-19), y llenar los apartados “Initial Reference Height” y “Final Reference Height”. Estas alturas iniciales y finales de referencia durante la consolidación, permiten contabilizar la variación de altura que experimenta la probeta durante esta etapa del ensayo. Ingresarlas del siguiente modo:

$$\text{Initial Reference Height} = LPC \quad (3-5)$$

$$\text{Final Reference Height} = LFC \quad (3-6)$$

$$\text{Variación de altura durante consolidación} = \Delta H_c = LFC - LPC \quad (3-7)$$

Donde:

LPC: Lectura al principio de la consolidación.

LFC: Lectura al final de la consolidación.

En la ecuación (3-7) un resultado negativo indica una disminución de la altura durante la consolidación. Obviamente, la variación de volumen durante la consolidación (ΔV_c) es registrada automáticamente por el software, el cual una vez terminada esta etapa, llena los apartados “Initial Burette Reading” y “Final Burette Reading” (figura 3-19).

3.5. Corte o Aplicación de Esfuerzo Desviatorio

Tal como se dijo en el ítem 2.4.11, esta es la última etapa de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, donde se lleva a falla la probeta a través del aumento de su esfuerzo axial por sobre el isotrópico definido durante la consolidación y que se mantiene constante como esfuerzo total radial o lateral. En esta etapa y para cada nivel de deformación que se registre, son medidos la carga axial, el cambio volumétrico en el ensayo de compresión triaxial CID y la variación en la presión de poros en el ensayo de compresión triaxial CIU.

3.5.1. Velocidad de Carga

En el ensayo de compresión triaxial CID se admite el drenaje, y la velocidad de deformación debe ser suficientemente lenta como para posibilitar la completa y continua disipación del exceso de presión de poros en cada instante. Producto de esto, en este ensayo obtienen directamente esfuerzos principales efectivos.

Por su parte, en el ensayo de compresión triaxial CIU no se admite el drenaje, por lo que la velocidad de deformación puede ser algo mayor que en un ensayo de compresión triaxial CID. No obstante, esta velocidad debe ser suficientemente lenta como para posibilitar un continuo equilibrio de la presión de poros a través de toda la probeta en cada instante. En este ensayo se obtienen directamente esfuerzos principales totales, y con la utilización de la presión de poros se pueden expresar como esfuerzos principales efectivos.

En el ítem 2.4.11.1 ya fueron expuestas las expresiones que indican las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11 para calcular la máxima velocidad de deformación que puede utilizarse para cortar la probeta en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, respectivamente. Estas expresiones están en función de los parámetros t_{50} y t_{90} , y para mayor claridad y comodidad se re-enuncian a continuación:

Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y No Drenado (CIU)

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{10t_{50}} \quad (2-31\text{re})$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{10t_{50}} \quad (2-32\text{re})$$

Donde:

ϵ_{af} : Deformación axial unitaria tentativa en la falla, [%].

t_{50} : Tiempo necesario para alcanzar el 50 [%] de la consolidación primaria, ítem 2.2.3.3.

Ensayo de Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y Drenado (CID)

Con tiras o jaula de papel filtro:

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{16t_{90}} \quad (2-33\text{re})$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{16t_{90}} \quad (2-34\text{re})$$

Sin tiras o jaula de papel filtro:

$$\text{Si } \epsilon_{af} \geq 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{4 [\%]}{10t_{90}} \quad (2-35\text{re})$$

$$\text{Si } \epsilon_{af} < 4 [\%]: \quad \dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{af}}{10t_{90}} \quad (2-36\text{re})$$

Donde:

t_{90} : Tiempo necesario para alcanzar el 90 [%] de la consolidación primaria, ítem 2.2.3.3.

En general, la misma velocidad de corte debe ser utilizada para probetas iguales consolidadas bajo distintos esfuerzos efectivos de consolidación. Esto implica, para la primera probeta consolidada, tener que elegir una velocidad suficientemente menor a la velocidad de corte crítica o máxima que arroje su análisis efectuado. De este modo, se busca asegurar que en las probetas restantes por consolidar y ensayar, se cumpla que la velocidad escogida inicialmente sea menor o igual que la velocidad máxima que arroje su análisis en particular.

Tal como se informó en el ítem 2.2.3.3, el parámetro t_{50} se puede obtener directamente de la curva que relaciona la variación de volumen con el logaritmo del tiempo, y el t_{90} con aquella que relaciona esta variación con la raíz del tiempo. Sin embargo, ambos parámetros se relacionan entre sí por sus factores de tiempo T_x . Esta relación se muestra en la ecuación (3-8) y posibilita la utilización de cualquiera de los gráficos nombrados independiente del parámetro que se necesite.

$$t_{90} \rightarrow T_{90} = 0,848$$

$$t_{50} \rightarrow T_{50} = 0,197$$

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4,305} \quad (3-8)$$

Ahora, si es que la forma de las curvas obtenidas de la consolidación tienen irregularidades muy importantes, las cuales incluso pueden dificultar su análisis, en el software “Humboldt” dirigirse a la sub-sección “Tabulation” y en la pestaña “Consolidation” (figura 3-26) modificar el/los valor/es de “Burette Reading” que estén causando el inconveniente.

Consolidated Undrained Consolidation (Data Entry)			
Saturation	Consolidation		Shear
Reading No.	Elapsed Time (00:00:00)	Burette Reading (cc)	Volume Change (cc)
0	00:00:00	2,11	N/A
1	00:00:01	2,11	0,00
2	00:00:03	2,11	0,00
3	00:00:04	2,11	0,00
4	00:00:05	2,13	0,03
5	00:00:06	2,13	0,03
6	00:00:07	2,16	0,05
7	00:00:13	2,19	0,08
8	00:00:16	2,19	0,08
9	00:00:31	2,24	0,14
10	00:01:01	2,30	0,19
11	00:02:01	2,41	0,30
12	00:05:01	2,65	0,55
13	00:10:02	2,90	0,79
14	00:20:02	3,14	1,04
15	00:40:03	3,31	1,20
16	01:00:04	3,36	1,26
17	02:00:08	3,45	1,34
18	04:00:14	3,47	1,37
19	15:07:31	3,47	1,36
20	15:46:41	3,47	1,36
21		0,00	0,00

Re-retrieve Test Data

Figura 3-26: Tabulation – Consolidation.

En el caso que las curvas de consolidación tengan una forma demasiado caótica y que sean imposibles de analizar, se entrega como referencia en la tabla 3-2, dos velocidades suficientes para ensayar un material tan común como lo es una arena limosa (SM) en probetas de 100 [mm] de altura.

Tabla 3-2: Velocidades referenciales de deformación para una SM y según el tipo de ensayo.

	CIU	CID
$\dot{\epsilon}$ [%/min]	0,130	0,080

En los siguientes puntos se describen los procedimientos para obtener la velocidad máxima de deformación o corte según el gráfico de consolidación del software “Humboldt” que se desee utilizar. Se recomienda utilizar el gráfico variación volumen – raíz del tiempo, ya que es más fácil la obtención del parámetro t_{90} , no es estrictamente necesario entrar en la consolidación secundaria y usualmente esta curva se define mucho mejor.

3.5.1.1. Obtención de Velocidad Máxima de Corte – “Square-Root Time”

- 1) Dirigirse a la sección “Graphs” y seguidamente a la sub-sección “Square-Root Time”.
- 2) Presionar en “t90 Calculations Tool (SQR)”. Aparecerá una ventana emergente (cuadro pequeño en figura 3-27).
- 3) Seleccionar la deformación estimada en la falla en “Estimated Failure Strain”. Este valor es regularmente 4 [%].
- 4) Presionar en “Draw Tangent” y dibujar una tangente por la porción prematura de la curva (línea AB en figura 3-27). Automáticamente se dibujara una recta AC con una pendiente tal que $OC = 1,15OB$.

- 5) Presionar en “Select t₉₀” y seleccionar la intersección de la curva de la consolidación con la recta AC, es decir, el punto D. La abscisa de este punto es igual a $\sqrt{t_{90}}$ y este parámetro se ve reflejado en la ventana emergente.
- 6) Alternativamente, los puntos 4 y 5 de este ítem se pueden hacer automáticamente presionando el botón “Auto” en la ventana emergente.
- 7) Ignorar la velocidad de deformación (“Strain Rate”) que entrega el software, ya que este tiene un error en las fórmulas que tiene compiladas.
- 8) Si se está realizando un ensayo de compresión triaxial CIU, utilizar la ecuación (2-31) o (2-32) para el cálculo de la máxima velocidad de deformación. Obtener t_{50} utilizando la ecuación (3-8) y aplicarle el porcentaje de deformación estimada en la falla a la altura de la probeta después de la consolidación. Esta altura puede ser leída como “Height After Consolidation” en la pestaña “Consolidation Stage Parameters” de la sub-sección “Information”.
- 9) Si se está realizando un ensayo de compresión triaxial CID, para el cálculo de la máxima velocidad de deformación utilizar la ecuación (2-33) o (2-34), o la ecuación (2-35) o (2-36), dependiendo si se utiliza o no tiras o jaula de papel filtro. Utilizar directamente t_{90} y aplicarle el porcentaje de deformación estimada en la falla a la altura de la probeta después de la consolidación. Esta altura puede ser leída como “Height After Consolidation” en la pestaña “Consolidation Stage Parameters” de la sub-sección “Information”.

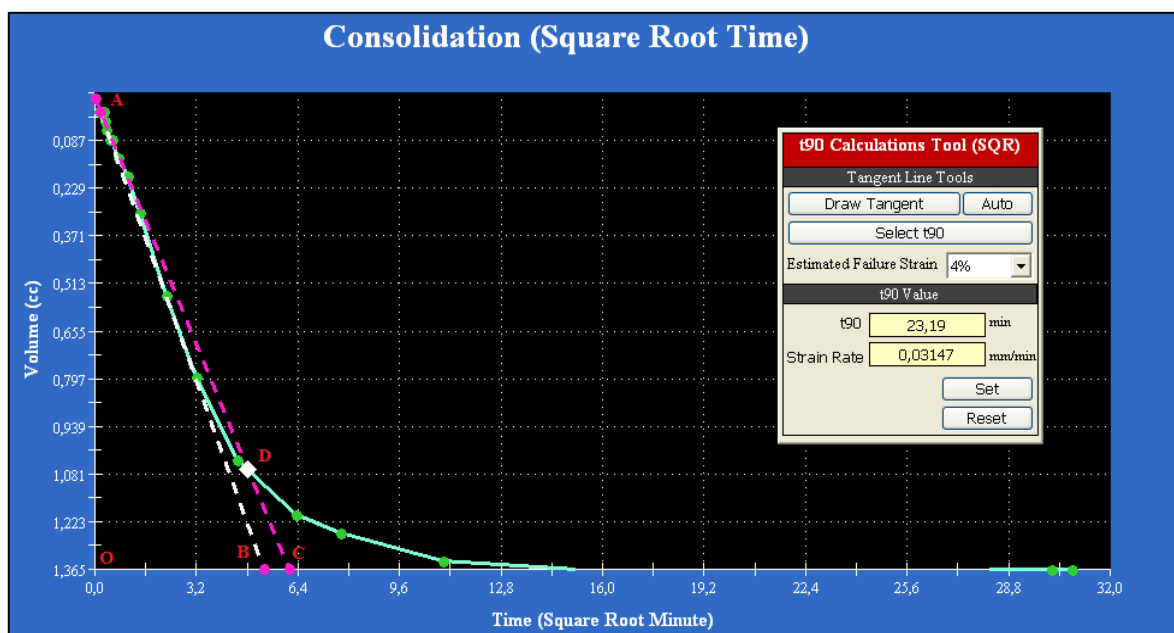


Figura 3-27: Obtención de parámetro t_{90} con gráfico "Square Root Time" del software "Humboldt".

3.5.1.2. Obtención de Velocidad Máxima de Corte – “Logarithmic Time”

- 1) Dirigirse a la sección “Graphs” y seguidamente a la sub-sección “Logarithmic Time”.
- 2) Presionar en “t50 Calculations Tool (LOG)”. Aparecerá una ventana emergente (cuadro pequeño en figura 3-28).
- 3) Seleccionar la deformación estimada en la falla en “Estimated Failure Strain”. Este valor es regularmente 4 [%].
- 4) Presionar en “Draw Intersection Lines” y extender porciones de línea recta de las consolidaciones primaria (recta “AB” de figura 3-28) y secundaria (recta CD de la misma figura) hasta que se intersecten en E .
- 5) Presionar en “Select Intersection Point” y seleccionar el punto E . La ordenada de este punto es la variación de volumen que hay cuando ocurre el 100 [%] de la consolidación primaria.
- 6) La porción inicial curva de la gráfica de la figura 3-28 es aproximadamente una parábola sobre la escala natural. Se deben seleccionar dos tiempos, t_1 (abscisa de F) y t_2 (abscisa de G), tal que $t_2 = 4 * t_1$. La diferencia de cambio volumétrico durante el tiempo ($t_2 - t_1$) (ordenada de G – ordenada de F), se le debe restar a la variación de volumen asociada a t_1 (ordenada de F), lo cual arroja la variación de volumen cuando se lleva un 0 [%] de la consolidación primaria (ordenada de I). Con el promedio de las ordenadas de I y E , se obtiene la variación de volumen cuando se lleva un 50 [%] de la consolidación primaria (ordenada de J).

En la ventana emergente, presionar en “Determine 0% Consolidation”, clickear en un punto de la gráfica como F y extender hacia arriba según las instrucciones del párrafo anterior. Al determinarse I , se establece solo el valor de t_{50} en la ventana emergente. Cabe destacar, el software “Humboldt” determina erróneamente el parámetro t_{50} , ya que lo asocia al promedio de las ordenadas de G y E , y no al promedio de las ordenadas de I y E . Este error naturalmente arroja un valor más elevado para t_{50} , constituyendo ser un caso más desfavorable, por lo que es aceptable quedarse con el valor entregado por el software.

- 7) Ignorar la velocidad de deformación (“Strain Rate”) que entrega el software, ya que este tiene un error en las fórmulas que tiene compiladas.
- 8) Si se está realizando un ensayo de compresión triaxial CIU, utilizar la ecuación (2-31) o (2-32) para el cálculo de la máxima velocidad de deformación. Utilizar directamente t_{50} y aplicarle el porcentaje de deformación estimada en la falla a la altura de la probeta después de la consolidación. Esta altura puede ser leída como “Height After Consolidation” en la pestaña “Consolidation Stage Parameters” de la sub-sección “Information”.
- 9) Si se está realizando un ensayo de compresión triaxial CID, para el cálculo de la máxima velocidad de deformación utilizar la ecuación (2-33) o (2-34), o la ecuación (2-35) o (2-36), dependiendo si se utiliza o no tiras o jaula de papel filtro. Obtener t_{90} utilizando la ecuación (3-8) y aplicarle el porcentaje de deformación estimada en la falla a la altura de la probeta después de la consolidación. Esta altura puede ser leída como “Height After Consolidation” en la pestaña “Consolidation Stage Parameters” de la sub-sección “Information”.

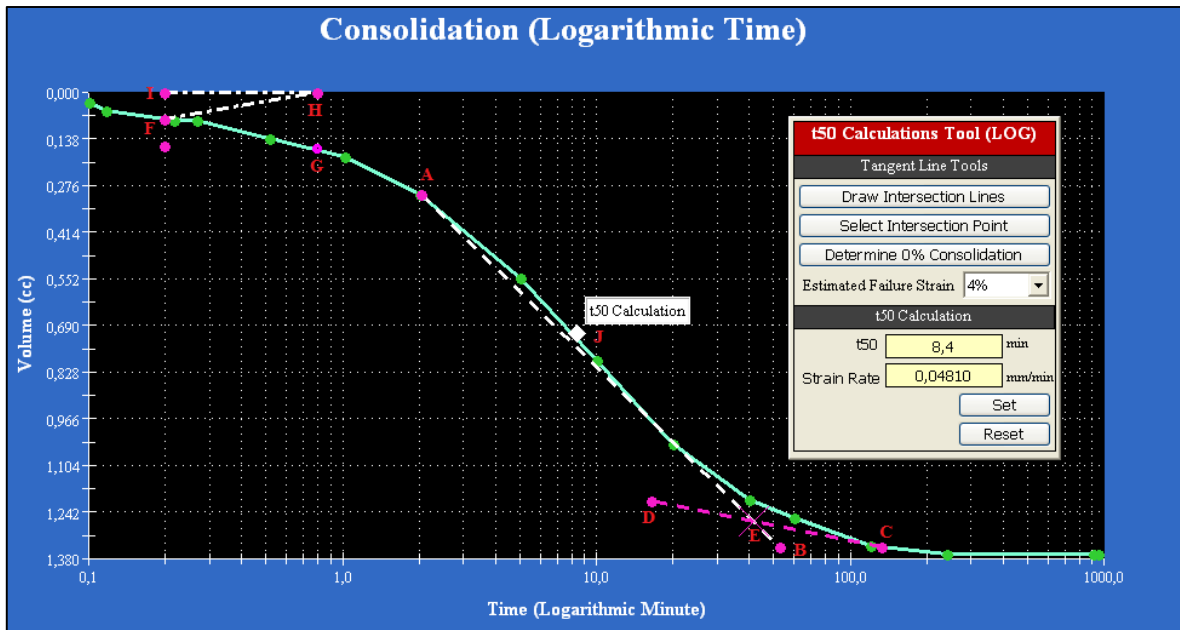


Figura 3-28: Obtención de parámetro t_{50} con gráfico "Logarithmic Time" del software "Humboldt".

3.5.2. Procedimientos Previos

- 1) Posar el pistón sobre el cabezal superior de la probeta y fijarlo con la perilla lateral que posee.
- 2) Verificar alineamiento del pistón con aparato de carga axial. Según norma, la excentricidad debe ser $\leq 1,3 \text{ [mm]}$.
- 3) En la prensa de carga, mantener presionada la "flecha hacia arriba" para subir la plataforma de carga hasta que la zona superior del pistón de carga axial esté casi en contacto con la zona inferior del aparato de carga axial. Debe quedar un "juego" de aproximadamente $1 - 2 \text{ [mm]}$.
- 4) Soltar perilla lateral y subir el pistón de carga axial hasta que entre en contacto con el aparato de carga axial. En este momento, en el apartado "LOAD" de la pantalla digital que posee la prensa de carga, se puede leer la fuerza resultante entre el empuje, roce y peso del pistón.
- 5) Dirigirse a la sub-sección "SETUP" y a la pestaña "Phase 3: Shear".
- 6) Completar la sub-pestaña "Shear Channels". En el caso de un ensayo de compresión triaxial CID, completar como se muestra en la figura 3-29. En el caso de un ensayo de compresión triaxial CIU, completar como se muestra en la figura 3-30.

Specimen A Test Setup				
Phase 1: Saturation		Phase 2: Consolidation		Phase 3: Shear
Shear Channels	Logging Type	Start Condition	Stop Condition	Motor Parameters
Shear Stage Logging Inputs				
Select Load Device	✓	Device 2 (Triaxial) -Connected		
Select Load Input	◆	Input 1 (LOAD 5)		
Select Displacement Device	✓	Device 2 (Triaxial) -Connected		
Select Displacement Input	◆	Input 2 (DISPLACEMENT 6)		
Select Volume Device	✓	Device 1 (pressure controller) -Connected		
Select Volume Input	◆	Input 4 (VOLUME)		
Select Pressure Controller Device (HM2450A Optional)	✓	Device 1 (pressure controller) -Connected		
Shear Stage Logging Inputs				
			Open Template	Run Test

Figura 3-29: Shear Channels CID.

Specimen A Test Setup				
Phase 1: Saturation		Phase 2: Consolidation		Phase 3: Shear
Shear Channels	Logging Type	Start Condition	Stop Condition	Motor Parameters
Shear Stage Logging Inputs				
Select Load Device	✓	Device 2 (Triaxial) -Connected		
Select Load Input	◆	Input 1 (LOAD 5)		
Select Displacement Device	✓	Device 2 (Triaxial) -Connected		
Select Displacement Input	◆	Input 2 (DISPLACEMENT 6)		
Select Pore Pressure Device	✓	Device 1 (pressure controller) -Connected		
Select Pore Pressure Input	◆	Input 3 (PRESSURE)		
Select Pressure Controller Device (HM2450A Optional)	✓	Device 1 (pressure controller) -Connected		
Shear Stage Logging Inputs				
			Open Template	Run Test

Figura 3-30: Shear Channels CIU.

- 7) Completar la sub-pestaña “Logging Type” como se muestra en la figura 3-31. Se registrarán lecturas de carga axial, volumen (compresión triaxial CID) y presión de poros (compresión triaxial CIU) cada 0,05 [mm] de desplazamiento. Con esta frecuencia de lecturas se cumple el ítem 8.4.2.1 de las normas ASTM D4767-11 y ASTM D7181-11.

Specimen A Test Setup	
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation
Phase 3: Shear	
Shear Channels	Logging Type
Logging Type	
Condition	Distance Interval
Device	✓ Device 2 (Triaxial) -Connected
Input	◆ Input 2 (DISPLACEMENT 6)
Distance Increment	UP
Distance Value	0,050
Logging Type	
Open Template Run Test	

Figura 3-31: Logging Type - Shear.

- 8) Completar la sub-pestaña “Start Condition” como se muestra en la figura 3-32. En el apartado “Value”, se ingresa un valor levemente superior al que se visualiza en el apartado “Current Value”, por ejemplo 0,030 [KN]. En el apartado “Current Value” aparece el valor actual que está midiendo la celda de carga tipo-s, el cual es la fuerza resultante entre el empuje, roce y peso del pistón.

Specimen A Test Setup	
Phase 1: Saturation	Phase 2: Consolidation
Phase 3: Shear	
Shear Channels	Start Condition
Start Condition	
Condition	Greater Than (>)
Device	✓ Device 2 (Triaxial) -Connected
Input	◆ Input 1 (LOAD 5)
Current Value	0,025
Value	0,030
Start Condition	
Open Template Run Test	

Figura 3-32: Start Condition – Shear.

- 9) Completar la sub-pestaña “Stop Condition” como se muestra en la figura 3-33. Según esto, el ensayo terminará cuando se alcance el 20 [%] de deformación axial. En general, el ensayo podría detenerse antes presionando “Stop Test” en la sub-sección “Tabulation” específicamente en la pestaña “Shear”. Alternativamente, en “Stop Type” puede seleccionarse “User Stop”, con lo cual el corte sólo se detendrá presionando “Stop Test”.

Specimen A Test Setup	
Phase 3: Shear	
Shear Channels	Logging Type
Stop Condition	
Stop Type	Percent Strain
Value	20

Stop Condition

Open Template Run Test

Figura 3-33: Stop Condition - Shear.

Specimen A Test Setup	
Phase 3: Shear	
Shear Channels	Logging Type
Motor Parameters	
Machine Motor Setup	
Motor Type	Computer Controlled
Device	✓ Device 2 (Triaxial) -Connected
Direction	UP/FORWARD
Strain Rate	0,130000

Machine Motor Setup

Open Template Run Test

Figura 3-34: Motor Parameters – Shear.

- 10) Completar la sub-pestaña “Motor Parameters” como se muestra en la figura 3-34. En el apartado “Strain Rate”, se debe ingresar una velocidad menor o igual que la obtenida según el ítem 3.5.1 de este manual.
- 11) Si se está realizando un ensayo de compresión triaxial CID, abrir la válvula “BASE” derecha en la cámara triaxial. En el caso de un ensayo de compresión triaxial CIU, mantener cerrada la válvula “BASE” derecha.

3.5.3. Inicio Fase de Corte

- 1) En el software “Humboldt”, y en la pestaña “Phase 3: Shear”, presionar “Run Test”.
- 2) Se abrirá la tabla de registro de datos, donde además se irán realizando automáticamente todos los cálculos que se plantean en las normas respectivas.

3.5.4. Cálculos

3.5.4.1. Cálculos en Ensayo de Compresión Triaxial CID

- 1) Altura de la probeta al comienzo de la etapa de corte:

$$H_c = H_0 + \Delta H_s + \Delta H_c \quad (3-9)$$

Donde:

H_0 : Altura inicial de la probeta.

ΔH_s : Variación en la altura de la probeta durante la saturación.

ΔH_c : Variación en la altura de la probeta durante la consolidación.

- 2) Área de la probeta al comienzo de la etapa de corte:

$$A_c = \frac{V_0 + \Delta V_s + \Delta V_c}{H_c} = \frac{V_c}{H_c} \quad (3-10)$$

Donde:

V_0 : Volumen inicial de la probeta.

ΔV_s : Variación en el volumen de la probeta durante la saturación (ecuación (3-4)).

ΔV_c : Variación en el volumen de la probeta durante la consolidación.

V_c : Volumen de la probeta después de la consolidación.

3) Deformación unitaria axial:

$$\epsilon_1 = \frac{|\Delta H_\epsilon|}{H_c} \quad (3-11)$$

Donde:

ΔH_ϵ : Variación en la altura de la probeta para una determinada deformación axial.

4) Área de la probeta para una determinada deformación axial:

$$A = \frac{V_c + \Delta V_\epsilon}{H_c - |\Delta H_\epsilon|} \quad (3-12)$$

Donde:

ΔV_ϵ : Variación en el volumen de la probeta para una determinada deformación axial.

5) Esfuerzo desviatorio:

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A} \quad (3-13)$$

Donde:

P : Carga axial para una determinada deformación axial (corregida por el efecto del empuje, roce y peso del pistón).

6) Corrección por tiras de papel filtro:

Esta corrección se calcula para cada nivel de deformación y se le resta directamente al esfuerzo desviatorio calculado.

Para deformaciones axiales sobre el 2 [%], se debe usar la ecuación (3-14) para calcular la corrección.

$$\Delta\sigma_{fp} = \frac{K_{fp} * P_{fp}}{A_c} \quad (3-14)$$

Donde:

K_{fp} : Rigidez de las tiras de papel filtro, usualmente 0,19 [kN/m].

P_{fp} : Perímetro inicial cubierto por las tiras de papel filtro.

Para deformaciones axiales bajo el 2 [%], se debe usar la ecuación (3-15) para calcular la corrección.

$$\Delta\sigma_{fp} = \frac{50 * \epsilon_1 * K_{fp} * P_{fp}}{A_c} \quad (3-15)$$

Donde:

ϵ_1 : Deformación axial en forma decimal.

7) Corrección por membrana:

Esta corrección se calcula con la ecuación (3-16) para cada nivel de deformación y se le resta al esfuerzo desviatorio calculado.

$$\Delta\sigma_m = \frac{4 * E_m * t_m * \epsilon_1}{D_c} \quad (3-16)$$

E_m : Módulo de elasticidad de la membrana, usualmente 1400 [kPa].

t_m : Espesor de la membrana, usualmente 0,3048 [mm].

D_c : $\sqrt{(4 * A_c)/\pi}$, diámetro de la probeta después de la consolidación.

8) Esfuerzo desviatorio corregido:

$$\Delta\sigma_{corregido} = \Delta\sigma - \Delta\sigma_{fp} - \Delta\sigma_m \quad (3-17)$$

9) Esfuerzos principales:

En este ensayo se calculan directamente en términos efectivos del siguiente modo:

$$\sigma'_3 = P_c - u_0 \quad (3-18)$$

$$\sigma'_1 = \Delta\sigma_{corregido} + \sigma'_3 \quad (3-19)$$

Donde:

P_c : Presión de cámara.

u_0 : Presión de poros al comienzo de la etapa de corte o contrapresión.

10) Diagrama $p - q$:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (3-20)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (3-21)$$

3.5.4.2. Cálculos en Ensayo de Compresión Triaxial CIU

Los únicos cálculos que varían con respecto al ítem 3.5.4.1, son el cálculo del área para cada nivel de deformación y los esfuerzos principales.

- 1) Área de la probeta para una determinada deformación axial:

La ecuación (3-22) es la utilizada para este efecto, la cual considera que la probeta cambia de forma y no de volumen.

$$A = \frac{A_c}{1 - \epsilon_1} \quad (3-22)$$

- 2) Esfuerzos principales:

En este ensayo se pueden calcular tanto en términos totales como efectivos. Esto es:

En términos totales:

$$\sigma_3 = P_c - u_0 \quad (3-23)$$

$$\sigma_1 = \Delta\sigma_{corregido} + \sigma_3 \quad (3-24)$$

En términos efectivos:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u \quad (3-25)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta u \quad (3-26)$$

Donde:

Δu : Presión de poros inducida a una determinada carga axial (presión de poros total menos la contrapresión).

3.6. Término del Ensayo

- 1) En la cámara triaxial, cerrar todas las válvulas, menos la válvula “CELL”.
- 2) En el controlador de presión, reducir la contrapresión hasta 0 [kPa]. Para ello, presionar una vez la “flecha hacia abajo”.
- 3) En el controlador de presión, y con el regulador manual, reducir la presión de cámara hasta 0 [kPa].
- 4) Desconectar líneas de la cámara triaxial que unen con la válvula solenoide y con el dispositivo de medición de presión de poros.
- 5) En la prensa de carga, mantener presionada la “flecha hacia abajo” para bajar la plataforma de carga hasta el extremo inferior.

- 6) Vaciar cámara triaxial como se indica a continuación:
 - En el panel, desconectar la línea “BLADDER A”.
 - Conectar línea auxiliar “AIR” de la sección “AUXILIARY AIR PRESSURE” del panel al despiche superior de la cámara triaxial.
 - En el panel, mover la válvula “CELL” a la posición “DRAIN”.
 - En el panel, con el regulador manual de presión de la sección “AUXILIARY AIR PRESSURE”, aplicar una presión a la cámara por su parte superior y esperar a que se drene toda el agua.
 - En el panel, liberar presión aplicada con el regulador manual.
 - Desconectar línea auxiliar “AIR” de la cámara triaxial.
- 7) Desarmar cámara triaxial y extraer probeta ensayada.
- 8) Fotografiar la probeta ensayada con y sin membrana.
- 9) Ya sin membrana, opcionalmente se puede obtener la masa húmeda de la probeta ensayada (cuidando no perder material) y su humedad. Esto es opcional, ya que igualmente se puede determinar aproximadamente la humedad y relación de vacíos finales considerando los distintos cambios volumétricos que ocurren durante todo el ensayo. No obstante, si es que se determinan, ingresar los datos faltantes en la pestaña “Final Specimen Parameters” (figura 3-35) de la subsección “Information”.

Specimen A Sample Information									
Specimen Information	Initial Specimen Parameters								
Final Specimen Parameters Final Moisture Information Worksheet Click here to enter trimming information <table> <tr> <td>Final Moisture Content (%)</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Final Specimen Moist Weight (g)</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Final Dry Density (g/cm³)</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Final Void Ratio</td> <td>0,000</td> </tr> </table>		Final Moisture Content (%)	0,00	Final Specimen Moist Weight (g)	0,000	Final Dry Density (g/cm ³)	0,000	Final Void Ratio	0,000
Final Moisture Content (%)	0,00								
Final Specimen Moist Weight (g)	0,000								
Final Dry Density (g/cm ³)	0,000								
Final Void Ratio	0,000								
Final Specimen Parameters Copy Specimen Information									

Figura 3-35: Final Specimen Parameters.

CAPÍTULO 4. ETAPA EXPERIMENTAL

4.1. Introducción

En el presente capítulo se entregan los resultados más generales de los ensayos realizados en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, sobre una arena limosa y con la finalidad de obtener los datos necesarios que permitan realizar fundamentalmente los siguientes análisis:

- Definición de envolventes lineales de falla para cuatro estados de densidad inicial (de confección) distintos y para cada tipo de ensayo (compresión triaxial CIU y CID). La idea es comparar los parámetros geotécnicos de resistencia al corte entre ensayos y para cada estado inicial.
- Análisis de resultados utilizando la teoría del estado crítico. La idea es definir de la mejor manera posible la línea de estado crítico.

Cabe destacar, en este capítulo sólo se presentan los resultados más generales. El análisis de resultados para cumplir los objetivos recién nombrados y otros que se le asocian, quedan destinados para el capítulo posterior.

4.2. Material de Ensayo

Para cumplir los fines de esta memoria se determinó la utilización de un único material, una arena limosa, denominada comúnmente como maicillo, sin plasticidad, aparentemente bastante fina y de color amarillo – oro muy claro.

El lugar de extracción de las muestras se encuentra en la V región de Valparaíso, ciudad de Valparaíso, calle Rodelillo y en el sector del aeródromo. El método de extracción fue mediante apaleo normal, desde la superficie, y sin realizar mayor trabajo, ya que la arena se encontraba en un estado muy suelto, con bajísima humedad y sin ningún tipo de cementación natural.

4.3. Ensayos Practicados

El suelo mencionado en el apartado anterior fue sometido, en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, a una serie de ensayos de utilidad para cumplir los fines ya expuestos. En la tabla 4-1 se muestra la lista detallada de los ensayos practicados y la norma empleada en su realización.

Tabla 4-1: Listado de ensayos practicados y la norma empleada en su realización.

Sigla de la Norma	Nombre del Ensayo
8.102.1 (MC-V8 2015)	Granulometría
ASTM D2487-11	Clasificación USCS
NCh 1517/1 Of. 79	Límite Líquido
NCh 1517/2 Of. 79	Límite Plástico
NCh 1534/2 Of. 79	Relación Humedad - Densidad: Ensayo de Proctor Modificado
ASTM D4254-00 (2006)	Densidad Mínima
NCh 1532 Of. 80	Densidad de Partículas Sólidas
ASTM D4767-11	Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y No Drenado (CIU)
ASTM D7181-11	Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente y Drenado (CID)
-	Consolidación Isotrópica

4.4. Ensayos Tradicionales

4.4.1. Granulometría, Límites de Atterberg y Clasificación

Los resultados de estos ensayos confirmaron las hipótesis que se tenían sobre el material en estudio. Su clasificación USCS arrojó una arena limosa, SM, los límites de Atterberg no fue posible determinarlos dada la nula plasticidad del material, NP, y en su granulometría destacó la importante cantidad de finos limosos (bajo malla N° 200) de aproximadamente 23 [%] en peso seco. Más información sobre la granulometría puede ser encontrada en el ANEXO A. Por ahora, en la figura 4-1 se presenta la curva granulométrica del material en cuestión.

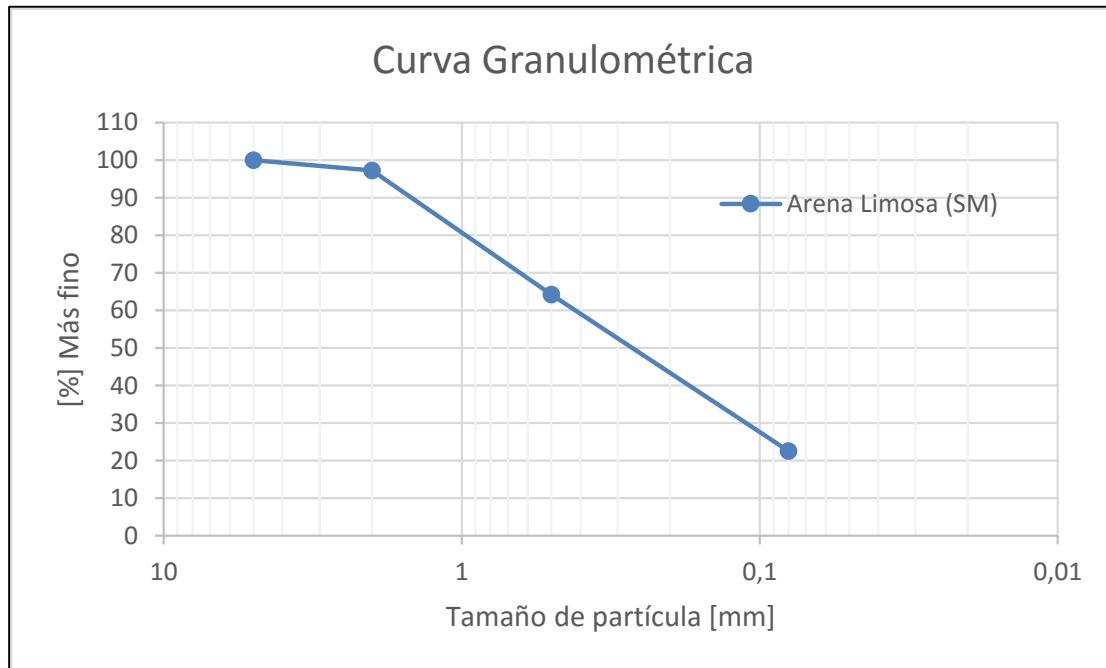


Figura 4-1: Curva granulométrica – Arena Limosa.

4.4.2. Relación Humedad – Densidad: Ensayo de Proctor Modificado

Dada la alta cantidad de finos limosos, mayor a 15 [%] en peso seco, no fue posible la realización del ensayo de densidad máxima utilizando la mesa vibratoria y según la norma ASTM D4253-00 (2006). A cambio de ello, se realizó el ensayo de proctor modificado para poder determinar la densidad máxima compactada seca y humedad óptima. Se obtuvo una densidad máxima compactada seca de $\rho_{s-m\acute{a}x} = 1,930 [g/cm^3]$, equivalente a una relación de vacíos mínima de $e_{min} = 0,457$, y una humedad óptima de $w_{opt} = 8,7$ [%]. Más información sobre este ensayo puede ser encontrada en el ANEXO B.

4.4.3. Densidad Mínima

Este ensayo arrojó una densidad mínima seca promedio de $\rho_{s-min} = 1,309 [g/cm^3]$, lo cual equivale a una relación de vacíos máxima de $e_{m\acute{a}x} = 1,148$. Más información sobre este ensayo puede ser encontrada en el ANEXO C.

4.4.4. Densidad de Partículas Sólidas

Este ensayo se realizó dos veces con la finalidad de obtener valores aproximadamente similares que validaran su obtención. Así, se obtuvo valores de pesos específicos o gravedades específicas a 20 [°C] iguales a $G_s = 2,809$ y $G_s = 2,814$, cuyo promedio de $G_s = 2,812$ se consideró adecuado para utilizarlo en los distintos cálculos de esta memoria. Más información sobre este ensayo puede ser encontrada en el ANEXO D.

4.5. Ensayos de Compresión Triaxial CIU y CID

4.5.1. Condición de Ensayo de las Probetas

Primeramente, se definió la utilización de cuatro estados de densidad de confección distintos y tres probetas remoldeadas a distintos esfuerzos efectivos de consolidación por cada uno de ellos y para cada tipo de ensayo. Con ello, sería posible la definición de una envolvente lineal de falla para cada estado de densidad y tipo de ensayo, junto con la obtención de datos suficientes para poder definir la línea de estado crítico. Así, la cantidad total de probetas remoldeadas ensayadas fue de 24, 12 por cada tipo de ensayo. El procedimiento de confección fue el que se indica en el ítem 3.2.1.2, es decir, el wet – tamping o moist – tamping, y los esfuerzos efectivos de consolidación escogidos fueron de 100, 200 y 300 [kPa] respectivamente. Durante la etapa de corte, en los ensayos de compresión triaxial CIU se utilizó una velocidad constante de deformación igual a 0,130 [mm/min], velocidad suficientemente lenta como para posibilitar un continuo equilibrio de la presión de poros a través de la probeta. En el caso de los ensayos de compresión triaxial CID, la velocidad utilizada fue de 0,080 [mm/min], suficientemente lenta como para permitir una continua disipación del exceso de presión de poros. En la tabla 4-2 se muestran las densidades y humedades de confección para las probetas remoldeadas utilizadas en los ensayos de compresión triaxial CIU y CID.

Tabla 4-2: Densidades y humedades de confección para probetas remoldeadas – Arena Limosa.

Valores de Confección Para Probetas Remoldeadas			
Densidad Seca ρ_s [g/cm ³]	Densidad Relativa DR [%]	Descripción Cualitativa -	Humedad W [%]
1,400	20	Suelto	10,0
1,550	48	Suelto	10,0
1,700	71	Denso	10,0
1,900	97	Muy denso	10,0

4.5.2. Procedimiento Para Obtención de Humedad y Relación de Vacíos Finales

Muestras compactadas a baja densidad son susceptibles a un potencial error en la evaluación de su relación de vacíos final, dado que durante el proceso de saturación ocurre un colapso parcial de la estructura inestable y un significativo cambio de volumen toma lugar. Este cambio de volumen durante la saturación no puede ser evaluado con los procedimientos ordinarios, de hecho la utilización de la ecuación (3-4) no arroja resultados satisfactorios al menos en lo que se refiere para la obtención de la relación de vacíos final. Verdugo e Ishihara (1996) propusieron un método para evaluar más confiablemente la relación de vacíos una vez terminado el ensayo. Este método fue desarrollado considerando que, para probetas saturadas, la relación de vacíos está directamente relacionada con la cantidad de agua en la probeta. Para suelos arcillosos el procedimiento no involucra una dificultad significativa, pero en suelos arenosos la determinación de la humedad final es muy sensible, dada la facilidad con que la probeta puede perder humedad desde el desarmado de la cámara triaxial hasta que se registra la masa húmeda. El procedimiento en cuestión, adaptado al equipo triaxial que se dispone en el laboratorio LEMCO y que fue utilizado en todos los ensayos de compresión triaxial CIU y CID de esta memoria, se describe a continuación:

- 1) En condiciones no drenadas se libera la contrapresión. Para ello, primero cerrar válvula “BASE” derecha en la cámara triaxial, y luego presionar una vez la “flecha hacia abajo” en el controlador de presión. Esto se hace para evitar posibles errores por la expansión o contracción de las líneas que conectan a la probeta con el aparato de medición de cambio volumétrico.
- 2) Verificar que la válvula derecha del aparato de medición de cambio volumétrico esté en “VOLUME CHANGE”, y su válvula izquierda en “FLOW UP” o “FLOW DOWN”, dependiendo de la dirección en que tengan más recorrido su brazo palanca y LSCT.
- 3) Registrar lectura de volumen inicial del aparato de medición de cambio volumétrico. Esta puede ser leída en el controlador de presión y registrarla como V_{if} .
- 4) Forzar una última consolidación con la máxima presión de cámara disponible. Para ello, abrir válvula solenoide en el software “Humboldt”, luego la válvula “BASE” derecha en la cámara triaxial, para finalmente con el regulador manual aumentar la presión de cámara al valor máximo disponible.

- 5) Una vez que el exceso de presión de poros haya sido disipado casi totalmente, se cierra la válvula “BASE” derecha y se registra la lectura final del aparato de medición de cambio volumétrico como V_{ff} .
- 6) Con el regulador manual, disminuir la presión de cámara hasta un valor nulo, lo cual en condiciones no drenadas origina presiones de poros negativas (succión).
- 7) Desmontar la probeta del marco de carga y cámara triaxial, retirando el cabezal superior, lo que por la succión interna endurece la probeta para ser manipulada y dificulta su pérdida de humedad.
- 8) Secar cuidadosamente la membrana por su exterior, luego retirar y depositar la probeta en un recipiente limpio y seco. Remover con un cuchillo o espátula el resto de material adherido a la membrana de látex y a los discos de papel filtro superior e inferior.
- 9) Obtener la masa húmeda final de la probeta, registrarla como W_h , y luego llevar al horno el recipiente con la probeta para su secado. Una vez seca, registrar se masa seca como W_s .
- 10) La humedad de la probeta al final del ensayo de compresión triaxial, es decir, al comienzo de este procedimiento, se calcula del siguiente modo:

$$\omega = \frac{|V_{ff} - V_{if}| + (W_h - W_s)}{W_s} \quad (4-1)$$

- 11) Con esto, se puede calcular la relación de vacíos al final del ensayo de compresión triaxial, es decir, al comienzo de este procedimiento, con la siguiente expresión:

$$e = \omega * G_s \quad (4-2)$$

Donde:

G_s : Gravedad específica del suelo.

4.5.3. Procedimiento “Inverso” Para Cálculo de Parámetros al Comienzo de la Etapa de Corte

Para ser consecuentes con la relación de vacíos calculada al final del ensayo con el procedimiento enunciado en el ítem anterior, es que se optó por seguir un procedimiento inverso para el cálculo de parámetros al comienzo de la etapa de corte, tales como: área, volumen y diámetro de la probeta, entre otros. La idea consiste en que una vez determinada la relación de vacíos final, es posible devolverse para obtener la relación de vacíos al comienzo de la etapa de corte utilizando el cambio volumétrico final registrado durante esta etapa. Con esta relación de vacíos, más la gravedad específica y masa seca de la probeta, se puede determinar el volumen total de la probeta al comienzo de la etapa de corte. Ahora, si se asume conocida la altura de la probeta al comienzo de la etapa de corte (ya que se miden los cambios de altura durante la saturación y consolidación mediante la medición de la porción de pistón de carga axial por sobre la cámara triaxial), es posible determinar el área y diámetro promedios al comienzo de esta etapa. Cabe destacar, en el caso de un ensayo de compresión triaxial CIU el procedimiento es aún más fácil, ya que como no se admite el drenaje

durante la etapa de corte, la relación de vacíos al final del ensayo es la misma que al comienzo de la etapa de corte.

4.5.4. Consideraciones Adicionales

Tener en cuenta las consideraciones que se enlistan a continuación:

- Los ensayos de compresión triaxial CID con densidades relativas de confección de 71 [%] fueron infructuosamente prolongados hasta una deformación axial aproximada de 32 [%] en busca de alcanzar de forma más clara el estado crítico.
- Los ensayos de compresión triaxial CID con densidades relativas de confección de 97 [%] fueron detenidos tempranamente antes de alcanzar el 20 [%] de deformación axial, cuando producto del notorio plano de falla que aparecía en estas probetas de comportamiento frágil y presumiblemente por la acción de la membrana de látex, comenzaba a aumentar repentinamente la resistencia.
- Para la determinación de las líneas de estado crítico se consideró los valores de q_{cri} , p'_{cri} y e_{cri} a un 20 [%] de deformación axial, donde el esfuerzo desviatorio, volumen y presión de poros eran casi constantes.
- Para la determinación de las líneas de estado crítico no se consideró los valores de q_{cri} , p'_{cri} y e_{cri} , determinados a partir de los ensayos de compresión triaxial CID con densidades relativas de confección de 71 [%] y 97 [%], por no ser suficientemente satisfactorios y congruentes. Estudios previos confirman esto, indicando que la determinación de las líneas de estado crítico para arenas es incierta en muestras densas en una condición drenada (Mooney et al., 1998; Finno y Rechenmacher, 2003).
- No se consideró la utilización de tiras o jaulas de papel filtro, ya que, a pesar de mejorar el drenaje durante las distintas etapas de los ensayos, dificultaban la toma correcta de la humedad final para la posterior determinación de la relación de vacíos en estado crítico.
- El criterio para considerar la falla fue el esfuerzo desviatorio máximo, $q_{máx}$, incluso en aquellas probetas de comportamiento más bien plástico que fallaban, a todas luces, en estado crítico.

4.5.5. Resultados Generales

Se presentan los resultados más generales para cada tipo de ensayo, estado de densidad inicial y esfuerzo efectivo de consolidación. Mayor información a la presentada en este apartado puede ser encontrada en el ANEXO E y ANEXO F respectivamente.

4.5.5.1. Ensayos de Compresión Triaxial CIU

Densidad Relativa DR = 20 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-3: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N°	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e
1	100	1,020	2,080	0,664	0,459	15,00	0,653	0,456	0,862
2	200	2,039	3,589	1,417	1,080	18,99	1,411	1,081	0,803
3	300	3,059	3,079	2,497	1,801	16,97	2,482	1,821	0,718

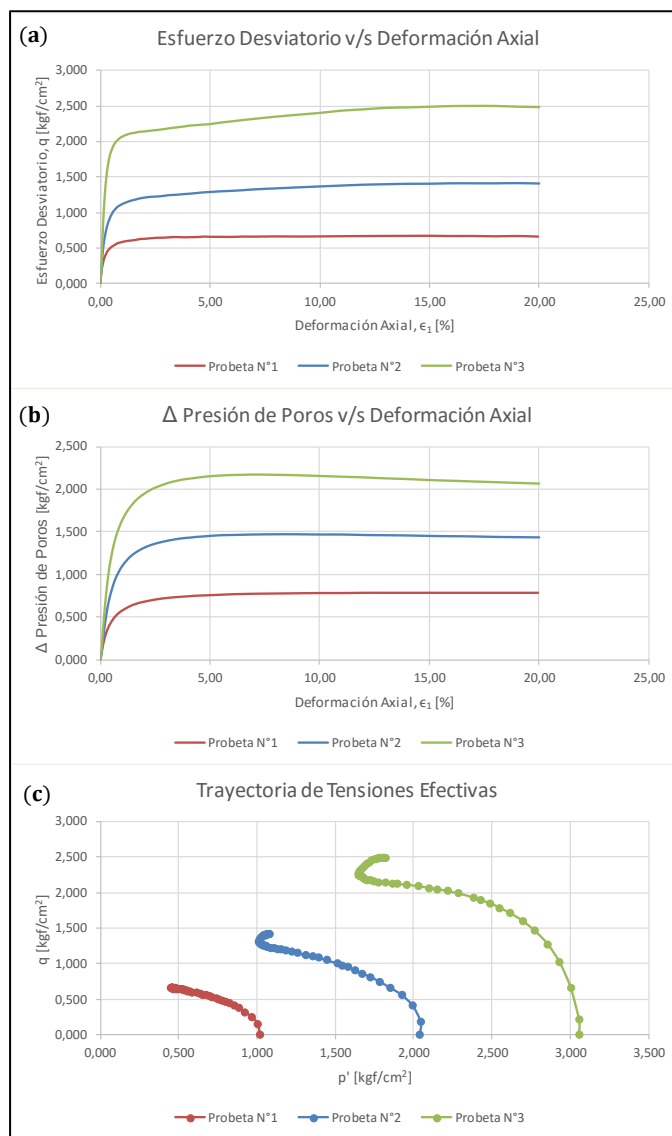


Figura 4-2: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 48 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-4: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N° -	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e -
1	100	1,020	2,039	1,100	0,733	13,99	1,085	0,737	0,818
2	200	2,039	2,101	1,747	1,279	15,99	1,740	1,297	0,751
3	300	3,059	2,080	2,541	1,787	18,00	2,531	1,795	0,711

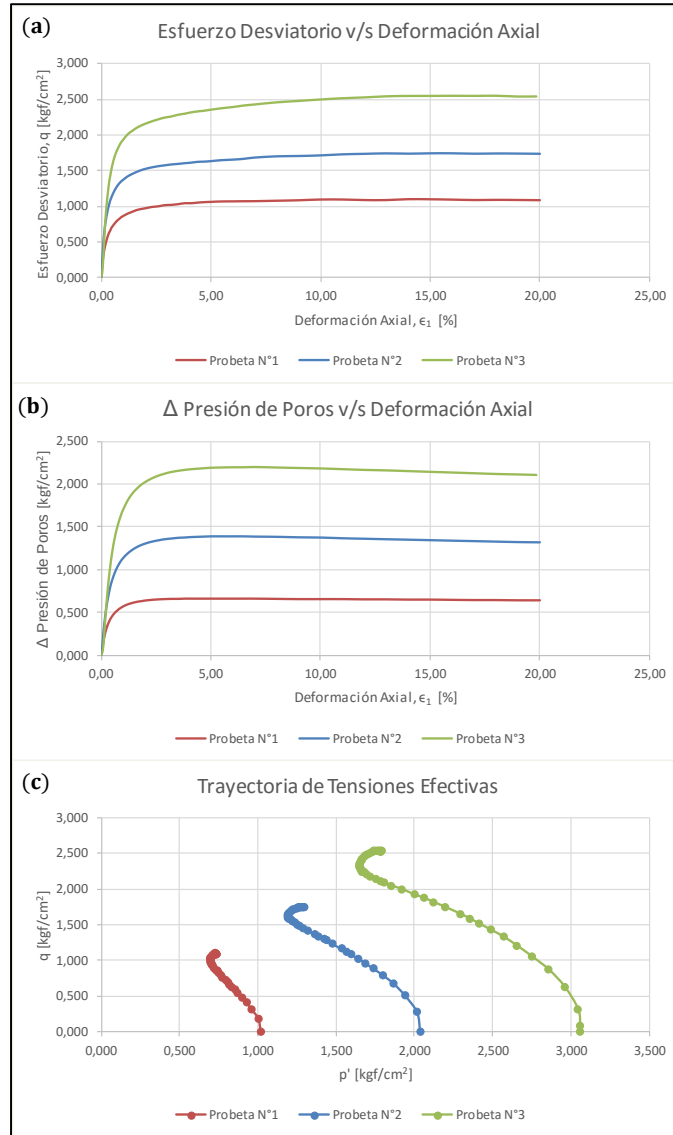


Figura 4-3: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 71 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-5: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N°	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e
1	100	1,020	3,079	3,546	2,485	12,99	3,481	2,556	0,670
2	200	2,039	1,570	4,073	2,879	15,00	3,960	2,886	0,658
3	300	3,059	3,049	4,109	2,932	13,02	4,036	2,998	0,642

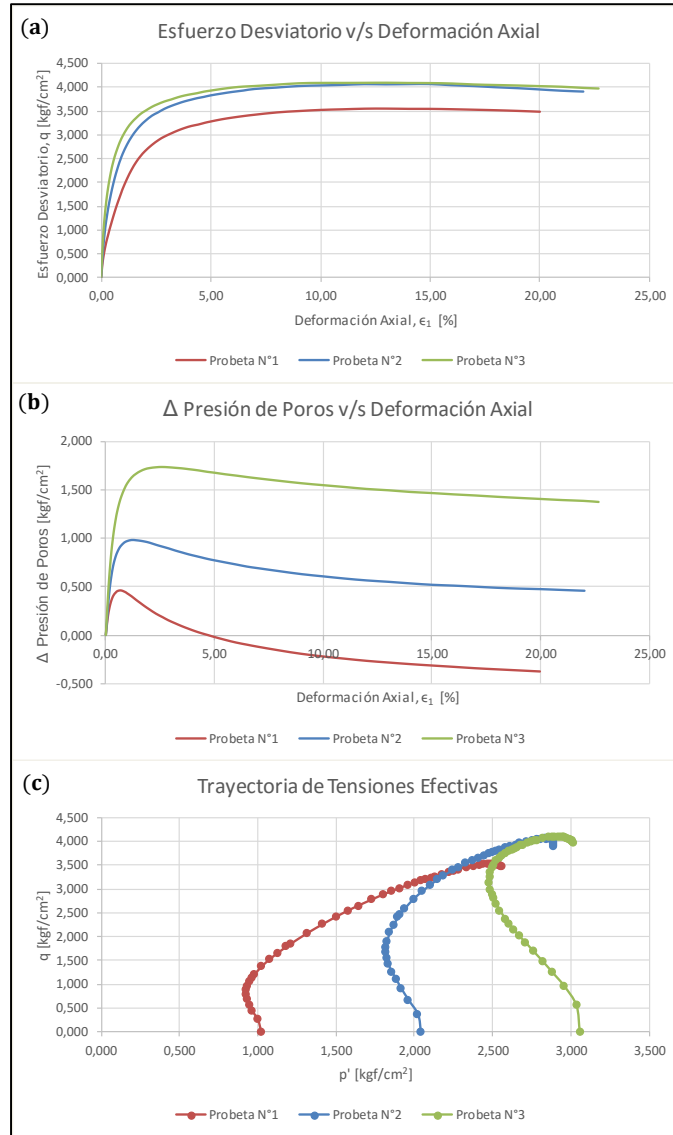


Figura 4-4: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 97 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-6: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N° -	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e -
1	100	1,020	2,590	11,085	7,279	8,00	9,609	6,941	0,486
2	200	2,039	2,549	12,208	8,424	11,00	11,830	8,600	0,494
3	300	3,059	2,570	14,188	9,974	13,01	14,028	10,252	0,474

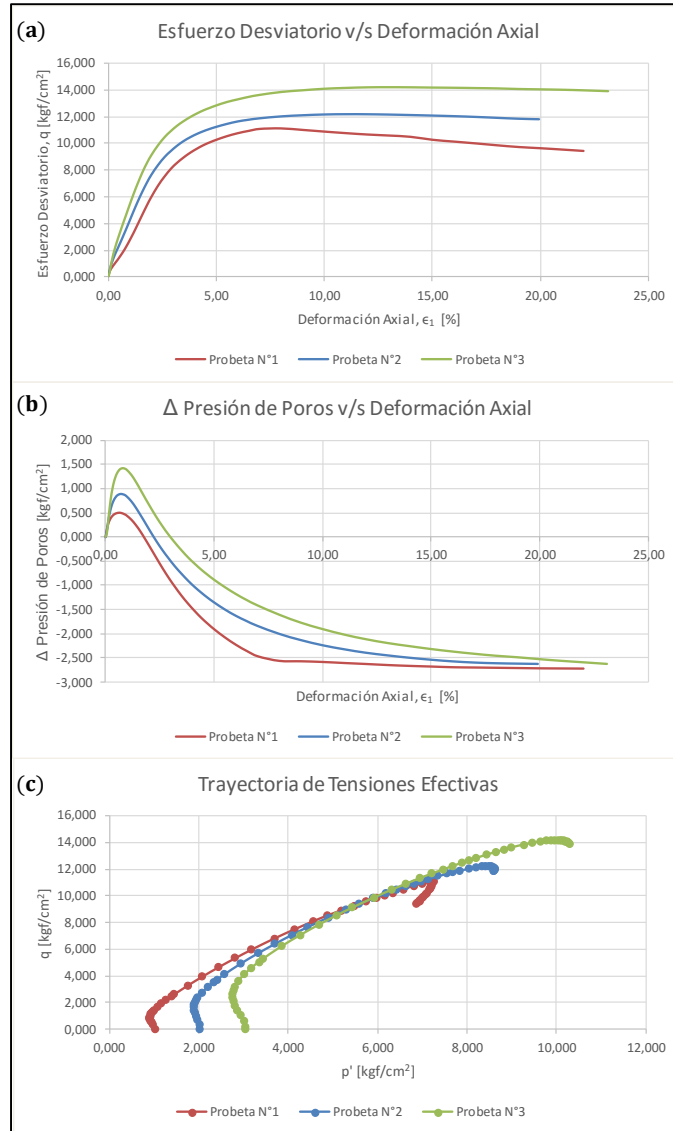


Figura 4-5: Ensayos de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Presión de poros – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

4.5.5.2. Ensayos de Compresión Triaxial CID

Densidad Relativa DR = 20 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-7: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N°	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e -
1	100	1,020	2,029	2,772	1,944	18,99	2,769	1,943	0,702
2	200	2,039	2,060	5,690	3,936	20,02	5,690	3,936	0,650
3	300	3,059	2,060	8,419	5,865	20,02	8,419	5,865	0,584

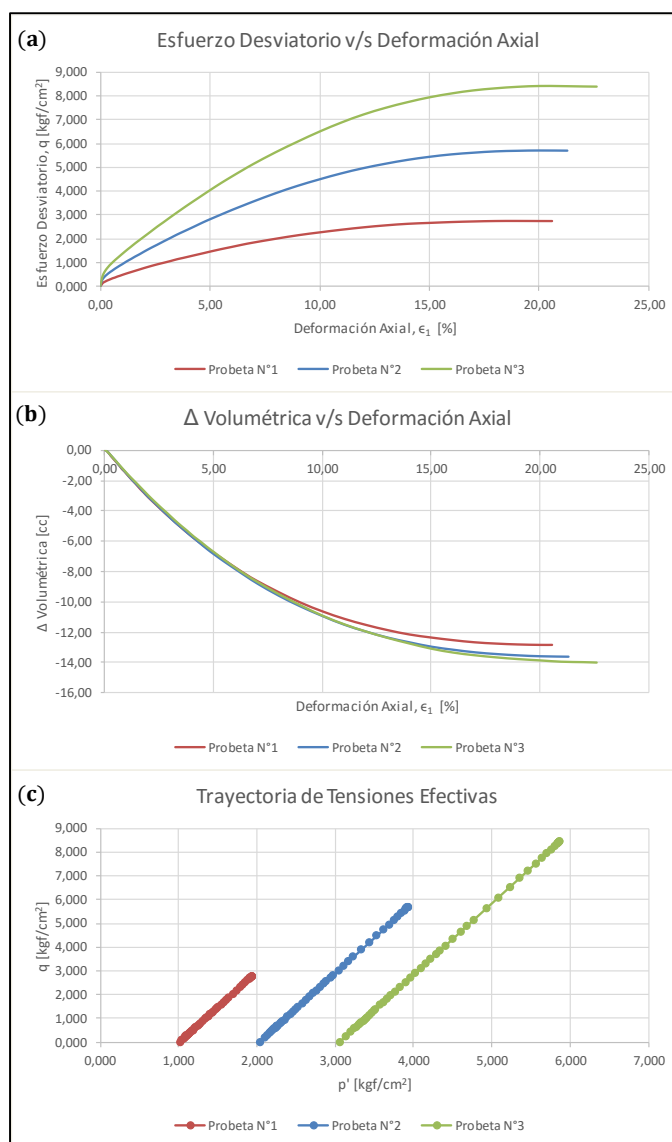


Figura 4-6: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 48 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-8: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N°	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e
1	100	1,020	1,540	2,791	1,950	16,02	2,723	1,927	0,728
2	200	2,039	2,162	5,514	3,877	18,02	5,488	3,869	0,650
3	300	3,059	1,530	8,076	5,751	18,98	8,070	5,749	0,591

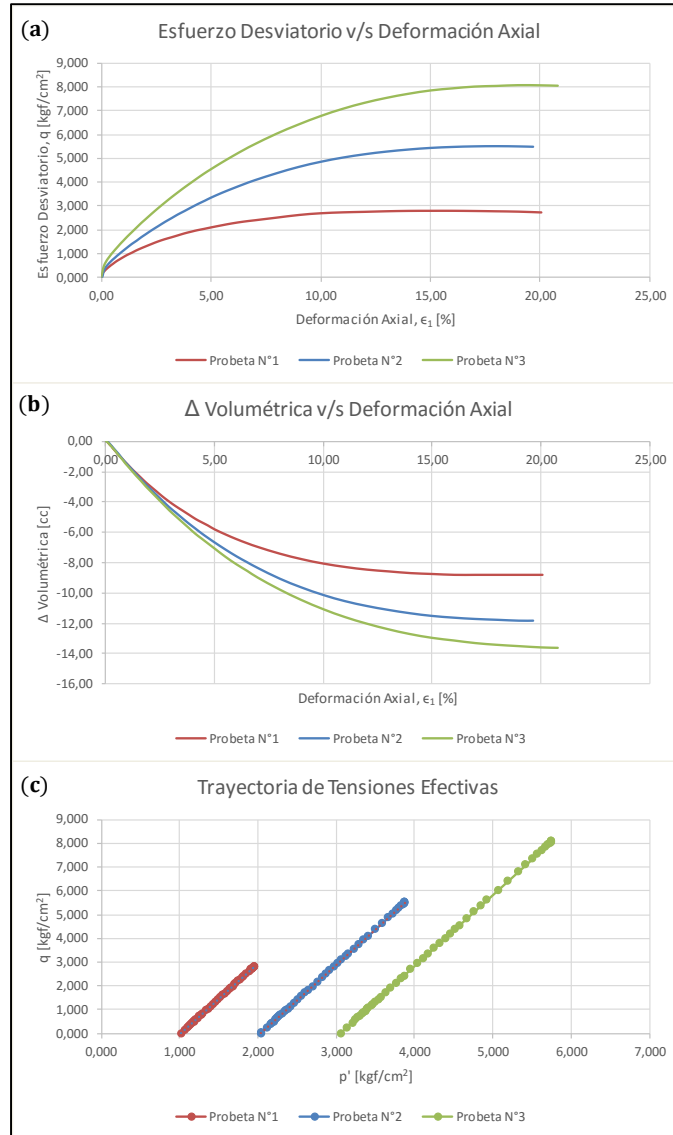


Figura 4-7: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 71 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-9: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N°	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e
1	100	1,020	1,530	3,314	2,124	5,50	-	-	-
2	200	2,039	2,050	5,946	4,021	10,02	-	-	-
3	300	3,059	2,039	8,106	5,761	13,98	-	-	-

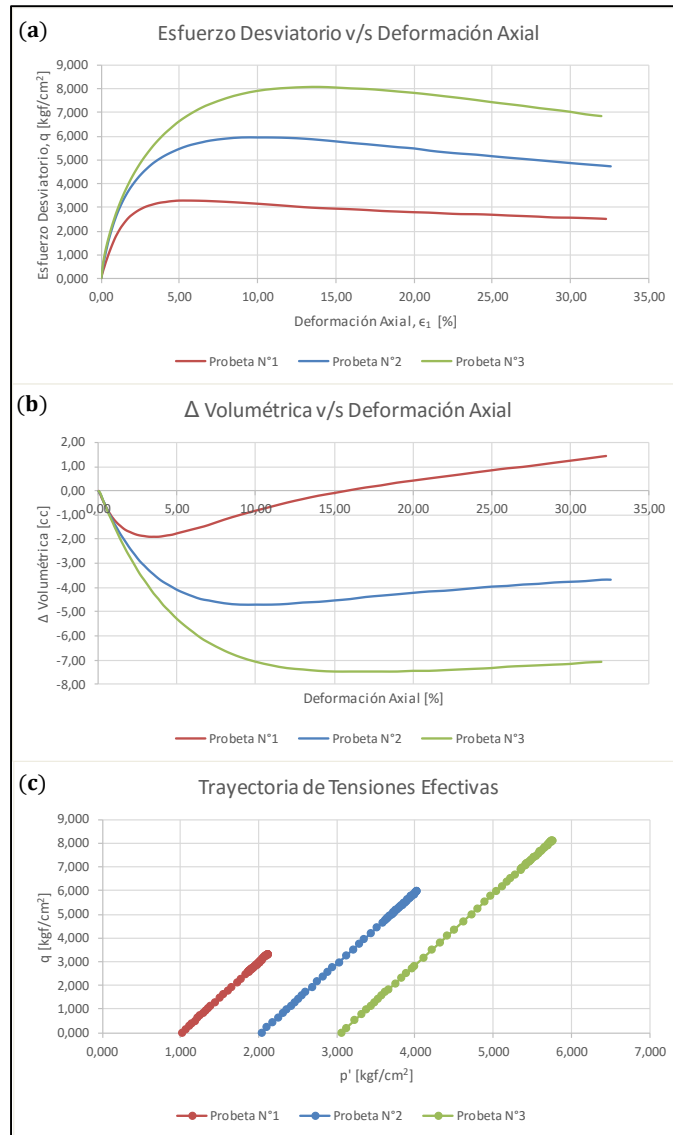


Figura 4-8: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

Densidad Relativa DR = 97 [%] – Densidad Seca $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Tabla 4-10: Resultados generales de ensayos de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa.

Probeta N° -	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		Contrapresión Total u_0	Falla			Estado Crítico		
	[kPa]	[kgf/cm ²]		q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	ϵ_1 [%]	q [kgf/cm ²]	p' [kgf/cm ²]	e -
1	100	1,020	2,325	6,052	3,037	3,18	-	-	-
2	200	2,039	2,325	8,366	4,828	3,78	-	-	-
3	300	3,059	2,060	11,815	6,997	3,79	-	-	-

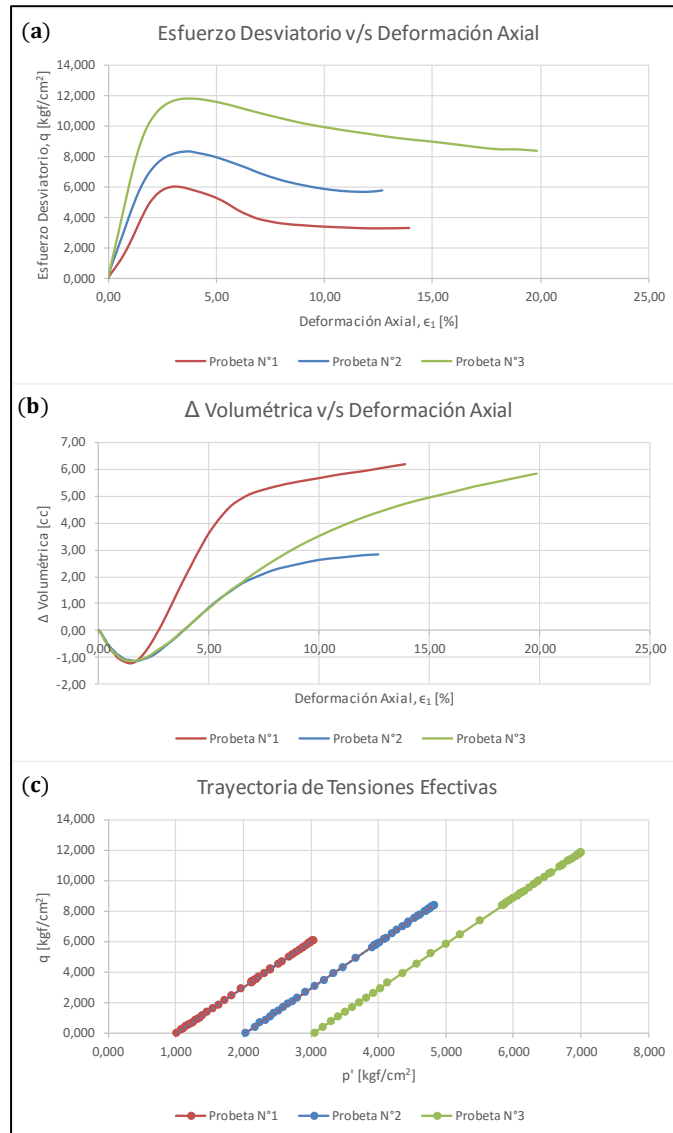


Figura 4-9: Ensayos de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. (a) Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 , (b) Δ Volumétrica – Deformación axial ϵ_1 y (c) Trayectoria de tensiones efectivas (TTE) – Arena Limosa.

4.6. Consolidación Isotrópica

Con la finalidad de encontrar un límite superior sobre el cual no pueden existir combinaciones de relación de vacíos y esfuerzo efectivo medio en el plano $e - p'$, se realizó un ensayo de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible para la arena limosa en estudio y con sucesivos incrementos de presión de cámara triaxial. Con esto, fue posible definir en el plano $e - p'$ una curva análoga a la curva de consolidación normal isotrópica para arcillas. Se utilizó el método de confección de probeta, wet tamping, dado que según Verdugo e Ishihara (1996) este permite lograr el empaque más suelto posible en comparación a otros métodos de confección. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 4-11: Resultados para confección de curva de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible – Arena Limosa.

Incremento de carga p' [kPa]	Incremento de carga p' [kgf/cm ²]	Relación de vacíos final e_f -
96	0,979	0,873
194	1,978	0,786
292	2,978	0,736
400	4,079	0,701
500	5,099	0,667
592	6,037	0,652
684	6,975	0,638

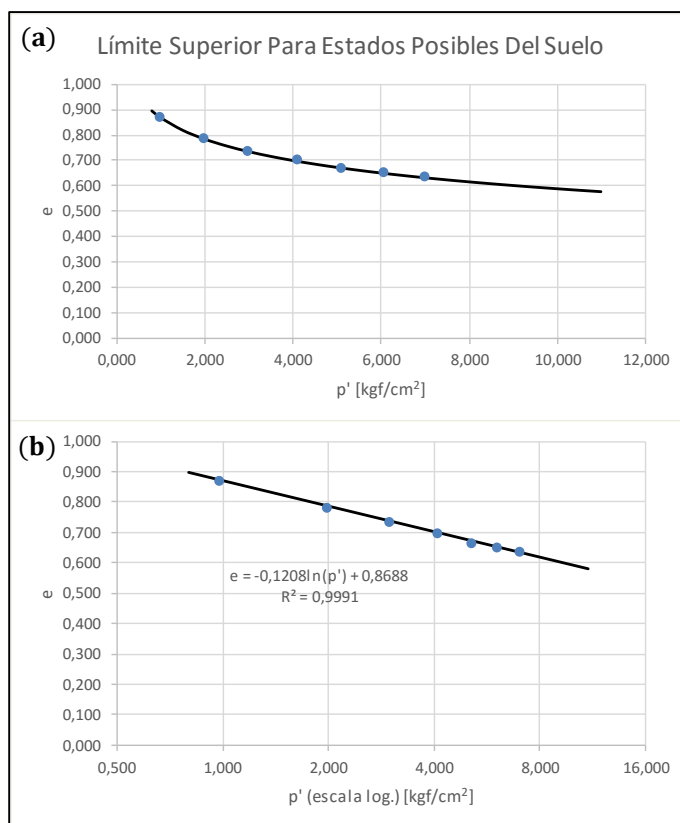


Figura 4-10: Curva de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible en: (a) Plano $e - p'$ y (b) Plano $e - \log p'$ – Arena Limosa.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una serie de análisis con los datos obtenidos de los distintos ensayos realizados sobre la arena limosa en el laboratorio LEMCO. Algunos de estos análisis ya fueron en parte enunciados en el capítulo anterior, pero por un tema de comodidad se re – enuncian en este ítem y se adicionan otros de particular relevancia. Estos son:

- Estado crítico: Análisis de resultados utilizando la teoría del estado crítico, esto es, obtención de la línea de estado crítico, análisis de curvas y trayectorias de tensiones al tender a este estado, y determinación de un parámetro de interés asociado al potencial de licuefacción del suelo.
- Comportamiento “normal” y “reverso”: Análisis del comportamiento no drenado que presenta la arena limosa en estudio, para los distintos estados de densidad.
- Envolventes lineales de falla: Definición de envolventes para cuatro estados de densidad inicial distintos y para cada tipo de ensayo (compresión triaxial CIU y CID). La idea es comparar los parámetros geotécnicos de resistencia al corte entre ensayos y para cada estado inicial.
- Ángulo de fricción movilizado máximo: Análisis de los ángulos de fricción movilizados máximos de los ensayos drenados y su relación con el fenómeno de dilatación.

5.2. Estado Crítico

Tal como se dijo en el ítem 4.5.4, para la arena limosa en estudio se consideró el estado crítico a un 20 [%] deformación axial, donde el esfuerzo desviatorio, volumen y presión de poros eran casi constantes. Los valores de q_{cri} , p'_{cri} y e_{cri} considerados, ya fueron expuestos en el ítem 4.5.5. Ahora, la figura 5-1 presenta la línea de estado crítico (CSL) obtenida con ellos. De ella se puede apreciar que la línea de estado crítico se forma bastante bien tanto en el plano $q - p'$, como en los planos $e - p'$ y $e - \log p'$. No se aprecia mayor diferencia o desviación de los puntos considerados a partir de ensayos de compresión triaxial CIU y CID, con respecto a la línea de estado crítico obtenida para cada uno de los planos coordenados analizados. En otras palabras, la línea de estado crítico es esencialmente la misma al ser obtenida a partir de ensayos de compresión triaxial CIU o CID, aunque esto no puede tomarse como una conclusión absoluta dada la pequeña cantidad de puntos obtenidos a partir de los ensayos de compresión triaxial CID. Y esta pequeña cantidad de puntos era totalmente esperable, ya que teóricamente en ensayos de compresión triaxial CID, independiente del estado de densidad inicial y bajo el mismo esfuerzo efectivo de consolidación, se espera que en estado crítico las probetas converjan al mismo esfuerzo desviatorio, esfuerzo efectivo medio y relación de vacíos. En este caso, los ensayos de compresión triaxial CID sólo fueron realizados bajo tres distintos esfuerzos efectivos de consolidación (100 [kPa], 200 [kPa] y 300 [kPa]), por lo cual la cantidad total esperable de puntos obtenidos a partir de estos ensayos y para formar la línea de estado crítico en cualquiera de los planos anteriores, era sólo tres.

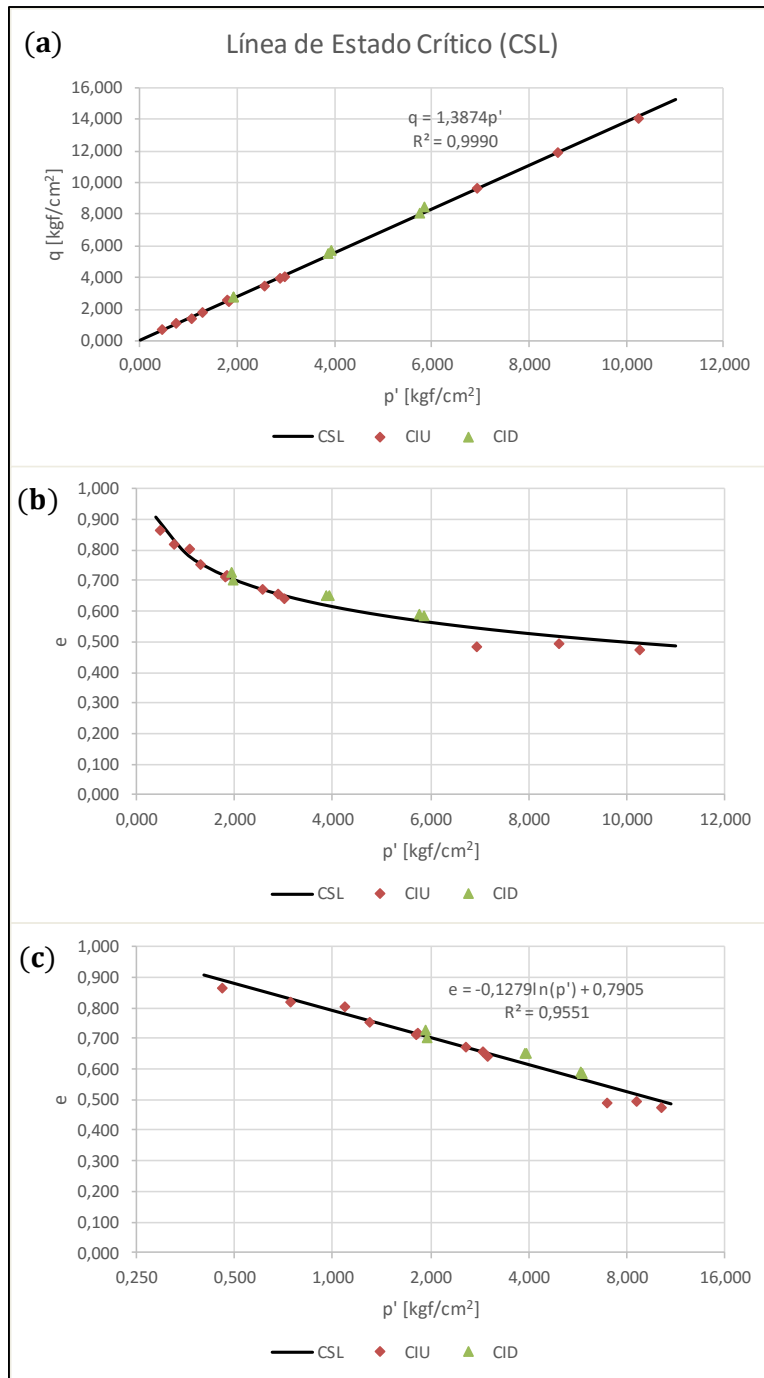


Figura 5-1: Línea de estado crítico (CSL) en: (a) Plano $q - p'$, (b) Plano $e - p'$ y (c) Plano $e - \log p' -$ Arena Limosa.

La línea de estado crítico en el plano $q - p'$, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9990$, es la que mejor se forma. Esta línea indica la no presencia de cohesión crítica, $c'_{cri} = 0$ [kgf/cm²], que no es otra cosa que la cohesión verdadera del suelo. Este resultado es consistente con el material en estudio, una arena limosa, ya que al no poseer una cementación natural es esperable que su cohesión verdadera sea nula. La pendiente de esta línea, $M = 1,3874$, es un parámetro que se

asocia con el ángulo de fricción efectivo en estado crítico a través de la ecuación (2-84), obteniéndose un valor aproximado de $\phi'_{cri} = 34,3$ [°].

En los planos $e - p'$ y $e - \log p'$, se mantiene igualmente un alto grado de correlación, $R^2 = 0,9551$, obteniéndose la típica forma curva en el primero y la típica forma lineal en el segundo. La linealización en el plano $e - \log p'$ arroja otros parámetros de importancia, cuyos valores son $\Gamma = 0,7905$ (para $p' = 1$ [kgf/cm²]) y $\lambda = 0,1279$ respectivamente.

La línea de estado crítico representa una propiedad del suelo que se alcanza bajo grandes deformaciones, con lo cual los parámetros ϕ'_{cri} , M , Γ y λ también lo son. Algunos de estos parámetros de estado crítico son utilizados como “inputs” para modelos elastoplásticos, como por ejemplo en el modelo Cam clay.

5.2.1. Análisis a Partir de Ensayos de Compresión Triaxial CID

En la figura 5-2 se muestra la evolución del esfuerzo desviatorio a medida que avanza el corte en probetas en ensayos de compresión triaxial CID. Se aprecia que para los estados de densidad de confección sueltos, con densidades relativas de 20 [%] y 48 [%], y bajo un mismo esfuerzo efectivo de consolidación, se tiende muy bien al mismo esfuerzo desviatorio constante en estado crítico, fallando en dicho estado. Ello no ocurre en las probetas de mayor densidad, las cuales debido al comportamiento dilatante desarrollan peaks de resistencia, siendo este cada vez más notorio con el aumento de la densidad inicial. Si bien en las probetas de densidad relativa inicial de 71 [%], el esfuerzo desviatorio a un 20 [%] de deformación axial, que es el criterio que se utilizó para considerar el estado crítico, registra valores razonablemente parecidos a los alcanzados desde estados sueltos, no prosigue la deformación bajo un estado tensional constante como dicta el estado crítico. En las probetas más densas, con densidad relativa inicial de 97 [%], ni siquiera se pudo alcanzar el 20 [%] de deformación axial, debido al aumento de resistencia que comenzaba a ocurrir presumiblemente por la acción de la membrana sobre el plano de deslizamiento inclinado (falla frágil). En estas probetas, el valor final de esfuerzo desviatorio alcanzado al detener el ensayo, se podría también asumir bastante parecido al alcanzado a un 20 [%] de deformación desde los estados inicialmente sueltos, pero queda la incertidumbre de si en condiciones ideales (sin plano de falla inclinado) hubiera proseguido la deformación bajo un estado tensional aproximadamente constante.

La figura 5-3 muestra la evolución de la relación de vacíos a medida que avanza el corte en probetas en ensayos de compresión triaxial CID. Nuevamente, las probetas más sueltas son las que mejores resultados presentan. Bajo un mismo esfuerzo efectivo de consolidación, éstas tienden bastante bien a la misma relación de vacíos crítica y constante, exceptuando un poco los ensayos bajo $\sigma'_0 = 100$ [kPa], donde se produce una pequeña divergencia atribuible a una inexactitud en la toma de la humedad final. Por otro lado, las probetas con densidades relativas de 71 [%] y 97 [%] presentan una notoria dificultad para alcanzar las mismas relaciones de vacíos críticas que los estados más sueltos, denotando además la ausencia de tendencia a un valor constante. La mayor divergencia se produce con las probetas más densas (DR = 97 [%]), las cuales parten de una bajísima relación de vacíos, luego experimentan una pequeña contracción, para posteriormente dilatar de forma insuficiente en búsqueda del estado crítico.

Por lo tanto, se comprueba experimentalmente la incertidumbre que se genera al intentar determinar el estado crítico a partir de muestras densas en condición drenada (Mooney et al., 1998; Finno y Rechenmacher, 2003), justificándose la utilización de los datos únicamente obtenidos a partir de estados inicialmente sueltos (comportamiento contractivo). Dicha incertidumbre dice relación con el comportamiento dilatante que presentan experimentan las muestras densas, sobre todo en lo que respecta a la determinación de la relación de vacíos en estado crítico, para lo cual se precisa la absorción de cantidades importantes de agua durante el corte. Otra posible fuente de error dice relación con la falta de homogeneidad de la probeta después de su confección, lo cual evidentemente es más notorio en probetas densas, donde se requiere de mayor energía de compactación para la confección bajo el método moist – tamping. Con respecto a la aparición de la banda de corte en las probetas más densas, muchos autores (por ejemplo: Yamamuro y Lade, 1998) utilizan probetas de igual altura y diámetro con la finalidad de evitar su aparición, teniendo que hacer uso de cabezales lubricados de modo tal que la posibilidad de abultamiento no se vea incrementada y así obtener deformaciones más uniformes.

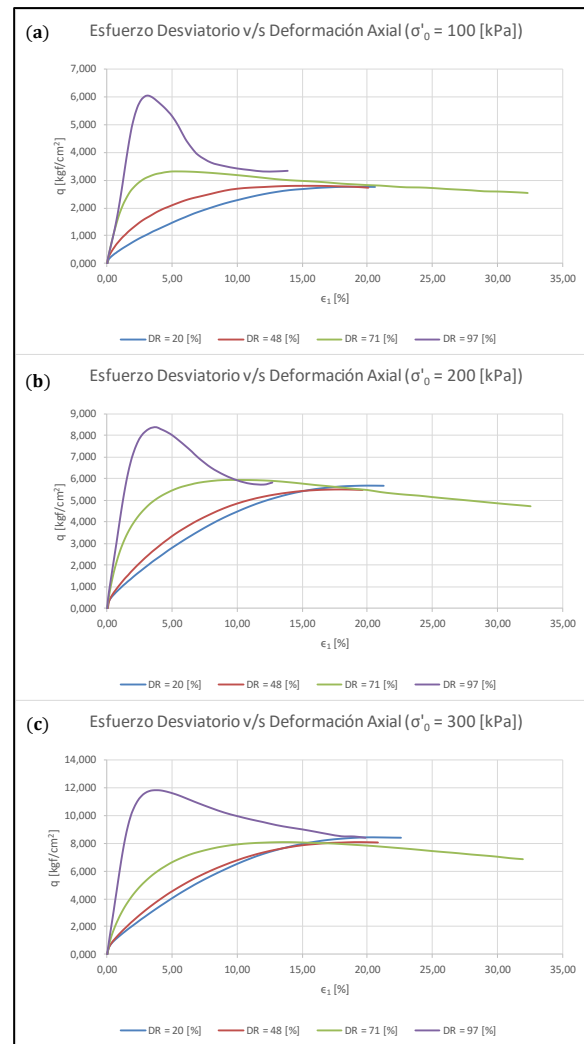


Figura 5-2: Esfuerzo desviatorio q – Deformación axial ϵ_1 en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100$ [kPa], (b) $\sigma'_0 = 200$ [kPa] y (c) $\sigma'_0 = 300$ [kPa] – Arena Limosa.

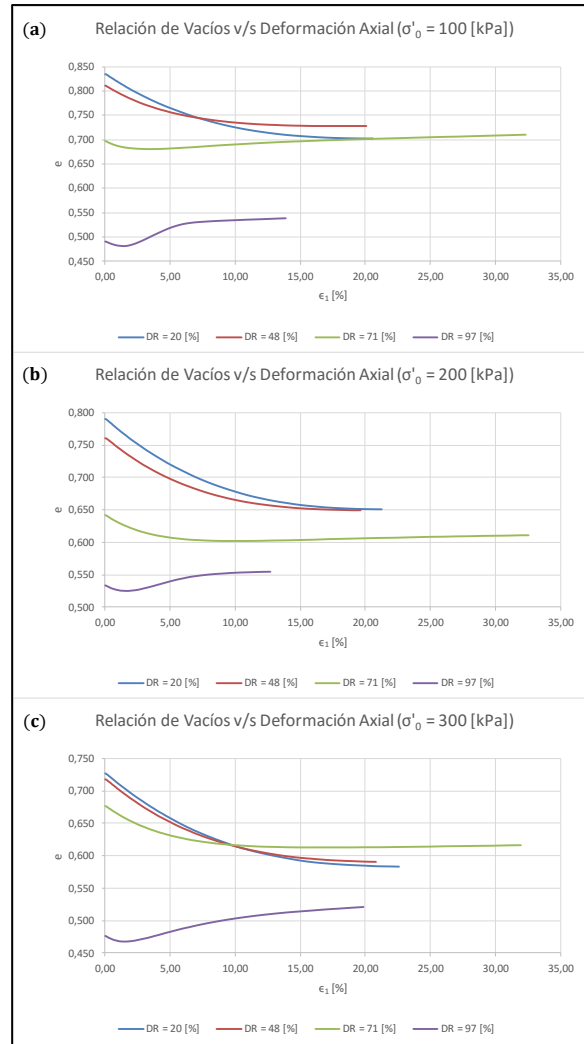


Figura 5-3: Relación de vacíos e – Deformación axial ϵ_1 en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100$ [kPa], (b) $\sigma'_0 = 200$ [kPa] y (c) $\sigma'_0 = 300$ [kPa] – Arena Limosa.

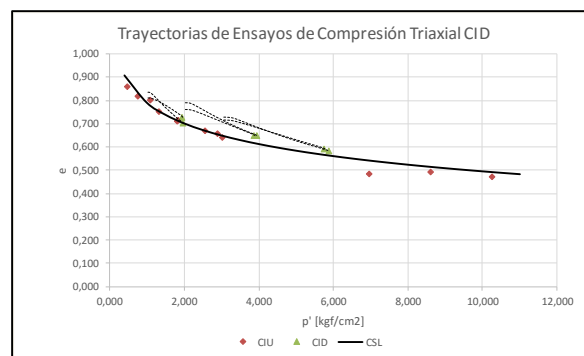


Figura 5-4: Trayectorias de ensayos de compresión triaxial CID inicialmente sueltos en el plano $e - p'$ – Arena Limosa.

Finalmente, en la figura 5-4 se puede visualizar también la evolución de la relación de vacíos a medida que se desarrolla el corte, pero en este caso en función del esfuerzo efectivo medio y sólo

para los ensayos de compresión triaxial CID finamente considerados en la determinación de la línea de estado crítico. Las trayectorias en el plano $e - p'$ de estos ensayos, muestran de otro modo el comportamiento puramente contractivo de estas probetas inicialmente sueltas, con una continua disminución de la relación de vacíos y un continuo aumento del esfuerzo efectivo medio hasta alcanzar la línea de estado crítico.

5.2.2. Análisis a Partir de Ensayos de Compresión Triaxial CIU

Los ensayos de compresión triaxial CIU son los que más puntos entregaron para la formación de la línea de estado crítico de la arena limosa en estudio, dado que la relación de vacíos después de la consolidación es la que domina el estado tensional alcanzable en estado crítico. Además, a priori no había nada que indicara cierta incertidumbre con respecto a la utilización de los datos obtenidos de estos ensayos, con lo cual fue posible utilizar la totalidad de los puntos, incluso los provenientes de estados inicialmente densos, donde pareciera ser que la presunta falta de homogeneidad de las probetas no tiene influencia aparente o excesiva en el comportamiento no drenado en estado crítico.

Como se pudo apreciar en los gráficos del ítem 4.5.5.1, en todos los ensayos, incluso en los realizados sobre probetas inicialmente densas, se alcanzó un esfuerzo desviatorio y presión de poros final aproximadamente constantes, ratificando la convergencia al estado crítico para grandes deformaciones. Ahora, resulta interesante analizar esta convergencia a partir de las trayectorias de tensiones efectivas (TTE) en el plano $q - p'$ y que se muestran en la figura 5-5. Las TTE de las probetas de densidad relativa inicial de 20 [%] indican un comportamiento no drenado fuertemente contractivo, con gran aumento inicial de la presión de poros y disminución del esfuerzo efectivo medio, para posteriormente cambiar de fase hacia un comportamiento levemente dilatante, con una pequeña disminución de la presión de poros y aumento del esfuerzo efectivo medio hasta alcanzar el estado crítico. Cabe destacar, en estas probetas el comportamiento contractivo no está aparejado con una disminución del esfuerzo desviatorio, es más, éste es siempre prácticamente creciente hasta alcanzar el estado crítico, es decir, todas estas probetas fallan en estado crítico. Las probetas de densidad relativa inicial de 48 [%] presentan este mismo patrón de comportamiento y observaciones, salvo el hecho de que por ser un estado más denso el comportamiento es comparativamente menos contractivo y más dilatante, cambiando de fase para menores deformaciones axiales. Al aumentar la densidad relativa inicial, el patrón de comportamiento se vuelve cada vez menos contractivo y más dilatante, se mantiene la observación de que la zona contractiva de la TTE no está aparejada a una disminución del esfuerzo desviatorio, pero ocurre una diferencia en el tramo dilatante y antes de alcanzar el estado crítico, presentándose una pequeña caída de resistencia y provocando que la falla (según el criterio de esfuerzo desviatorio máximo) no ocurra justamente en estado crítico. Esta pequeña caída de resistencia sólo es un poco más notoria en el caso de la probeta ensayada bajo $\sigma'_0 = 100 \text{ [kPa]}$ del estado inicial más denso, donde la falla, y a diferencia de sus pares, fue clara y visualmente frágil.

Otro aspecto interesante de destacar de la figura 5-5, es la temprana intersección de las TTE con la línea de estado crítico en el plano $q - p'$ y antes de alcanzar el 20 [%] de deformación axial. Este efecto es mucho más notorio en las probetas inicialmente densas, produciéndose dicha intersección para deformaciones axiales inferiores a 1 [%]. Es imposible que el estado crítico sea alcanzado para niveles de deformación tan bajos, por lo cual la intersección en cuestión es sólo

aparente, ya que realmente no es alcanzada la línea de estado crítico en el espacio (p', q, e) , sino que las trayectorias de los ensayos pasan justo por la proyección de esta línea en el plano $q - p'$, dando la errónea impresión de haber alcanzado tempranamente el estado crítico.

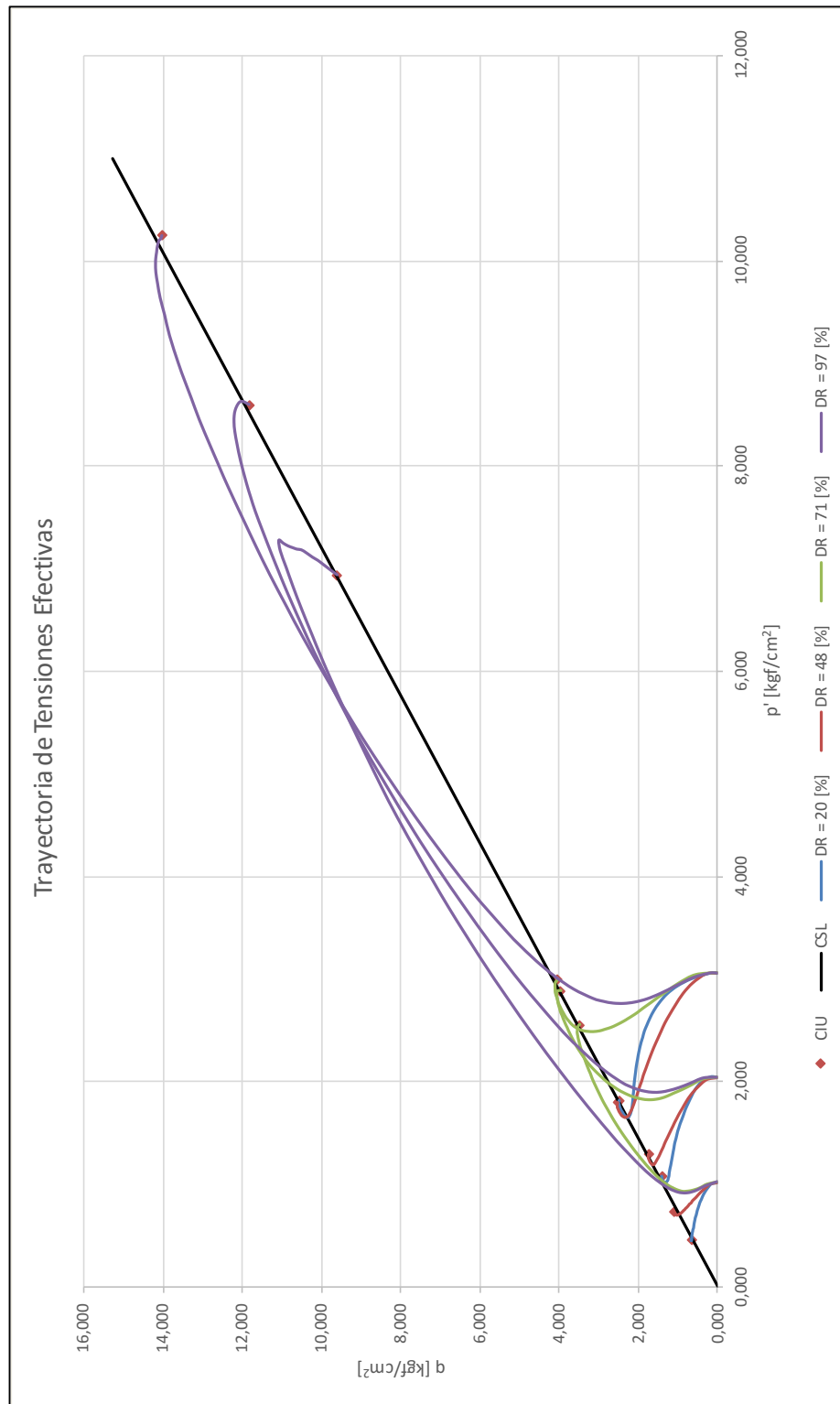


Figura 5-5: Trayectoria de tensiones efectivas de ensayos de compresión triaxial CIU – Arena Limosa.

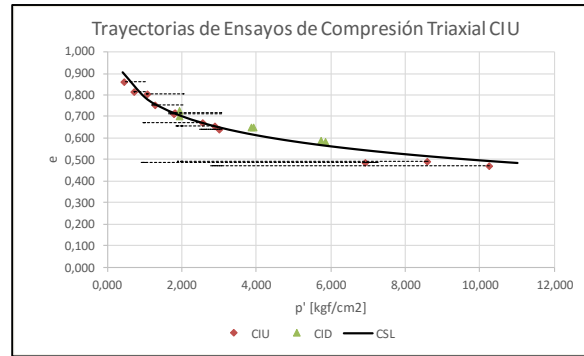


Figura 5-6: Trayectorias de ensayos de compresión triaxial CIU en el plano $e - p'$ – Arena Limosa.

En la figura 5-6 se pueden apreciar las trayectorias de estos ensayos durante el corte y en el plano $e - p'$. Dadas las condiciones de saturación total y no drenaje, los movimientos en este plano son horizontales, es decir, sin cambio en la relación de vacíos. Los estados inicialmente sueltos ($DR = 20$ [%] y $DR = 48$ [%]) incluso después de la consolidación se ubican por sobre la línea de estado crítico en el plano $e - p'$, por lo cual la trayectoria es netamente contractiva, de derecha a izquierda, y como consecuencia de un aumento de la presión de poros. Los estados inicialmente densos ($DR = 71$ [%] y $DR = 97$ [%]) se ubican debajo de la línea de estado crítico en el plano $e - p'$, por lo cual la trayectoria es preferentemente dilatante, de izquierda a derecha, y como consecuencia de una disminución de la presión de poros.

5.2.3. Parámetro Para Evaluar la Vulnerabilidad de Licuefacción del Suelo

Como es sabido, la licuefacción en el suelo está asociada a una pérdida de resistencia cortante producto de un gran aumento de la presión de poros. De este modo, el suelo pasa de un estado sólido a un estado líquido, o adquiere la consistencia de un líquido viscoso, como consecuencia de un patrón de comportamiento eminentemente contractivo.

Diversos autores han definido distintos parámetros con la finalidad de evaluar la susceptibilidad de licuefacción del suelo. En este sentido, pueden clasificarse en dos tipos: parámetros que representan una propiedad intrínseca del material y parámetros de estado. Este ítem dice relación con el parámetro R_c , denominado contractividad relativa, propuesto por Verdugo e Ishihara (1996), y que representa una propiedad del suelo, ya que es largamente dependiente de la composición de sus granos (forma, dureza, contenido de finos y plasticidad de los finos). Para calcular este parámetro se necesita conocer la línea de estado crítico, la curva de consolidación isotrópica desde el estado más suelto posible, y la curva de consolidación isotrópica desde el estado más denso posible, todas en el plano $e - p'$. Estas curvas de consolidación isotrópica representan una cota superior y otra inferior para todos los estados posibles del suelo en el plano $e - p'$. La cota inferior usualmente puede suponerse como una línea horizontal pasando por la relación de vacíos mínima del material, dado que para el caso del estado más denso las deformaciones volumétricas son incluso pequeñas cuando la presión efectiva de confinamiento es muy grande (esta simplificación está obviamente limitada por la presión desde la cual el rompimiento de partículas comienza a ser importante). Dicho esto, el parámetro R_c se define del siguiente modo:

$$R_c = \frac{(e_{max})_1 - (e_{ss})_1}{(e_{max})_1 - (e_{min})_1} \quad (5-1)$$

Donde:

$(e_{max})_1$: Relación de vacíos en la curva de consolidación isotrópica superior para un valor arbitrario de esfuerzo efectivo medio de 100 [kPa].

$(e_{min})_1$: Relación de vacíos en la curva de consolidación isotrópica inferior para el mismo valor arbitrario de esfuerzo efectivo medio de 100 [kPa].

$(e_{ss})_1$: Relación de vacíos en la línea de estado crítico (steady state line) para el mismo valor arbitrario de esfuerzo efectivo medio de 100 [kPa].

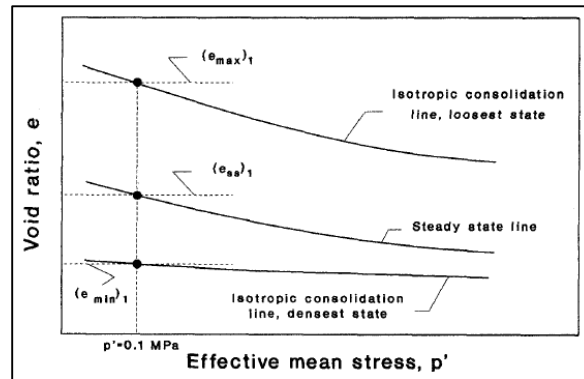


Figura 5-7: Definición de la contractividad relativa, R_c (Verdugo e Ishihara, 1996).

Desde un punto de vista teórico, R_c puede tomar valores entre 0 y 1. Un valor de $R_c = 1$ representa un suelo hipotético que siempre tendrá una respuesta contractiva, mientras $R_c = 0$ representa un suelo hipotético que siempre tendrá una respuesta dilatante. Para el caso de la arena limosa de esta memoria, la figura 5-8 muestra la línea de estado crítico (CSL) y las curvas de consolidación isotrópica descritas. Con la ayuda de regresiones semilogarítmicas se pueden calcular $(e_{max})_1$ y $(e_{ss})_1$, mientras que $(e_{min})_1$ se asume como la relación de vacíos mínima, con lo cual se obtiene $R_c = 0,19$. Este valor es bastante bajo y cercano a 0, por lo cual esta arena limosa puede ser considerada como un material poco contractivo y, por ende, no tan vulnerable al fenómeno de licuefacción.

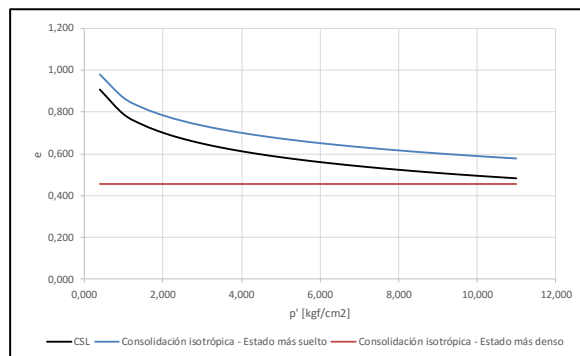


Figura 5-8: Línea de estado crítico (CSL) y curvas de consolidación isotrópica para los estados más suelto y denso – Arena Limosa.

Tabla 5-1: Contractividad relativa, R_c , y valores utilizados – Arena Limosa.

$(e_{\max})_1$	$(e_{\min})_1$	(e_{ss})	R_c
0,866	0,457	0,788	0,19

5.3. Comportamiento “Normal” y “Reverso” No Drenado

Como fue expuesto en el ítem 2.5.1, las arenas limpias presentan regularmente un patrón comportamiento no drenado “normal”, en el cual y para un mismo estado de densidad inicial (de confección), tiende a aumentar la inestabilidad con un aumento del esfuerzo efectivo de consolidación. Por otro lado, Yamamuro y Lade (1998) observaron un comportamiento no drenado “reverso” en una mezcla de arena – limo inicialmente suelta, con aumento de la estabilidad a medida que aumentaba el esfuerzo efectivo de consolidación. La inestabilidad en estos casos fue establecida en función de la caída de esfuerzo desviatorio en el tramo contractivo de la trayectoria de tensiones efectivas (TTE) y después de alcanzar un peak inicial, específicamente utilizando la relación entre el esfuerzo desviatorio en el cambio de fase (quasi – steady state, QSS) y el peak inicial, esto es, $q(qss)/q(peak)$. Así, el comportamiento era completamente estable cuando esta relación alcanzaba el valor unitario, independiente de lo que ocurriera después. La arena limosa de esta memoria en ninguno de los ensayos de compresión triaxial CIU presentó un peak inicial, sino que su esfuerzo desviatorio fue constantemente creciente hasta alcanzar el punto de cambio de fase, por lo cual no sería posible realizar este análisis. No obstante, si se analiza con más detalle la figura 2-37, se puede observar que entre más estable sea el comportamiento, mayor es la tendencia dilatante. Asociar la estabilidad con la tendencia dilatante parece más que correcto, ya que esta última se explica por una disminución de la presión de poros, alejando por lo tanto la posibilidad de que ocurra licuefacción. De este modo, en esta memoria la estabilidad se define alternativamente en función del aumento de esfuerzo desviatorio en el tramo dilatante de la TTE, específicamente utilizando la relación entre el esfuerzo desviatorio en estado crítico y el cambio de fase, esto es, $q_{cri}/q(qss)$.

Tabla 5-2: Valores utilizados para análisis de comportamiento “normal” y reverso” – Arena Limosa.

Densidad Relativa [%]	Probeta N° -	Esf. Efectivo de Consolidación σ'_0		q_{cri} [kgf/cm ²]	$q(qss)$ [kgf/cm ²]	$q_{cri}/q(qss)$
		[kPa]	[kgf/cm ²]			
DR = 20 [%]	1	100	1,020	0,653	0,653	1,000
	2	200	2,039	1,411	1,308	1,079
	3	300	3,059	2,482	2,280	1,088
DR = 48 [%]	1	100	1,020	1,085	1,029	1,054
	2	200	2,039	1,740	1,638	1,063
	3	300	3,059	2,531	2,346	1,079
DR = 71 [%]	1	100	1,020	3,481	0,880	3,955
	2	200	2,039	3,960	1,682	2,355
	3	300	3,059	4,036	3,147	1,283
DR = 97 [%]	1	100	1,020	9,609	0,778	12,358
	2	200	2,039	11,830	1,644	7,196
	3	300	3,059	14,028	2,370	5,919

La tabla 5-2 presenta los valores utilizados para el análisis aquí descrito. En la probeta N°1 del estado más suelto no se registró cambio de fase, sino que el comportamiento fue completamente contractivo hasta alcanzar el estado crítico, por lo cual se consideró convenientemente que $q_{cri} =$

$q(q_{ss})$. Los estados inicialmente sueltos ($DR = 20$ [%] y $DR = 48$ [%]) presentan un patrón de comportamiento “reverso”, ya que la relación $q_{cri}/q(q_{ss})$ tiende a aumentar a medida que aumenta el esfuerzo efectivo de consolidación (figura 5-9 y figura 5-10), es decir, tiende a crecer la tendencia dilatante. En cambio, los estados inicialmente densos ($DR = 71$ [%] y $DR = 97$ [%]), a pesar de tener una respuesta extremadamente dilatante, si presentan un patrón de comportamiento “normal”, con disminución de la relación $q_{cri}/q(q_{ss})$ y de la tendencia dilatante a medida que aumenta el esfuerzo efectivo de consolidación (figura 5-11 y figura 5-12).

Con esto, el comportamiento observado en las muestras inicialmente sueltas fue cualitativamente parecido al “reverso” de Yamamuro y Lade (1998), ya que ellos sólo ensayaron una mezcla de arena – limo suelta con densidad relativa inicial de 30 [%].

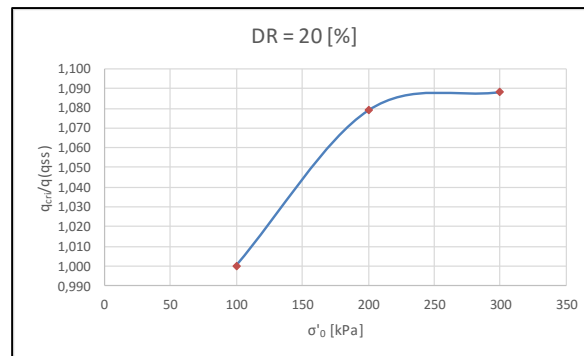


Figura 5-9: Comportamiento “reverso” no drenado – DR = 20 [%] – Arena Limosa.

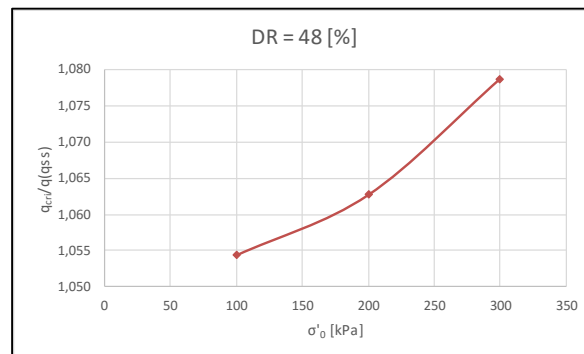


Figura 5-10: Comportamiento “reverso” no drenado – DR = 48 [%] – Arena Limosa.

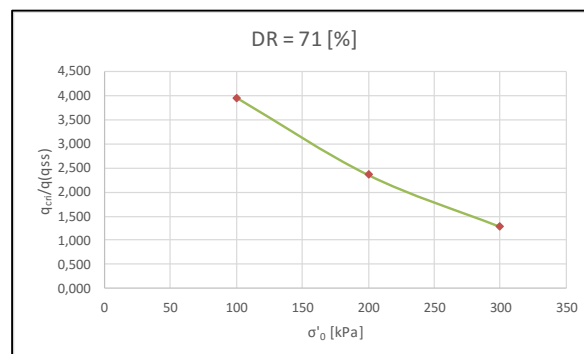


Figura 5-11: Comportamiento “normal” no drenado – DR = 71 [%] – Arena Limosa.

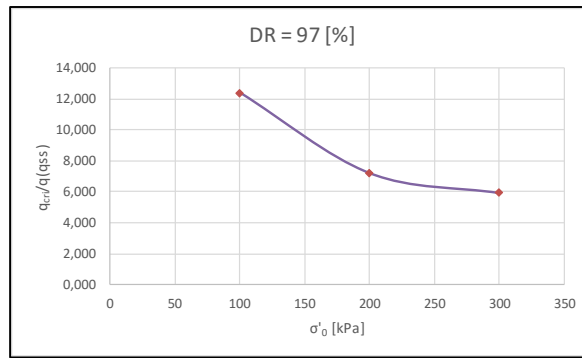


Figura 5-12: Comportamiento “normal” no drenado – DR = [%] – Arena Limosa.

5.4. Envoltentes Lineales de Falla

Una de las aplicaciones más comunes de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID es la definición de envoltentes lineales de falla para ciertas condiciones y esfuerzos iniciales y utilizando el criterio de falla de falla de Mohr – Coulomb. Está bien establecido que, en general, una envoltente de falla es más bien curva, por lo que el criterio de falla de Mohr – Coulomb sólo se utiliza como modo de simplificación y herramienta de modelación de las combinaciones de esfuerzos normales y cortantes en la falla. Así, una envoltente lineal de falla definida a través de los parámetros geotécnicos c' y ϕ' , tiene validez para las condiciones de densidad, humedad y esfuerzos iniciales (esfuerzos efectivos de consolidación) de las probetas ensayadas, como también para la secuencia tensional de los ensayos realizados, teniendo estas que emular con la mayor confiabilidad posible las condiciones de terreno. Está bastante claro que lo realmente correcto es la utilización de los parámetros geotécnicos efectivos, así como que la cohesión obtenida regularmente es sólo un valor aparente que surge producto de forzar un ajuste lineal. Ahora, lo que resta es realizar una comparación de envoltentes lineales de falla y parámetros geotécnicos efectivos entre ensayos, pero bajo las mismas condiciones iniciales.

Bishop y Henkel (1962) concluyeron que para una muestra de suelo dada, los parámetros de resistencia al corte c' y ϕ' son casi independientes del tipo de ensayo usado para medirlos, con las siguientes calificaciones:

- Para arcillas normalmente consolidadas, los valores de c' y ϕ' obtenidos de ensayos consolidados – drenados con medición de la presión de poros y de ensayos drenados son, para efectos prácticos, idénticos cuando se utilizan velocidades de deformación comparables.
- Para arcillas fuertemente preconsolidadas y para arenas (excepto en un estado muy suelto), los ensayos drenados conducirán a valores ligeramente superiores de c' y ϕ' , debido al trabajo hecho en el aumento de volumen de la muestra durante el corte y a la menor deformación en la falla.

Los autores no dieron mayor información sobre las condiciones bajo las cuales son válidos estos postulados, pero se infiere que implícitamente se refieren a las mismas condiciones de densidad, humedad y esfuerzos iniciales.

Con los datos de los ensayos realizados en el laboratorio LEMCO, se pueden obtener cuatro envoltentes lineales de falla por cada tipo de ensayo, siendo una por cada estado de densidad inicial.

El criterio y valores considerados en la falla ya fueron mencionados en el ítem 4.5.5. Ahora, por comodidad se presenta cada una de estas envolventes en el plano $q - p'$, así como los parámetros geotécnicos que las modelan.

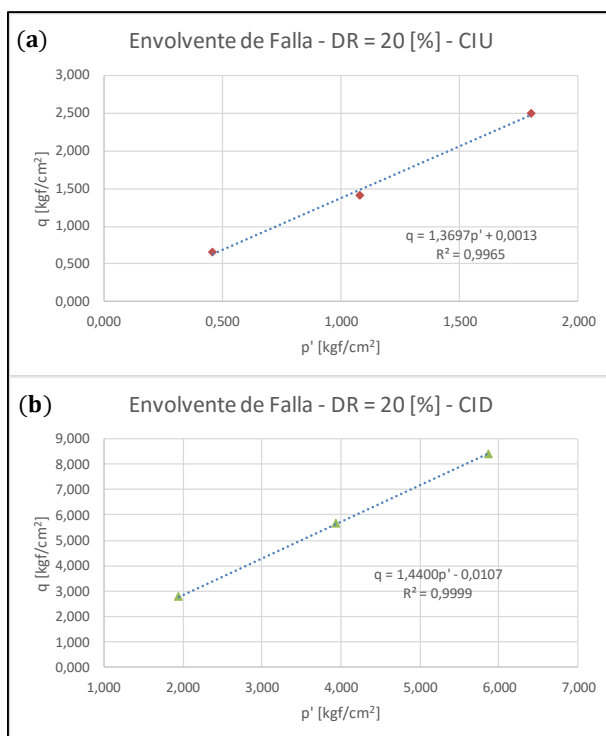


Figura 5-13: Envoltente de falla - DR = 20 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.

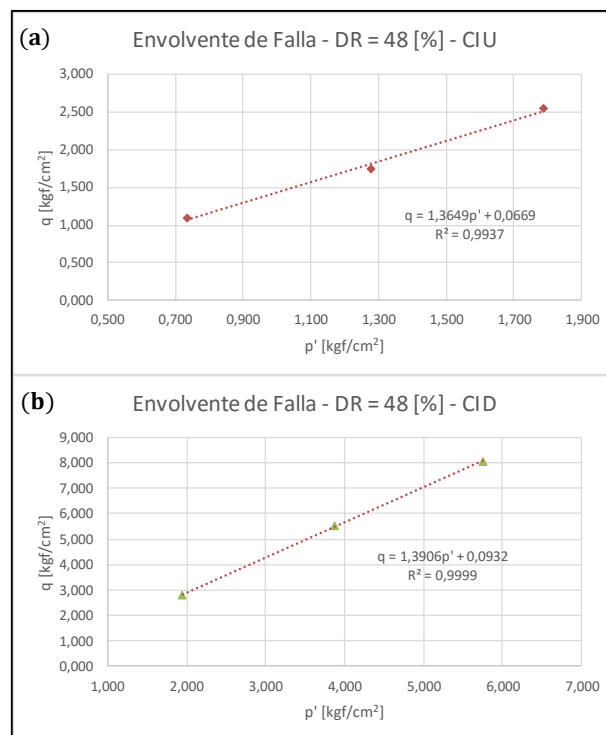


Figura 5-14: Envoltente de falla - DR = 48 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.

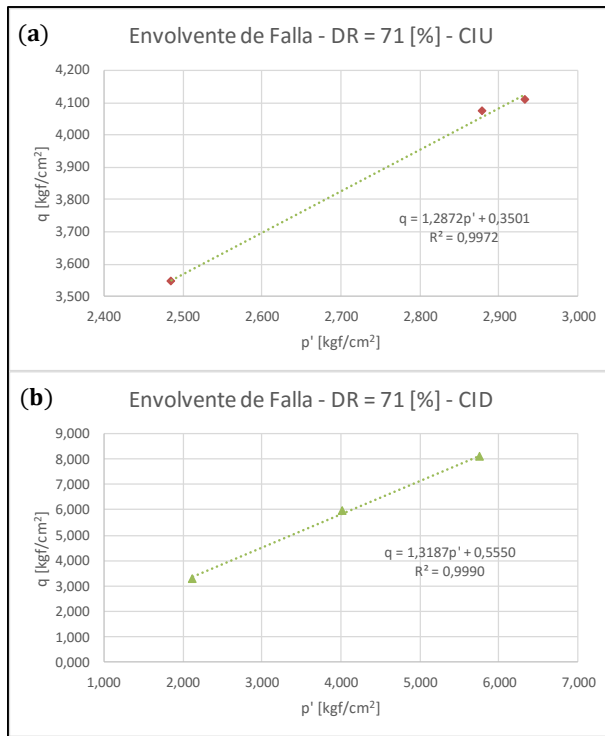


Figura 5-15: Envoltante de falla - DR = 71 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.

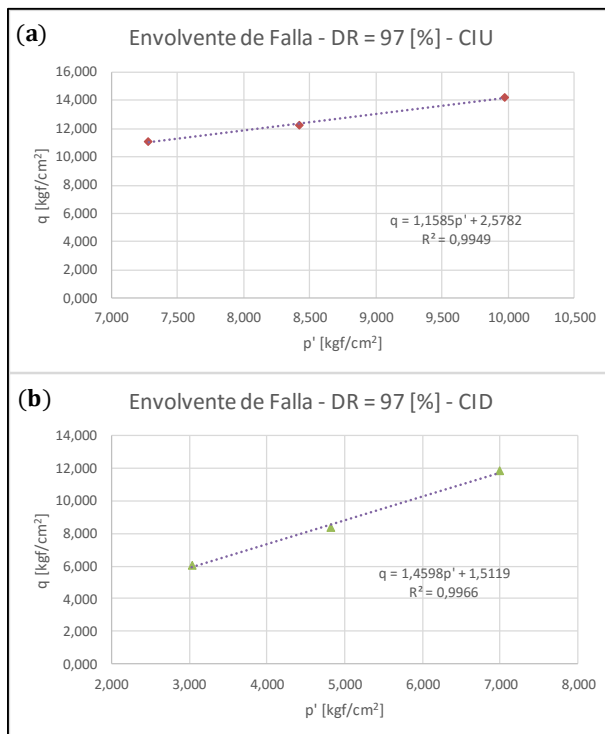


Figura 5-16: Envoltante de falla - DR = 97 [%] – ensayo de comp. triaxial: (a) CIU y (b) CID – Arena Limosa.

Tabla 5-3: Parámetros geotécnicos efectivos de resistencia al corte para distintas densidades iniciales y tipo de ensayo – Arena Limosa.

Densidad Relativa [%]	CIU		CID	
	ϕ' [°]	c' [kgf/cm ²]	ϕ' [°]	c' [kgf/cm ²]
DR = 20 [%]	33,9	0,001	35,5	-0,005
DR = 48 [%]	33,8	0,033	34,4	0,046
DR = 71 [%]	32,0	0,170	32,7	0,270
DR = 97 [%]	29,0	1,236	35,9	0,751

Como primer comentario, se debe destacar que las regresiones lineales para formar las distintas envolventes de falla, se realizaron con éxito, presentando altísimos coeficientes de correlación, R^2 , y siempre ligeramente superiores a 0,9900. Con respecto a los resultados presentados en la tabla 5-3, se debe mencionar que estos valores surgidos producto de forzar un ajuste lineal, son bastante sensibles a pequeñas dispersiones en los datos utilizados, así como al criterio que se utilice para determinar la falla. En esta memoria se decidió utilizar el esfuerzo desviatorio máximo dentro del ensayo, independiente de la deformación axial a la que ocurriera, como criterio para la determinación de la falla de una probeta.

Como ya fue expuesto en los ítem 5.2.1 y 5.2.2, las probetas inicialmente sueltas, correspondientes a los estados de densidad inicial de $DR = 20$ [%] y $DR = 48$ [%], fallan razonablemente en estado crítico tanto en los ensayos de compresión triaxial CIU como en los de compresión triaxial CID, debido a lo cual sus parámetros geotécnicos de resistencia al corte son muy similares entre sí y con respecto a los críticos obtenidos al comienzo del ítem 5.2 ($\phi'_{cri} = 34,3$ [°] y $c'_{cri} = 0$). La desviación de los ángulos de fricción efectivos con respecto a este valor es mínima, alcanzando 1,2 [°] de diferencia en el caso de la envolvente del estado inicial más suelto de los ensayos de compresión triaxial CID. Los valores de cohesión efectiva, surgidos producto de forzar el ajuste lineal, son muy cercanos a cero y prácticamente despreciables, ratificando que la falla en estas probetas ocurre en estado crítico. La cohesión efectiva de la envolvente lineal del estado inicial más suelto de los ensayos de compresión triaxial CID, a pesar de ser muy pequeña, adopta un valor negativo, lo cual no es físicamente posible, por lo cual lo más recomendable sería simplemente considerarla como nula.

Las probetas de densidad relativa inicial de 71 [%] de los ensayos de compresión triaxial CID, no fallan en estado crítico, sino que producto de su respuesta dilatante presentan peaks de resistencia, aunque no excesivamente pronunciados y sin estar asociados a una falla visualmente frágil. Estas probetas, pero en el caso de los ensayos de compresión triaxial CIU, tampoco fallan justamente en estado crítico, sino que presentan unos aún más leves peaks de resistencia, casi imperceptibles antes de caer a estado crítico. Las cohesiones efectivas entre ensayos son algo más distintas, lo cual ya viene a ser una especie de regla, en el sentido de que es, por decir lo menos, difícil que el ajuste lineal arroje valores muy similares. Los ángulos de fricción efectivos entre ensayos son muy similares, aunque tampoco se puede descartar tajantemente que esto sea una mera coincidencia.

Por último, las mayores diferencias en ángulos de fricción y cohesiones efectivas entre ensayos, ocurre para el estado más denso ($DR = 97$ [%]). Lo de las cohesiones efectivas era ya esperable, sin embargo, pareciera ser que con el aumento de densidad aumenta aún más la desviación entre ellas. Los ángulos de fricción efectivos son ostensiblemente distintos, lo cual viene a confirmar que una respuesta drenada fuertemente dilatante tiende a aumentar los parámetros geotécnicos

efectivos de una envolvente, con respecto a los que se obtendrían en ensayos no drenados bajo las mismas condiciones y esfuerzos iniciales. El asunto es que este aumento o desviación no es tan ligero como lo plantearon Bishop y Henkel (1962), sino que sería cada vez mayor en función de una respuesta cada vez más dilatante. También, resulta curioso el modo de falla en los ensayos bajo este estado de densidad. Como es esperable, los ensayos de compresión triaxial CID presentan marcados peaks de resistencia producto de comportamientos sumamente dilatantes, mientras que en los ensayos de compresión triaxial CIU estos son nuevamente casi imperceptibles, salvo para la probeta bajo 100 [kPa] de esfuerzo efectivo de consolidación. Esta probeta presenta una falla visualmente frágil, con plano de deslizamiento inclinado, al contrario de sus pares que denotan una falla por deformación, sin plano de falla y con abultamiento moderado. Estas últimas observaciones demuestran la importancia del estado tensional inicial impuesto por la consolidación, el cual puede ser definitorio en el tipo de comportamiento y resistencia de una probeta, por lo cual una envolvente de falla debería considerarse válida sólo para el rango de esfuerzos efectivos de consolidación utilizados en los ensayos para determinarla.

En síntesis, es algo arriesgado afirmar que los parámetros geotécnicos efectivos, que modelan una envolvente lineal de falla para cierto estado y esfuerzos iniciales, son prácticamente iguales, independiente del tipo de ensayo que se ejecute (CIU o CID). Con la arena limosa en estudio, se ha comprobado experimentalmente que estos tienden a diferir ampliamente para estados iniciales muy densos y/o cuando las respuestas son sumamente dilatantes. En general, la similitud de parámetros geotécnicos se da cuando todas las probetas fallan en estado crítico, ya que en ese caso los parámetros obtenidos son una propiedad del suelo. Para todos los otros casos, y deseablemente como regla general, es recomendable utilizar el tipo de ensayo que mejor modele las condiciones que se esperan en terreno durante el proceso de carga, es decir, condición drenada o no drenada. Igualmente, se debe tener precaución con estas observaciones, ya que en otro tipo de material podrían presentarse características distintas a las que aquí se han expuesto.

5.5. Fricción Movilizada de Ensayos de Compresión Triaxial CID

5.5.1. Conceptualización

Antes de ingresar de plano al análisis de resultados asociados a la fricción movilizada, es necesario esclarecer algunos conceptos que se le asocian. En este sentido, el ángulo de fricción efectivo movilizado o fricción movilizada, tiene una interpretación física clásica al corresponder a la inclinación de la fuerza resultante sobre una superficie de deslizamiento con respecto a la normal a dicho plano. Esto puede apreciarse en la figura 5-17, donde se presenta un bloque sobre una superficie inclinada y con el peso W como única fuerza externa. El peso W es la fuerza resultante sobre la superficie de deslizamiento, y el ángulo ϕ' , la fricción movilizada e inclinación de esta fuerza con respecto a la normal al plano inclinado.

Por otro lado, recordando el modelo de “dientes de serrucho” que se utiliza para explicar la dilatancia en suelos granulares, se tienen superficies de deslizamiento inclinadas con respecto a la de deslizamiento macroscópico. El modelo dice que la inclinación promedio de las superficies de deslizamiento microscópicas es el ángulo de dilatancia, el cual va cambiando a medida que avanza el

corte. Si se tiene una fuerza resultante R sobre una superficie de deslizamiento microscópica, entonces se puede afirmar que la inclinación de dicha fuerza con respecto a la normal a esa superficie, es el ángulo de fricción en estado crítico. Ahora, en el caso de la figura 5-18, la superficie de deslizamiento macroscópica es horizontal, por lo cual el ángulo de fricción efectivo total o fricción movilizada total es igual a la suma del ángulo de fricción en estado crítico más el ángulo de dilatancia.

$$\phi' = \phi'_{cri} + \psi \quad (5-2)$$

Por lo tanto, según este modelo, la dilatancia provoca que el ángulo de fricción efectivo movilizado aumente o disminuya con respecto al crítico, dependiendo de si el suelo está expandiéndose o contrayéndose.

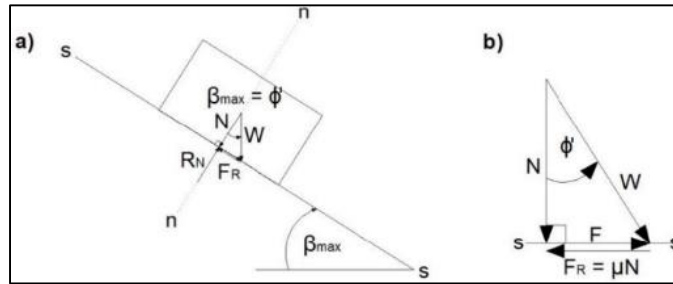


Figura 5-17: Bloque sobre superficie inclinada y ángulo de fricción efectivo movilizado (Ríos, 2015) ¹.

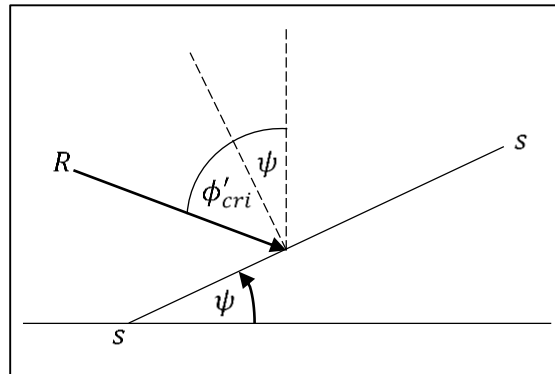


Figura 5-18: Fuerza resultante actuando en diente de serrucho para el caso dilatante positivo.

Bolton (1986), por medio de una base de datos de resultados de ensayos en condiciones de deformación plana, encontró que la ecuación (5-2) sobrestima en 20 [%] los valores de ϕ' . Es por ello que propuso una expresión que reduce en ángulo de dilatancia máximo por un factor de 0,8 para el caso de deformaciones planas y tensiones que no induzcan la rotura de partículas.

$$\phi'_{m\acute{a}x} = \phi'_{cri} + 0,8\psi_{m\acute{a}x} \quad (5-3)$$

Por último, a partir de la base de datos (sin ninguna arena de América del Sur), Bolton (1986) propuso para el caso de deformación triaxial, una expresión que permite estimar la diferencia entre $\phi'_{m\acute{a}x}$ y ϕ'_{cri} . Esta es:

¹ En esta figura “ μ ” es el coeficiente de roce y no el módulo de Poisson como a lo largo de toda esta memoria.

$$\phi'_{m\acute{a}x} - \phi'_{cri} = 3[DR(Q - \ln p') - 1] \quad (5-4)$$

Donde:

Q : Factor que toma el valor de 10 para suelos con granos de cuarzo y feldespato.

p' : Esfuerzo efectivo medio en la falla, [kPa].

DR : Densidad relativa en forma decimal.

5.5.2. Análisis

El ángulo de fricción efectivo movilizado se puede calcular para cada probeta ensayada y nivel de deformación asumiendo cohesión nula. Con ello, es posible graficar la evolución de esta fricción a medida que progresa el corte en cada probeta.

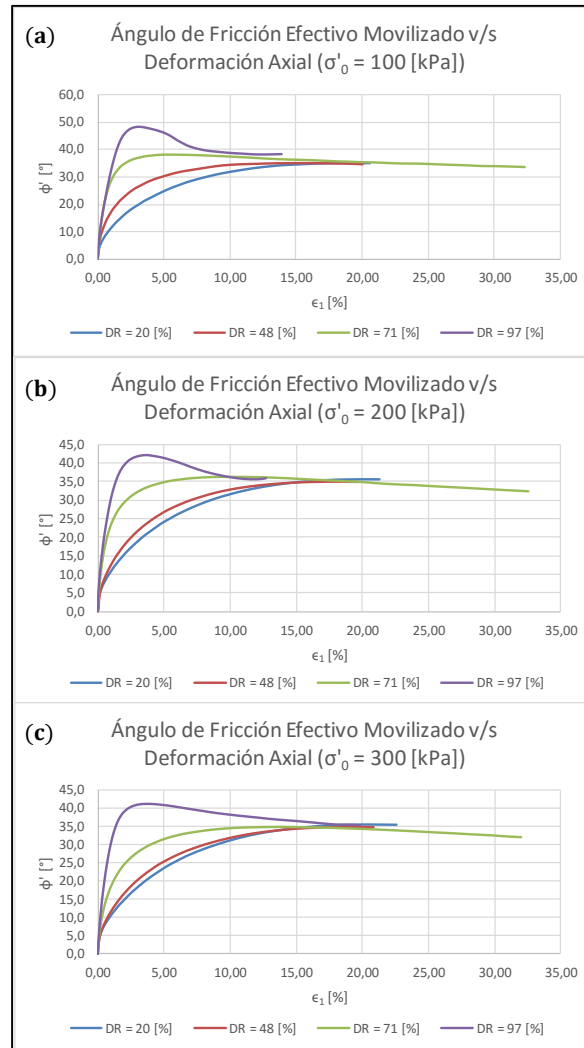


Figura 5-19: Evolución del ángulo de fricción movilizado durante el corte en ensayos de compresión triaxial CID bajo distintos estados de densidad inicial y el mismo esfuerzo efectivo de consolidación σ'_0 . (a) $\sigma'_0 = 100$ [kPa], (b) $\sigma'_0 = 200$ [kPa] y (c) $\sigma'_0 = 300$ [kPa] – Arena Limosa.

La figura 5-19 presenta la evolución en cuestión, observándose una inmensa similitud con las curvas de evolución del esfuerzo desviatorio de la figura 5-2. También, es importante destacar que en los ensayos drenados la fricción movilizada máxima ($\phi'_{m\acute{a}x}$) está asociada al esfuerzo desviatorio máximo ($q_{m\acute{a}x}$), no así en ensayos no drenados donde ésta puede ocurrir a otros niveles de deformación. En las probetas inicialmente sueltas, se observa la convergencia final al ángulo de fricción crítico, con una desviación promedio de 0,8 [°] por arriba del valor 34,3 [°] obtenido con anterioridad. Las probetas inicialmente densas presentan los mismos problemas y observaciones ya detallados en el ítem 5.2.1, sin evidenciar una tendencia clara hacia un valor crítico y similar a los anteriores. Lo interesante en estos casos es ver como la dilatancia positiva tiende a aumentar el ángulo de fricción movilizado por arriba del crítico, produciéndose un peak ($\phi'_{m\acute{a}x}$) aproximadamente a la misma deformación axial en que ocurre la máxima dilatancia positiva. De hecho, esto es lo que propone la expresión (5-3), donde el ángulo de dilatancia máximo ($\psi_{m\acute{a}x}$) suele calcularse con la pendiente de la recta tangente a la curva deformación volumétrica – deformación axial a la misma deformación a la cual ocurre $\phi'_{m\acute{a}x}$.

Tabla 5-4: $\phi'_{m\acute{a}x}$, $\psi_{m\acute{a}x}$ y p' en la falla para distintos estados de densidad inicial y esfuerzos efectivos de consolidación.

Esf. Efectivo de Consolidación		Parámetro	Densidad Relativa			
[kPa]	[kgf/cm²]		DR = 20 [%]	DR = 48 [%]	DR = 71 [%]	DR = 97 [%]
100	1,020	$\phi'_{\max}$ [°]	35,2	35,3	38,2	48,4
		$\psi_{\max}$ [°]	-	-	4,8	40,5
		p' [kPa]	-	-	217	310
200	2,039	$\phi'_{\max}$ [°]	35,6	35,1	36,4	42,3
		$\psi_{\max}$ [°]	-	-	0,0	20,5
		p' [kPa]	-	-	410	492
300	3,059	$\phi'_{\max}$ [°]	35,4	34,7	34,7	41,2
		$\psi_{\max}$ [°]	-	-	0,0	19,8
		p' [kPa]	-	-	587	714

Tabla 5-5: Diferencia entre $\phi'_{m\acute{a}x}$ y ϕ'_{cri} , y aproximaciones propuestas por Bolton (1986), para los estados inicialmente más densos y distintos esfuerzos efectivos de consolidación.

Esf. Efectivo de Consolidación [kPa] [kgf/cm²]		Operación	Densidad Relativa	
			DR = 71 [%]	DR = 97 [%]
100	1,020	$\Phi'_{\text{máx}} - \Phi'_{\text{cris}} \text{ [°]}$	3,9	14,1
		$0,8\psi_{\text{máx}} \text{ [°]}$	3,9	32,4
		$3[\text{DR}(\text{Q} - \ln \text{p}') - 1], \text{ [°]}$	6,8	9,4
200	2,039	$\Phi'_{\text{máx}} - \Phi'_{\text{cris}} \text{ [°]}$	2,1	8,0
		$0,8\psi_{\text{máx}} \text{ [°]}$	0,0	16,4
		$3[\text{DR}(\text{Q} - \ln \text{p}') - 1], \text{ [°]}$	5,5	8,1
300	3,059	$\Phi'_{\text{máx}} - \Phi'_{\text{cris}} \text{ [°]}$	0,4	6,9
		$0,8\psi_{\text{máx}} \text{ [°]}$	0,0	15,8
		$3[\text{DR}(\text{Q} - \ln \text{p}') - 1], \text{ [°]}$	4,7	7,0

En la tabla 5-4, se puede apreciar los valores de $\phi'_{m\acute{a}x}$, $\psi_{m\acute{a}x}$ y p' en la falla para distintos estados de densidad inicial y esfuerzos efectivos de consolidación. Para los estados inicialmente sueltos sólo se presenta $\phi'_{m\acute{a}x}$ que, como ya se dijo, es prácticamente igual a ϕ'_{cri} , ya que éstas fallan en estado crítico. Por este mismo motivo, en estos casos no se presentan valores para $\psi_{m\acute{a}x}$ y p' en la falla, ya que el primero toma valores nulos y el segundo no tiene mayor utilidad. Por otro lado, con los estados inicialmente densos se puede observar la clara relación de $\phi'_{m\acute{a}x}$ con el comportamiento dilatante. Para un mismo esfuerzo efectivo de consolidación, a mayor densidad inicial, más dilatante es la respuesta, por lo cual mayor es $\phi'_{m\acute{a}x}$ y $\psi_{m\acute{a}x}$. De manera similar, para un mismo estado de

densidad inicial, a mayor esfuerzo efectivo de consolidación, menos dilatante es la respuesta, por lo cual menor es $\phi'_{m\acute{a}x}$ y $\psi_{m\acute{a}x}$. Cabe destacar, las probetas de densidad relativa inicial de 71 [%] presentaron valores de $\psi_{m\acute{a}x}$ aproximadamente nulos, aunque posteriormente si hubo una leve dilatancia positiva para deformaciones posteriores a la falla.

En la tabla 5-5, se presenta la diferencia entre $\phi'_{m\acute{a}x}$ y ϕ'_{cri} , y aproximaciones propuestas por Bolton (1986), para los estados inicialmente más densos y distintos esfuerzos efectivos de consolidación. Para el cálculo de la diferencia de forma directa, se optó por considerar $\phi'_{cri} = 34,3$ [°], a pesar de la ya comentada desviación promedio de 0,8 [°]. Para el cálculo con la expresión (5-4), se consideró $Q = 10$, es decir, se asumió que los granos eran de cuarzo y feldespato. En el caso de las probetas de densidad relativa inicial de 71 [%], la diferencia entre $\phi'_{m\acute{a}x}$ y ϕ'_{cri} fue mejor estimada con la expresión (5-3), siendo sobrestimada en más del doble con la ecuación (5-4). Finalmente, en las probetas de densidad relativa inicial de 97 [%], ocurrió totalmente lo contrario, siendo sobrestimada en más del doble con la ecuación (5-3), y bastante cercana con la expresión (5-4).

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se completó el proceso de puesta en marcha del equipo triaxial “Humboldt” en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se implementó específicamente los ensayos de compresión triaxial CIU y CID. Se ensayó una arena limosa, bajo condiciones drenadas y no drenadas, y para distintos estados de densidad inicial y esfuerzos efectivos de consolidación, permitiendo obtener suficientes puntos para formar correctamente la línea de estado crítico en los planos $e - p'$ y $q - p$, y pudiendo definirse una envolvente de falla para cada estado de densidad y tipo de ensayo.

El procedimiento de ensayo, según corresponda, involucra el trabajo conjunto del equipo triaxial “Humboldt” con el software “Humboldt” (“Humboldt Material Testing Software”), de modo tal de aprovechar la automaticidad principalmente en la recolección de datos. En base a la investigación realizada por Donaghe y Townsend (1979), se definió un criterio para la elección de los incrementos de contrapresión y de la diferencia entre la presión cámara y contrapresión durante la etapa de aplicación de contrapresión, criterio especialmente válido para suelos finos o cohesivos. Dicho criterio se sintetiza en la expresión (2-28), y permite evitar pre-estresar las probetas durante la saturación. Esta expresión constituye ser el caso más desfavorable, dado que considera que la respuesta de la presión de poros es muchísimo más lenta que el aumento de presión de cámara que ocurre a la par de la contrapresión.

El análisis de resultados arrojó una única línea de estado crítico, formada conjuntamente a partir de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, en los planos $e - p'$ y $q - p'$. En el plano $q - p'$, la regresión lineal arrojó un altísimo coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9990$, indicando un $\phi'_{cri} = 34,3$ [°] y $c'_{cri} = 0$ [kgf/cm²]. Este valor de cohesión era totalmente esperable, ya que la arena limosa estudiada no poseía ningún tipo de cementación natural que le pudiera conferir un valor constante de resistencia cortante bajo esfuerzos efectivos nulos. En el plano $e - p'$, la forma curva típica fue seguida por una regresión semilogarítmica con un también alto coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9551$, la cual se tradujo en una impecable línea recta en el plano $e - \ln p'$. Se comprobó experimentalmente la incertidumbre que se genera al intentar determinar el estado crítico a partir de muestras densas en condición drenada (Mooney et al., 1998; Finno y Rechenmacher, 2003), explicándose por la presencia de comportamientos y tendencias dilatantes que producen aumentos de volumen. Dicha incertidumbre es efectiva con particular notoriedad en lo que respecta a la determinación de la relación de vacíos en estado crítico, denotando desviaciones importantes con respecto a las relaciones de vacíos en estado crítico determinadas a partir de estados inicialmente sueltos y contractivos.

El parámetro contractividad relativa, R_c , propuesto por Verdugo e Ishihara (1996) y calculado para un valor arbitrario de 100 [kPa] de esfuerzo efectivo medio, indica que la arena limosa estudiada es poco contractiva, dificultando por tanto la iniciación de una falla por licuefacción. Cabe destacar, esto es una característica propia del material, y no dice relación con una evaluación dependiente del estado inicial que tenga el suelo.

Se observó un patrón de comportamiento no drenado “reverso” en las probetas inicialmente sueltas, con aumento de la estabilidad a medida que aumentaba el esfuerzo efectivo de consolidación y para un mismo estado de densidad inicial. Dado que las muestras ensayadas no presentaron un peak

de resistencia en el tramo inicial contractivo, se definió un nuevo criterio para evaluar el aumento de estabilidad, y que dice relación con el aumento de la tendencia dilatante a partir del punto de cambio de fase. Así, se utilizó la relación entre el esfuerzo desviatorio en estado crítico y el cambio de fase, es decir, $q_{cri}/q(q_{ss})$. En las probetas de densidad relativa inicial de 20 [%] y 48 [%], a medida que era aumentado el esfuerzo efectivo de consolidación, crecía la relación en cuestión, provocándose por tanto un aumento de estabilidad y de la tendencia dilatante. Este comportamiento fue cualitativamente parecido al evidenciado por Yamamuro y Lade (1998) en mezclas de arena – limo con una densidad relativa inicial de 30 [%]. No obstante, en las probetas de arena limosa inicialmente densas, se observó un comportamiento no drenado “normal”, con disminución de la estabilidad y tendencia dilatante a medida que aumentaba el esfuerzo efectivo de consolidación y para un mismo estado de densidad inicial.

La definición de envolventes lineales de falla en el plano $q - p'$ para distintos estados y esfuerzos iniciales, fue satisfactoria en términos de correlación tanto en los ensayos drenados como no drenados, presentándose valores siempre ligeramente superiores a $R^2 = 0,9990$. La comparación de parámetros geotécnicos efectivos entre ensayos y para iguales estados iniciales, se efectuó para corroborar la similitud expuesta por Bishop y Henkel (1962). Desde un primer momento se entendió que la cohesión, al ser un valor aparente surgido producto de forzar un ajuste lineal, difícilmente podía tomar valores muy similares entre ensayos, por lo cual lo realmente importante era comparar los ángulos de fricción efectivos. Considerando la falla como el esfuerzo desviatorio máximo, independiente de la deformación a la cual ocurriera dentro del ensayo, se obtuvo aproximadamente los mismos parámetros geotécnicos efectivos para los estados de densidad relativa inicial de 20 [%], 48 [%]. La similitud entre parámetros se explica por el hecho de que todas esas probetas, tanto de los ensayos de compresión triaxial CIU como CID, fallan razonablemente en estado crítico, por lo cual los parámetros obtenidos son en sí una propiedad intrínseca de la arena limosa analizada.

Las probetas ensayadas de densidad relativa inicial de 71 [%] no fallan en estado crítico en ninguno de los dos tipos de ensayos, ya que en los ensayos de compresión triaxial CID se producen peaks de resistencia por la acción de la dilatación positiva, mientras que en los ensayos de compresión triaxial CIU se producen peaks de resistencia muy poco notorios antes de caer a estado crítico en el 20 [%] de deformación axial. A pesar de que las envolventes lineales de falla para este estado de densidad y para cada tipo de ensayo, son modeladas por ángulos de fricción muy similares (sólo 0,7 [°] de diferencia entre ambos), no se puede descartar que esto sea sólo una mera coincidencia.

Las mayores diferencias en ángulos de fricción y cohesiones efectivas entre ensayos, ocurrió para el estado más denso ($DR = 97$ [%]). Lo de las cohesiones efectivas era ya esperable, sin embargo, pareciera ser que con el aumento de densidad aumenta aún más la desviación entre ellas. Los ángulos de fricción efectivos son ostensiblemente distintos, lo cual viene a confirmar que una respuesta drenada fuertemente dilatante tiende a aumentar los parámetros geotécnicos efectivos de una envolvente, con respecto a los que se obtendrían en ensayos no drenados bajo las mismas condiciones y esfuerzos iniciales. El asunto es que este aumento o desviación no es tan ligero como lo plantearon Bishop y Henkel (1962), sino que sería cada vez mayor en función de una respuesta cada vez más dilatante.

En función de las diferencias observadas, es que se llegó a la conclusión general de que, para efectos de definir envolventes lineales de falla, lo más recomendable es utilizar el tipo de ensayo que

mejor modele las condiciones que se esperan en terreno durante el proceso de carga, es decir, condición drenada o no drenada. Así, se insta a no asumir y esperar, a priori, igualdad o similitud entre los parámetros geotécnicos que las modelan y para iguales estados y esfuerzos iniciales, aunque se debe tener en cuenta que con otros suelos o tipos de arena podría ocurrir algo de ese estilo.

El análisis de la fricción movilizada de los ensayos drenados, corroboró experimentalmente el efecto que tiene la dilatancia positiva en aumentar el ángulo de fricción movilizado por sobre el crítico. Se pudo apreciar y verificar esta dependencia, dado que en los estados inicialmente densos, para un mismo esfuerzo efectivo de consolidación, a mayor densidad inicial, tendía a aumentar $\phi'_{m\acute{a}x}$ y $\psi_{m\acute{a}x}$, y para un mismo estado de densidad inicial, a mayor esfuerzo efectivo de consolidación, tendía a disminuir $\phi'_{m\acute{a}x}$ y $\psi_{m\acute{a}x}$.

Las tareas pendientes por realizar son muchas, ya que con la implementación de los ensayos de compresión triaxial CIU y CID, se abre el camino hacia un amplio espectro investigativo relacionado con la resistencia cortante de los suelos. Como primer punto, queda pendiente la investigación de la resistencia cortante drenada y no drenada de otros tipos de suelos, ya sea arcillas, limos, arenas arcillosas, arenas limpias, y bajo distintos niveles de esfuerzos iniciales. Sería interesante en estos suelos comparar los parámetros geotécnicos efectivos que modelan envolventes lineales de falla para iguales estados iniciales, así como la definición de sus líneas de estado crítico a partir de ensayos drenados y no drenados. También, y con miras a contrastar resultados con otras investigaciones, queda pendiente la investigación del efecto de los finos sobre la pendiente y ubicación de la línea de estado crítico de materiales granulares, tanto finos no plásticos (mezclas de arena – limo) como plásticos (mezclas de arena – arcilla). Si se quiere estudiar el efecto de la preconsolidación en suelos finos o cohesivos, ya sea en la determinación de la línea de estado crítico o en la comparación de parámetros geotécnicos efectivos entre ensayos, se debe tener en cuenta que el equipo triaxial “Humboldt” no permite preconsolidar de forma automática, sino que la preconsolidación de probetas remoldeadas tendría que hacerse manualmente. Asimismo, con el nivel de presiones que trabaja el equipo triaxial “Humboldt”, no se podría estudiar el efecto del rompimiento de partículas, necesitándose para ello otro equipo triaxial de mayor capacidad. También, se podría analizar si realmente es posible pre-estresar probetas de material granular durante la saturación, y cuál es su efecto sobre la resistencia y características de cambio de volumen y presión de poros. Con respecto al comportamiento no drenado “reverso”, observado en la arena limosa de este estudio para los estados inicialmente más sueltos, es importante investigar si éste se da en otro tipo de arenas u otras arenas limosas con otros contenidos de finos, dado que es deseable que cuando el suelo trabaje bajo esfuerzos y deformaciones cortantes, sea proclive a experimentar tendencias dilatantes en pos de evitar la ocurrencia de fenómenos como la licuefacción, aunque tampoco excesivamente dilatantes, para así disminuir la posibilidad de cavitaciones en el agua de poros.

También queda pendiente la adquisición, por parte del laboratorio LEMCO, de un equipo que permita realizar ensayos de compresión triaxial cíclicos. Se estima que, para su posterior implementación, este trabajo de memoria debería servir como una buena base y guía conceptual en los temas que le sean afines.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials. “Standart Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”. ASTM D3080/D3080M-11, 2011.

American Society for Testing and Materials. “Standart Test Method for Unconsolidated – Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils”. ASTM D2850-03^a, Reapproved 2007.

American Society for Testing and Materials. “Standart Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils”. ASTM D7181-11, 2011.

American Society for Testing and Materials. “Standart Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils”. ASTM D4767-11, 2011.

American Society for Testing and Materials. “Standart Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”. ASTM D2435/D2435M-11, 2011.

Bardet, J.P. and Sayed, H. “Velocity and Attenuation of Compressional Waves in Nearly Saturated Soils”. Soil Dyn. Earthquake Eng., Vol. 12, No. 7, pp. 391-402, 1993.

Been, K. and Jefferies, M.G. “A State Parameter for Sands”. Géotechnique, Vol. 35, No. 2, pp. 99-112, 1985.

Bishop, A.W. and Henkel, D.J. “The Measurements of Soil Properties in the Triaxial Test”. 2^a ed. London, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1962.

Bolton, M.D. “The Strength and Dilatancy of Sands”. Géotechnique, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78, 1986.

Bouckovalas, G.D., Andrianopoulos, K.I. and Papadimitriou, A.G. “A Critical State Interpretation for the Cyclic Liquefaction Resistance of Silty Sands”. Soil Dyn. Earthquake Eng., Vol. 23, No. 2, pp. 115-125, 2003.

Casagrande, A. and Fadum, R.E. “Notes on Soil Testing for Engineering Purposes”. Harvard University Graduate School Engineering Publication No. 8, 1940.

Coulomb, C.A. “Essai sur une Application des Régles des Maximis et Minimis á Quelques Problèmes de Statique Relatifs á l’Architecture”. Memoires de l’Academie Royale des Sciences, Vol. 7, 1776.

Das, B.M. “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”. México, Thomson Learning, 2001.

Das, B.M. and Sobhan, K. “Principles of Geotechnical Engineering”. 8^a ed. USA, Cengage Learning, 2014.

Davis, R.O. and Selvadurai, A.P.S. “Elasticity and Geomechanics”. Cambridge University Press, 1996.

Donaghe, R.T. and Townsend, F.C. “Effects of Back-Pressure Saturation Techniques on Results of $\bar{R}$ Triaxial Compression Tests”. Miscellaneous Paper GL-79-12, 1979.

Fahey, M. “Part 2: Soil Strength” [Notes from Geomechanics CIVL2122]. The University of Western Australia, School of Civil & Resource Engineering.

- Finno, R.J. and Rechenmacher, A.L. "Effects of Consolidation History on Critical State of Sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 4, pp. 350-360, 2003.
- Fischer, G. "Comportamiento del Suelo en Estado Crítico y Ensayes en Arenas de la Quinta Región". Memoria (Ingeniería Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2005.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. "Mecánica de Suelos". 3ª ed. México, Limusa, 2010. Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos.
- Lamé, M.G. "Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Élasticité des Corps Solides". Paris, 1852.
- Mitchell, J.K. and Soga, K. "Fundamentals of Soil Behaviour". 3ª ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005.
- Mohr, O. "Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?". *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 44, 1900.
- Mooney, M.A., Finno, R.J. and Viggiani, M.G. "A Unique Critical State for Sand?". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 11, pp. 1100-1108, 1998.
- Naeini, S.A. and Baziar, M.H. "Effect of Fines Content on Steady-State Strength of Mixed and Layered Samples of a Sand". *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, Vol. 24, No. 3, pp. 181-187, 2004.
- Ni, Q. "The Effects of Particle Properties and Boundary Conditions on Soil Shear Behaviour: 3D Numerical Simulations". Ph.D. Dissertation. University of Southampton, 2003.
- Olson, S.M. "Liquefaction Analysis of Level and Sloping Ground Using Field Case Histories and Penetration Resistance". Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana – Champaign, Urbana, Ill.
- Parry, R.H.G. "Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics". 2ª ed. London, Spon Press, 2004.
- Poisson, S.D. "L'Équilibre et le Mouvement des Corps Élastiques". *Memoires de l'Academie Royale des Sciences de l'Institut de la France*, 1829.
- Poulos, S.J. "The Steady State of Deformation". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. GT5, pp. 553-562, May 1981.
- Poulos, S.J., Castro, G. and France, J.W. "Liquefaction Evaluation Procedure". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 772-792, 1985.
- Powrie, W. "Soil Mechanics: Concepts & Applications". 2ª ed. Abingdon, Spon Press, 2004.
- Ríos, M. "Modelación de Ensayos Triaxiales en Programa de Elementos Finitos Plaxis 2D". Memoria (Ingeniería Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2015.
- Skempton, A.W. "The Pore-Pressure Coefficients A and B". *Géotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 143-147, 1954.
- Taylor, D.W. "Research on Consolidation of Clays". Serial No. 82, Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1942.

Thevanayagam, S., Shentham, T., Mohan, S. and Liang, J. “Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 10, pp. 849-859, 2002.

Terzaghi, K. “Erdbaumechanik”. Viena, 1925.

Universidad de Cantabria, Grupo Geotecnia. “Capítulo 5: Suelos Parcialmente Saturados” [Diapositivas].

Universidad de Cantabria, Grupo Geotecnia. “Capítulo 6: Deformabilidad y Resistencia de los Suelos” [Diapositivas].

Verdugo, R. “Estabilidad de Taludes en Suelos y Rocas: Fundamentos y Aplicaciones. Módulo 1, Resistencia al Corte de Suelos” [Apuntes de Clases].

Verdugo, R. and Ishihara, K. “The Steady State of Sandy Soils”. Soils and Foundations, Vol. 36, No. 2, pp. 81-91, June 1996.

Villalobos, F. “Mecánica de Suelos”. Chile, UCSC y LGM, 2014.

Weisser, E. “Manual de Procedimientos y Resultados del Ensayo de Corte Directo en Suelos, Elaborado Para el Laboratorio Lemco”. Memoria (Construcción Civil). Valparaíso. UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2014.

Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. “Steady-State Concepts and Static Liquefaction of Silty Sands”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 868-877, 1998.

Young, T. “A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts”. London, Joseph Johnson, 1807.

Zlatovic, S. and Ishihara, K. “On the Influence of Nonplastic Fines on Residual Strength”. In Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 14-16 November 1995. Edited by K. Ishihara. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. pp. 239-244, 1995.

ANEXO A. GRANULOMETRÍA – ARENA LIMOSA

Tabla A-1: Ficha de ensayo de granulometría – Arena Limosa.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA Departamento de Obras Civiles Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras				N° O.T: - Registro: -	
Pág.: 1/1					
FICHA DE ENSAYO GRANULOMETRIA Y HUMEDAD 8.102.1 (MC-V8, 2015) Y NCh 1515 OF.79					
		Ensayado por:		Fecha:	
Granulometría		Rodolfo Rojas M.		16-03-2015	
Humedad		-		-	
Clasificación		Rodolfo Rojas M.		16-03-2015	
		Secado a masa const. [kg]		Granulometría	
Peso muestra total (MT):		- kg	0,520	Masa mat. ret. por 4	
			0,520	Masa mat. que pasa por 4	
Peso sobretamaño (ST):		- kg	0,520	Masa muestra total	
			0	Granulometría Fina	
Sobretamaño (ST/MT)x100		- %	Temp. de Secado: 110 °C	Masa Seca Material Bajo 4	
			Tiempo de secado: 24 h	520	
Tamiz		Retenido		% Humedad (w)	
		Masa	% aprox	Cápsula N°	
			% Que pasa aprox. 1%	Corte	
80 (3")		-	-	Masa suelo húmedo + cápsula [g]	
63 (2 1/2")		-	-	Masa suelo seco + cápsula [g]	
50 (2")		-	-	Masa cápsula [g]	
40 (1 1/2")		-	-	[%] de Humedad (w)	
25 (1")		-	-	Secado a masa constante (NCh 1515)	
20 (3/4")		-	-	Masa cap+suelo seco [kg]	
10 (3/8")		-	-		
5 (N°4)		-	100		
2 (N°10)		14,3	2,8		
0,500 (N°40)		171,6	33,0		
0,080 (N°200)		216,8	41,7		
Bajo N°200		117,3	22,6		
		Diferencia antes y despues del tamizado			
Tipo de Material		Sobre 5 mm		Bajo 5 mm	
Arena Limosa		Masa seca antes tamizado A [g]		414,3	
		Suma material retenido B + R [g]		413,1	
Clasificación de Suelos		Residuo despues de tamizado R [g]		10,4	
USCS		Dif. Porcentual (C=(A-B)x100%/A)		0,29	
AASHTO		Criterio		C < 0,5 %	
				C < 3 %	
Equipos Utilizados		Tamices	Homo	Balanza 1	Balanza 2
Identificación Interna		MS-T-1	MS-169	MS-174	-
Revisado por (JA o JA(S)):		René Martínez		Firma:	-
REG-FE-57		Rev 8		Fecha: 01/10/2015	

ANEXO B. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO – ARENA LIMOSA

Tabla B-1: Ficha de ensayo de proctor modificado – Arena Limosa (1/2).

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Obras Civiles
Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras

Pág.: 1 / 2

-
Registro
-

FICHA DE ENSAYO

PROCTOR NORMAL O MODIFICADO, NCh 1534/1 OF.79 o 1534/2 OF.79

1. INFORMACIÓN GENERAL.

Fecha de Ensayo	17-03-2015	Laboratorista	Rodolfo Rojas M.
-----------------	------------	---------------	------------------

2. ENSAYO PROCTOR

Método de Ensayo	A	Temperatura de Secado	110 °C
Tiempo de secado	24 horas	Molde Utilizado	47

Reemplazo	Si	No	x
% a Reemplazar entre 50 y 20 mm		-	
Material reemplazo entre 20 y 5 mm(g)		-	
Material bajo 20 mm(g)		-	
Total material para confección de molde (g)		-	

2.1 Procedimiento de Ensayo									
Determinación Nº	1	2	3	4	5				
Humedad aparente (%)	4	5	7	10,5	11				
Peso molde + suelo compactado (g)	3695	3775	3845	3859	3889				
Peso molde (g)	1873	1873	1873	1873	1873				
Peso Material (g)	1822	1902	1972	1986	2016				
Volumen molde (cc)	940	940	940	940	940				
Densidad Compactada húmeda (g/cm³) aprox.a 0,01	1,94	2,02	2,10	2,11	2,14				
Humedad suelo compactado promedio (%)	4,0	6,1	8,7	10,5	12,4				
Densidad compactada seca (g/cm³) aprox.a 0,01	1,86	1,90	1,93	1,91	1,90				

2.2 Determinación de la humedad según NCH 1515									
Determinación Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº cápsula	14	10	31	847,5	706,5	651,2	633,8	935,2	811,6
Peso suelo húmedo + capsula (g)	802,3	915,4	805,3	884,2	805,3	672,1	607,9	592,7	744,9
Peso suelo seco + cápsula (g)	775,5	884,2	805,3	884,2	805,3	672,1	607,9	592,7	744,9
Peso cápsula (g)	104,7	104,2	105,3	104,4	103,1	121,2	102,0	103,4	101,1
Humedad (%)	4,0	4,0	6,0	6,1	8,6	8,7	10,5	10,4	12,4

BFC-EF-56Rev. 5Echa: - 01/10/2014

Nº OT:

Registro

Pág: 2/2

3. INFORME DE RESULTADOS

3.1 Gráfico de Densidad Compactada Seca V/s Humedad

Si S=1

Humedad [%]	DCS [g/cm3]	R. de Vacíos	Humedad [%]
4,0	1,86	0,51	18,2
6,1	1,90	0,48	17,1
8,7	1,93	0,46	16,3
10,5	1,91	0,47	16,8
12,4	1,90	0,48	17,1

Humedad Óptima %

8,7

DMCS [g/cm3]

1,93

Gs

2,812

Gráfico Proctor

DCS [g/cm3]

Humedad [%]

Humedad [%]	DCS [g/cm3]
4,0	1,86
6,1	1,90
8,7	1,93
10,5	1,91
12,4	1,90
16,3	1,86
17,1	1,85

4. OBSERVACIONES

Sin observaciones.

5. EQUIPOS UTILIZADOS

Equipo o Instrumento	Identificación Interna
Molde	MS-19
Pisón	MS-111
Regla	-
Probetas	-
Balanza	MS-164
Horno	MS-25
Tamices	MS-T-1

Revisado por (JA o JA(S)):

René Martínez.

Firma:

-

REG-FE-56

Rev 5

Fecha: 01/10/2014

ANEXO C. ENSAYO DE DENSIDAD MÍNIMA – ARENA LIMOSA

Tabla C-1: Ficha de ensayo de densidad mínima – Arena Limosa.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA Departamento de Obras Civiles Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras				N° OT: - Registro: - Pág: 1/1	
FICHA DE ENSAYO DENSIDAD MÍNIMA (Método A) ASTM 4254-00							
Mandante	-						
Fecha ensayo	28-12-2015						
Laboratorista	Rodolfo Rojas M.						
DETERMINACIÓN N°	1	2	3				
MÉTODO LLENADO MOLDE	Embudo	Embudo	Embudo				
PESO SUELO + MOLDE (g) (1)	7410	7441	7429				
PESO MOLDE (g) (2)	3709	3709	3709				
PESO SUELO (g): (3)=(1)-(2)	3701	3732	3720				
VOLÚMEN DEL MOLDE (cm³) (4)	2840	2840	2840				
DENSIDAD SECA (g/cm³) Dm=(3)/(4)	1,303	1,314	1,310				
DENSIDAD MÍNIMA PROMEDIO (gr/cm³)	1,309						
DIFERENCIA ENTRE RESULTADOS (Máx. 1%):	0,831						
Secado a masa constante							
Masa inicial [g]	11572						
Masa final [g]	11560						
	11560						
	11560						
% Δ	0						
Tiempo de secado mínimo	24 Hrs.						
T° de secado	110 ± 5°C						
DENSIDAD MÍNIMA (gr/cm³)	1,309						
INSTRUMENTOS UTILIZADOS							
	Deformómetro	Balanza	Homo	Molde	Cronometro	Mesa Vibradora	
Identificación Interna	MS-11-7	MS-173	MS-25	MS-11-2	MS-58-1	MS-11-1	
Observaciones:							
-							
Revisado por: (JA o (JA(S)):	René Martínez			Firma	-		
REG-FE-52		Rev 5			Fecha 11/10/2012		

ANEXO D. ENSAYO DE DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS – ARENA LIMOSA

Tabla D-1: Ficha de ensayo N° 1 de densidad de partículas sólidas – Arena Limosa.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA Departamento de Obras Civiles Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras				N° OT: - Registro: -													
Pág.: 1/1																			
FICHA DE ENSAYO PARTÍCULAS SÓLIDAS NCh 1532 OF. 80																			
1. INFORMACIÓN GENERAL																			
Calicata N°		-		Fecha		16-03-2015													
Horizonte N°		-																	
Ubicación		Rodelillo, Sector Aeródromo.																	
Laboratorista:		Rodolfo Rojas M.																	
2. CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO.																			
A	Masa del picnómetro vacío [g]			174,4															
B	Masa del picnómetro + agua [g]			672,82															
	Temperatura de calibración [°C]			20															
C	Densidad del agua a temperatura de calibración [g/cm³]			0,9982															
3. ENSAYO DE DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS																			
D	Masa seca de la muestra [gr]																		
Secado a masa constante <table border="1"> <tr> <td>%Δ</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de secado [h]</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>T° de Secado [°C]</td> <td>110</td> </tr> </table>				%Δ	0	Tiempo de secado [h]	24	T° de Secado [°C]	110	<table border="1"> <tr> <td>Masa 1 [g]</td> <td>51,99</td> </tr> <tr> <td>Masa 2 [g]</td> <td>51,99</td> </tr> <tr> <td>Masa 3 [g]</td> <td>51,99</td> </tr> <tr> <td>Masa 4 [g]</td> <td>51,99</td> </tr> </table>		Masa 1 [g]	51,99	Masa 2 [g]	51,99	Masa 3 [g]	51,99	Masa 4 [g]	51,99
%Δ	0																		
Tiempo de secado [h]	24																		
T° de Secado [°C]	110																		
Masa 1 [g]	51,99																		
Masa 2 [g]	51,99																		
Masa 3 [g]	51,99																		
Masa 4 [g]	51,99																		
E	Masa del picnómetro + muestra + agua [gr]			706,11															
	Temperatura de ensayo [°C]			22															
F	Densidad del agua a temp. de ensayo [gr/cm³] =			0,9978															
G	Masa del picnómetro + agua a temp. de ensayo [gr]			672,62															
ρs	Densidad de partículas sólidas [gr/cm³] = [(D/(D+G-E))xρF]			2,804															
--	Control de presión de aspiración de aire [kPa]			13,3															
4. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO.																			
Gs	Peso específico a T=20°C = ρs/0,9982			2,809															
Gs	Peso específico a T=4°C = ρs			-															
5. OBSERVACIONES.																			
Sin observaciones.																			
6. EQUIPOS UTILIZADOS:																			
Eq. o Instrumentos	Balanza	Termómetro	Reductor de Presión	Vacuómetro	Homo	Matraz													
Identificación Interna	MS-171	MS-141	MS-170	MS-170-1	MS-169	MS-128-1													
Revisado por: (JA o JA(S)):		René Martínez		Firma:		-													
REG-FE-55		Rev 6		Fecha: 13/02/2013															

Tabla D-2: Ficha de ensayo N° 2 de densidad de partículas sólidas – Arena Limosa.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA Departamento de Obras Civiles Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras		N° OT: - Registro - Pág.: 1/1													
FICHA DE ENSAYO PARTÍCULAS SÓLIDAS NCh 1532 OF.80																
1. INFORMACIÓN GENERAL																
Calicata N°	-	Fecha	16-03-2015													
Horizonte N°	-															
Ubicación	Rodelillo, Sector Aeródromo.															
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.															
2. CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO.																
A	Masa del picnómetro vacío [g]	149,03														
B	Masa del picnómetro + agua [g]	647,12														
	Temperatura de calibración [°C]	20														
C	Densidad del agua a temperatura de calibración [g/cm³]	0,9982														
3. ENSAYE DE DENSIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS																
D	Masa seca de la muestra [gr]	50,34														
Secado a masa constante <table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 10px;"> <tr> <td>%Δ</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de secado [h]</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>T° de Secado [°C]</td> <td>110</td> </tr> </table>		%Δ	0	Tiempo de secado [h]	24	T° de Secado [°C]	110	<table border="1" style="display: inline-table;"> <tr> <td>Masa 1 [g]</td> <td>50,34</td> </tr> <tr> <td>Masa 2 [g]</td> <td>50,34</td> </tr> <tr> <td>Masa 3 [g]</td> <td>50,34</td> </tr> <tr> <td>Masa 4 [g]</td> <td>50,34</td> </tr> </table>	Masa 1 [g]	50,34	Masa 2 [g]	50,34	Masa 3 [g]	50,34	Masa 4 [g]	50,34
%Δ	0															
Tiempo de secado [h]	24															
T° de Secado [°C]	110															
Masa 1 [g]	50,34															
Masa 2 [g]	50,34															
Masa 3 [g]	50,34															
Masa 4 [g]	50,34															
E	Masa del picnómetro + muestra + agua [gr]	679,38														
	Temperatura de ensayo [°C]	22														
F	Densidad del agua a temp. de ensayo [gr/cm³] =	0,9978														
G	Masa del picnómetro + agua a temp. de ensayo [gr]	646,92														
ρ _s	Densidad de partículas sólidas [gr/cm³] = [(D/(D+G-E))xρ _F]	2,809														
--	Control de presión de aspiración de aire [kPa]	13,3														
4. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO.																
G _s	Peso específico a T=20°C = ρ _s /0,9982	2,814														
G _s	Peso específico a T=4°C = ρ _s	-														
5. OBSERVACIONES.																
Sin observaciones.																
6. EQUIPOS UTILIZADOS:																
Eq. o Instrumentos	Balanza	Termómetro	Reductor de Presión	Vacuometro	Horno	Matraz										
Identificación Interna	MS-171	MS-141	MS-170	MS-170-1	MS-169	MS-128-3										
Revisado por: (JA o JA(S)):		René Martinez		Firma:	-											
REG-FE-55		Rev 6			Fecha: 13/02/2013											

ANEXO E. ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL CIU – ARENA LIMOSA

Tabla E-1: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Fecha realización:	13-01-2016																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Proyecto:	Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	197,50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Altura promedio probeta	[cm]	10,14	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,515																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Masa húmeda probeta	[g]	299,13	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,378																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Humedad promedio probeta	[%]	9,9	Relación de vacíos	-	1,040																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
				Saturación	[%]	26,74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,83	Área probeta	[cm²]	18,32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Altura probeta	[cm]	9,86	Volumen probeta	[cm³]	180,60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Humedad probeta	[%]	30,7	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,510																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
				Relación de vacíos	-	0,862																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	15,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	0,664																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,080	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,238																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,902																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,064</td><td>1,007</td><td>0,157</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,137</td><td>0,967</td><td>0,252</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,202</td><td>0,926</td><td>0,323</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,255</td><td>0,889</td><td>0,373</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,300</td><td>0,856</td><td>0,408</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,339</td><td>0,828</td><td>0,443</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,370</td><td>0,804</td><td>0,463</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,401</td><td>0,780</td><td>0,482</td></tr><tr><td>0,47</td><td>0,423</td><td>0,762</td><td>0,497</td></tr><tr><td>0,52</td><td>0,446</td><td>0,745</td><td>0,512</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,485</td><td>0,712</td><td>0,531</td></tr><tr><td>0,67</td><td>0,502</td><td>0,698</td><td>0,540</td></tr><tr><td>0,78</td><td>0,530</td><td>0,677</td><td>0,560</td></tr><tr><td>0,88</td><td>0,552</td><td>0,657</td><td>0,569</td></tr><tr><td>0,99</td><td>0,572</td><td>0,641</td><td>0,578</td></tr><tr><td>1,19</td><td>0,603</td><td>0,614</td><td>0,591</td></tr><tr><td>1,40</td><td>0,631</td><td>0,589</td><td>0,599</td></tr><tr><td>1,61</td><td>0,650</td><td>0,572</td><td>0,607</td></tr><tr><td>1,82</td><td>0,667</td><td>0,559</td><td>0,620</td></tr><tr><td>2,02</td><td>0,678</td><td>0,549</td><td>0,622</td></tr><tr><td>2,28</td><td>0,692</td><td>0,537</td><td>0,630</td></tr><tr><td>2,59</td><td>0,706</td><td>0,526</td><td>0,636</td></tr><tr><td>2,91</td><td>0,717</td><td>0,515</td><td>0,638</td></tr><tr><td>3,22</td><td>0,726</td><td>0,509</td><td>0,645</td></tr><tr><td>3,48</td><td>0,731</td><td>0,504</td><td>0,647</td></tr><tr><td>3,79</td><td>0,737</td><td>0,497</td><td>0,644</td></tr><tr><td>4,10</td><td>0,743</td><td>0,492</td><td>0,645</td></tr><tr><td>4,41</td><td>0,748</td><td>0,487</td><td>0,647</td></tr><tr><td>4,72</td><td>0,751</td><td>0,486</td><td>0,653</td></tr><tr><td>4,98</td><td>0,754</td><td>0,483</td><td>0,650</td></tr><tr><td>5,50</td><td>0,759</td><td>0,477</td><td>0,650</td></tr><tr><td>6,02</td><td>0,765</td><td>0,471</td><td>0,649</td></tr><tr><td>6,49</td><td>0,768</td><td>0,470</td><td>0,653</td></tr><tr><td>7,01</td><td>0,771</td><td>0,467</td><td>0,652</td></tr><tr><td>7,99</td><td>0,773</td><td>0,465</td><td>0,656</td></tr><tr><td>8,98</td><td>0,776</td><td>0,461</td><td>0,654</td></tr><tr><td>10,02</td><td>0,779</td><td>0,459</td><td>0,656</td></tr><tr><td>11,00</td><td>0,779</td><td>0,460</td><td>0,658</td></tr><tr><td>11,99</td><td>0,782</td><td>0,458</td><td>0,661</td></tr><tr><td>12,98</td><td>0,782</td><td>0,459</td><td>0,662</td></tr><tr><td>14,02</td><td>0,782</td><td>0,459</td><td>0,663</td></tr><tr><td>15,00</td><td>0,782</td><td>0,459</td><td>0,664</td></tr><tr><td>15,99</td><td>0,782</td><td>0,458</td><td>0,661</td></tr><tr><td>16,97</td><td>0,782</td><td>0,458</td><td>0,662</td></tr><tr><td>18,01</td><td>0,782</td><td>0,457</td><td>0,657</td></tr><tr><td>19,00</td><td>0,782</td><td>0,458</td><td>0,661</td></tr><tr><td>19,95</td><td>0,782</td><td>0,456</td><td>0,653</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><</tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	1,020	0,000	0,05	0,064	1,007	0,157	0,10	0,137	0,967	0,252	0,16	0,202	0,926	0,323	0,21	0,255	0,889	0,373	0,26	0,300	0,856	0,408	0,31	0,339	0,828	0,443	0,36	0,370	0,804	0,463	0,41	0,401	0,780	0,482	0,47	0,423	0,762	0,497	0,52	0,446	0,745	0,512	0,62	0,485	0,712	0,531	0,67	0,502	0,698	0,540	0,78	0,530	0,677	0,560	0,88	0,552	0,657	0,569	0,99	0,572	0,641	0,578	1,19	0,603	0,614	0,591	1,40	0,631	0,589	0,599	1,61	0,650	0,572	0,607	1,82	0,667	0,559	0,620	2,02	0,678	0,549	0,622	2,28	0,692	0,537	0,630	2,59	0,706	0,526	0,636	2,91	0,717	0,515	0,638	3,22	0,726	0,509	0,645	3,48	0,731	0,504	0,647	3,79	0,737	0,497	0,644	4,10	0,743	0,492	0,645	4,41	0,748	0,487	0,647	4,72	0,751	0,486	0,653	4,98	0,754	0,483	0,650	5,50	0,759	0,477	0,650	6,02	0,765	0,471	0,649	6,49	0,768	0,470	0,653	7,01	0,771	0,467	0,652	7,99	0,773	0,465	0,656	8,98	0,776	0,461	0,654	10,02	0,779	0,459	0,656	11,00	0,779	0,460	0,658	11,99	0,782	0,458	0,661	12,98	0,782	0,459	0,662	14,02	0,782	0,459	0,663	15,00	0,782	0,459	0,664	15,99	0,782	0,458	0,661	16,97	0,782	0,458	0,662	18,01	0,782	0,457	0,657	19,00	0,782	0,458	0,661	19,95	0,782	0,456	0,653																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,00	0,000	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,05	0,064	1,007	0,157																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,10	0,137	0,967	0,252																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,16	0,202	0,926	0,323																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,21	0,255	0,889	0,373																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,26	0,300	0,856	0,408																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,31	0,339	0,828	0,443																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,36	0,370	0,804	0,463																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,41	0,401	0,780	0,482																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,47	0,423	0,762	0,497																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,52	0,446	0,745	0,512																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,62	0,485	0,712	0,531																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,67	0,502	0,698	0,540																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,78	0,530	0,677	0,560																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,88	0,552	0,657	0,569																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,99	0,572	0,641	0,578																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1,19	0,603	0,614	0,591																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1,40	0,631	0,589	0,599																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1,61	0,650	0,572	0,607																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1,82	0,667	0,559	0,620																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2,02	0,678	0,549	0,622																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2,28	0,692	0,537	0,630																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2,59	0,706	0,526	0,636																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2,91	0,717	0,515	0,638																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3,22	0,726	0,509	0,645																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3,48	0,731	0,504	0,647																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3,79	0,737	0,497	0,644																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4,10	0,743	0,492	0,645																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4,41	0,748	0,487	0,647																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4,72	0,751	0,486	0,653																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4,98	0,754	0,483	0,650																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
5,50	0,759	0,477	0,650																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
6,02	0,765	0,471	0,649																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
6,49	0,768	0,470	0,653																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
7,01	0,771	0,467	0,652																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
7,99	0,773	0,465	0,656																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
8,98	0,776	0,461	0,654																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
10,02	0,779	0,459	0,656																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
11,00	0,779	0,460	0,658																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
11,99	0,782	0,458	0,661																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
12,98	0,782	0,459	0,662																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
14,02	0,782	0,459	0,663																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
15,00	0,782	0,459	0,664																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
15,99	0,782	0,458	0,661																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
16,97	0,782	0,458	0,662																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
18,01	0,782	0,457	0,657																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
19,00	0,782	0,458	0,661																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
19,95	0,782	0,456	0,653																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

Tabla E-2: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						N° OT:	-																																																																																																																																																																																																												
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																												
Fecha realización:		14-01-2016																																																																																																																																																																																																																	
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																	
SPT N°:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																														
Probeta N°:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																														
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																														
Descripción Visual:				LL	-																																																																																																																																																																																																														
				LP	-																																																																																																																																																																																																														
				IP	NP																																																																																																																																																																																																														
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																													
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,61																																																																																																																																																																																																													
	Altura promedio probeta	[cm]	10,04	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,528																																																																																																																																																																																																													
	Masa húmeda probeta	[g]	298,95	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,392																																																																																																																																																																																																													
	Humedad promedio probeta	[%]	9,8	Relación de vacíos	-	1,020																																																																																																																																																																																																													
				Saturación	[%]	26,99																																																																																																																																																																																																													
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,80	Área probeta	[cm²]	18,10																																																																																																																																																																																																													
	Altura probeta	[cm]	9,67	Volumen probeta	[cm³]	175,07																																																																																																																																																																																																													
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,005																																																																																																																																																																																																													
	Humedad probeta	[%]	28,5	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,560																																																																																																																																																																																																													
					Relación de vacíos	-	0,803																																																																																																																																																																																																												
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	18,99																																																																																																																																																																																																													
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	1,417																																																																																																																																																																																																													
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	3,589	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,607																																																																																																																																																																																																													
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	2,024																																																																																																																																																																																																													
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,053</td><td>2,046</td><td>0,179</td></tr><tr><td>0,11</td><td>0,179</td><td>1,996</td><td>0,409</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,300</td><td>1,927</td><td>0,562</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,406</td><td>1,854</td><td>0,664</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,499</td><td>1,789</td><td>0,745</td></tr><tr><td>0,32</td><td>0,583</td><td>1,728</td><td>0,816</td></tr><tr><td>0,37</td><td>0,656</td><td>1,672</td><td>0,866</td></tr><tr><td>0,42</td><td>0,717</td><td>1,626</td><td>0,912</td></tr><tr><td>0,48</td><td>0,771</td><td>1,586</td><td>0,952</td></tr><tr><td>0,53</td><td>0,818</td><td>1,548</td><td>0,982</td></tr><tr><td>0,58</td><td>0,863</td><td>1,513</td><td>1,011</td></tr><tr><td>0,69</td><td>0,942</td><td>1,448</td><td>1,051</td></tr><tr><td>0,79</td><td>1,000</td><td>1,401</td><td>1,085</td></tr><tr><td>0,90</td><td>1,051</td><td>1,356</td><td>1,104</td></tr><tr><td>1,01</td><td>1,096</td><td>1,318</td><td>1,122</td></tr><tr><td>1,22</td><td>1,163</td><td>1,260</td><td>1,149</td></tr><tr><td>1,38</td><td>1,205</td><td>1,223</td><td>1,167</td></tr><tr><td>1,59</td><td>1,247</td><td>1,187</td><td>1,184</td></tr><tr><td>1,80</td><td>1,281</td><td>1,159</td><td>1,201</td></tr><tr><td>2,01</td><td>1,309</td><td>1,135</td><td>1,213</td></tr><tr><td>2,28</td><td>1,337</td><td>1,110</td><td>1,223</td></tr><tr><td>2,59</td><td>1,362</td><td>1,087</td><td>1,228</td></tr><tr><td>2,91</td><td>1,382</td><td>1,070</td><td>1,238</td></tr><tr><td>3,17</td><td>1,396</td><td>1,060</td><td>1,248</td></tr><tr><td>3,49</td><td>1,410</td><td>1,047</td><td>1,253</td></tr><tr><td>3,81</td><td>1,421</td><td>1,039</td><td>1,263</td></tr><tr><td>4,08</td><td>1,426</td><td>1,036</td><td>1,268</td></tr><tr><td>4,39</td><td>1,435</td><td>1,030</td><td>1,277</td></tr><tr><td>4,71</td><td>1,440</td><td>1,028</td><td>1,286</td></tr><tr><td>4,97</td><td>1,446</td><td>1,024</td><td>1,292</td></tr><tr><td>5,50</td><td>1,454</td><td>1,019</td><td>1,302</td></tr><tr><td>5,98</td><td>1,457</td><td>1,018</td><td>1,308</td></tr><tr><td>6,51</td><td>1,460</td><td>1,018</td><td>1,318</td></tr><tr><td>6,98</td><td>1,463</td><td>1,019</td><td>1,328</td></tr><tr><td>7,99</td><td>1,466</td><td>1,021</td><td>1,343</td></tr><tr><td>9,00</td><td>1,466</td><td>1,026</td><td>1,357</td></tr><tr><td>10,00</td><td>1,463</td><td>1,033</td><td>1,370</td></tr><tr><td>11,00</td><td>1,463</td><td>1,037</td><td>1,383</td></tr><tr><td>12,01</td><td>1,457</td><td>1,047</td><td>1,394</td></tr><tr><td>13,01</td><td>1,454</td><td>1,052</td><td>1,401</td></tr><tr><td>14,02</td><td>1,452</td><td>1,057</td><td>1,407</td></tr><tr><td>15,03</td><td>1,446</td><td>1,063</td><td>1,408</td></tr><tr><td>15,98</td><td>1,443</td><td>1,068</td><td>1,414</td></tr><tr><td>16,98</td><td>1,440</td><td>1,070</td><td>1,414</td></tr><tr><td>17,99</td><td>1,435</td><td>1,076</td><td>1,414</td></tr><tr><td>18,99</td><td>1,432</td><td>1,080</td><td>1,417</td></tr><tr><td>20,00</td><td>1,429</td><td>1,081</td><td>1,411</td></tr></tbody></table> $p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla y el abultamiento es muy leve. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana. <tr><td>REG-FE-65</td><td>Rev 1</td><td colspan="6">Fecha: 01/02/2016</td></tr>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	2,039	0,000	0,05	0,053	2,046	0,179	0,11	0,179	1,996	0,409	0,16	0,300	1,927	0,562	0,21	0,406	1,854	0,664	0,26	0,499	1,789	0,745	0,32	0,583	1,728	0,816	0,37	0,656	1,672	0,866	0,42	0,717	1,626	0,912	0,48	0,771	1,586	0,952	0,53	0,818	1,548	0,982	0,58	0,863	1,513	1,011	0,69	0,942	1,448	1,051	0,79	1,000	1,401	1,085	0,90	1,051	1,356	1,104	1,01	1,096	1,318	1,122	1,22	1,163	1,260	1,149	1,38	1,205	1,223	1,167	1,59	1,247	1,187	1,184	1,80	1,281	1,159	1,201	2,01	1,309	1,135	1,213	2,28	1,337	1,110	1,223	2,59	1,362	1,087	1,228	2,91	1,382	1,070	1,238	3,17	1,396	1,060	1,248	3,49	1,410	1,047	1,253	3,81	1,421	1,039	1,263	4,08	1,426	1,036	1,268	4,39	1,435	1,030	1,277	4,71	1,440	1,028	1,286	4,97	1,446	1,024	1,292	5,50	1,454	1,019	1,302	5,98	1,457	1,018	1,308	6,51	1,460	1,018	1,318	6,98	1,463	1,019	1,328	7,99	1,466	1,021	1,343	9,00	1,466	1,026	1,357	10,00	1,463	1,033	1,370	11,00	1,463	1,037	1,383	12,01	1,457	1,047	1,394	13,01	1,454	1,052	1,401	14,02	1,452	1,057	1,407	15,03	1,446	1,063	1,408	15,98	1,443	1,068	1,414	16,98	1,440	1,070	1,414	17,99	1,435	1,076	1,414	18,99	1,432	1,080	1,417	20,00	1,429	1,081	1,411	REG-FE-65	Rev 1	Fecha: 01/02/2016					
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																
0,00	0,000	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																
0,05	0,053	2,046	0,179																																																																																																																																																																																																																
0,11	0,179	1,996	0,409																																																																																																																																																																																																																
0,16	0,300	1,927	0,562																																																																																																																																																																																																																
0,21	0,406	1,854	0,664																																																																																																																																																																																																																
0,26	0,499	1,789	0,745																																																																																																																																																																																																																
0,32	0,583	1,728	0,816																																																																																																																																																																																																																
0,37	0,656	1,672	0,866																																																																																																																																																																																																																
0,42	0,717	1,626	0,912																																																																																																																																																																																																																
0,48	0,771	1,586	0,952																																																																																																																																																																																																																
0,53	0,818	1,548	0,982																																																																																																																																																																																																																
0,58	0,863	1,513	1,011																																																																																																																																																																																																																
0,69	0,942	1,448	1,051																																																																																																																																																																																																																
0,79	1,000	1,401	1,085																																																																																																																																																																																																																
0,90	1,051	1,356	1,104																																																																																																																																																																																																																
1,01	1,096	1,318	1,122																																																																																																																																																																																																																
1,22	1,163	1,260	1,149																																																																																																																																																																																																																
1,38	1,205	1,223	1,167																																																																																																																																																																																																																
1,59	1,247	1,187	1,184																																																																																																																																																																																																																
1,80	1,281	1,159	1,201																																																																																																																																																																																																																
2,01	1,309	1,135	1,213																																																																																																																																																																																																																
2,28	1,337	1,110	1,223																																																																																																																																																																																																																
2,59	1,362	1,087	1,228																																																																																																																																																																																																																
2,91	1,382	1,070	1,238																																																																																																																																																																																																																
3,17	1,396	1,060	1,248																																																																																																																																																																																																																
3,49	1,410	1,047	1,253																																																																																																																																																																																																																
3,81	1,421	1,039	1,263																																																																																																																																																																																																																
4,08	1,426	1,036	1,268																																																																																																																																																																																																																
4,39	1,435	1,030	1,277																																																																																																																																																																																																																
4,71	1,440	1,028	1,286																																																																																																																																																																																																																
4,97	1,446	1,024	1,292																																																																																																																																																																																																																
5,50	1,454	1,019	1,302																																																																																																																																																																																																																
5,98	1,457	1,018	1,308																																																																																																																																																																																																																
6,51	1,460	1,018	1,318																																																																																																																																																																																																																
6,98	1,463	1,019	1,328																																																																																																																																																																																																																
7,99	1,466	1,021	1,343																																																																																																																																																																																																																
9,00	1,466	1,026	1,357																																																																																																																																																																																																																
10,00	1,463	1,033	1,370																																																																																																																																																																																																																
11,00	1,463	1,037	1,383																																																																																																																																																																																																																
12,01	1,457	1,047	1,394																																																																																																																																																																																																																
13,01	1,454	1,052	1,401																																																																																																																																																																																																																
14,02	1,452	1,057	1,407																																																																																																																																																																																																																
15,03	1,446	1,063	1,408																																																																																																																																																																																																																
15,98	1,443	1,068	1,414																																																																																																																																																																																																																
16,98	1,440	1,070	1,414																																																																																																																																																																																																																
17,99	1,435	1,076	1,414																																																																																																																																																																																																																
18,99	1,432	1,080	1,417																																																																																																																																																																																																																
20,00	1,429	1,081	1,411																																																																																																																																																																																																																
REG-FE-65	Rev 1	Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																	

Tabla E-3: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						N° OT:	-																																																																																																																																																																																																				
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																				
Fecha realización:		16-01-2016																																																																																																																																																																																																									
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																									
SPT N°:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																						
Probeta N°:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																						
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																						
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																						
				LP	-																																																																																																																																																																																																						
				IP	NP																																																																																																																																																																																																						
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																					
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,37																																																																																																																																																																																																					
	Alura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,529																																																																																																																																																																																																					
	Masa húmeda probeta	[g]	298,68	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,393																																																																																																																																																																																																					
	Humedad promedio probeta	[%]	9,7	Relación de vacíos	-	1,018																																																																																																																																																																																																					
			Saturación			[%]	26,89																																																																																																																																																																																																				
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,73	Área probeta	[cm²]	17,53																																																																																																																																																																																																					
	Alura probeta	[cm]	9,50	Volumen probeta	[cm³]	166,55																																																																																																																																																																																																					
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,055																																																																																																																																																																																																					
	Humedad probeta	[%]	25,5	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,637																																																																																																																																																																																																					
				Relación de vacíos			-	0,718																																																																																																																																																																																																			
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,99	Deformación axial en la falla	[%]	16,97																																																																																																																																																																																																					
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	2,497																																																																																																																																																																																																					
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	3,079	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,968																																																																																																																																																																																																					
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	3,466																																																																																																																																																																																																					
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,070</td><td>3,059</td><td>0,211</td></tr><tr><td>0,11</td><td>0,275</td><td>3,006</td><td>0,665</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,462</td><td>2,936</td><td>1,018</td></tr><tr><td>0,22</td><td>0,625</td><td>2,860</td><td>1,276</td></tr><tr><td>0,27</td><td>0,771</td><td>2,777</td><td>1,465</td></tr><tr><td>0,32</td><td>0,897</td><td>2,698</td><td>1,606</td></tr><tr><td>0,38</td><td>1,009</td><td>2,620</td><td>1,711</td></tr><tr><td>0,43</td><td>1,104</td><td>2,551</td><td>1,789</td></tr><tr><td>0,49</td><td>1,183</td><td>2,493</td><td>1,851</td></tr><tr><td>0,54</td><td>1,256</td><td>2,434</td><td>1,891</td></tr><tr><td>0,59</td><td>1,320</td><td>2,383</td><td>1,932</td></tr><tr><td>0,70</td><td>1,429</td><td>2,292</td><td>1,988</td></tr><tr><td>0,81</td><td>1,513</td><td>2,220</td><td>2,022</td></tr><tr><td>0,92</td><td>1,586</td><td>2,156</td><td>2,051</td></tr><tr><td>1,02</td><td>1,648</td><td>2,101</td><td>2,069</td></tr><tr><td>1,19</td><td>1,724</td><td>2,033</td><td>2,091</td></tr><tr><td>1,40</td><td>1,802</td><td>1,961</td><td>2,112</td></tr><tr><td>1,62</td><td>1,866</td><td>1,900</td><td>2,122</td></tr><tr><td>1,78</td><td>1,903</td><td>1,867</td><td>2,133</td></tr><tr><td>1,99</td><td>1,945</td><td>1,827</td><td>2,138</td></tr><tr><td>2,32</td><td>1,995</td><td>1,781</td><td>2,151</td></tr><tr><td>2,59</td><td>2,026</td><td>1,753</td><td>2,159</td></tr><tr><td>2,91</td><td>2,057</td><td>1,726</td><td>2,171</td></tr><tr><td>3,18</td><td>2,079</td><td>1,708</td><td>2,185</td></tr><tr><td>3,50</td><td>2,099</td><td>1,692</td><td>2,197</td></tr><tr><td>3,83</td><td>2,116</td><td>1,679</td><td>2,208</td></tr><tr><td>4,09</td><td>2,124</td><td>1,675</td><td>2,221</td></tr><tr><td>4,42</td><td>2,135</td><td>1,666</td><td>2,228</td></tr><tr><td>4,69</td><td>2,144</td><td>1,660</td><td>2,236</td></tr><tr><td>5,01</td><td>2,152</td><td>1,654</td><td>2,242</td></tr><tr><td>5,50</td><td>2,161</td><td>1,653</td><td>2,264</td></tr><tr><td>5,98</td><td>2,166</td><td>1,653</td><td>2,280</td></tr><tr><td>6,52</td><td>2,169</td><td>1,656</td><td>2,299</td></tr><tr><td>7,00</td><td>2,172</td><td>1,659</td><td>2,315</td></tr><tr><td>7,97</td><td>2,169</td><td>1,672</td><td>2,345</td></tr><tr><td>9,00</td><td>2,164</td><td>1,687</td><td>2,373</td></tr><tr><td>10,02</td><td>2,155</td><td>1,704</td><td>2,399</td></tr><tr><td>10,99</td><td>2,147</td><td>1,723</td><td>2,431</td></tr><tr><td>12,02</td><td>2,138</td><td>1,737</td><td>2,450</td></tr><tr><td>12,98</td><td>2,127</td><td>1,755</td><td>2,469</td></tr><tr><td>14,01</td><td>2,119</td><td>1,766</td><td>2,477</td></tr><tr><td>14,98</td><td>2,107</td><td>1,780</td><td>2,485</td></tr><tr><td>16,00</td><td>2,099</td><td>1,792</td><td>2,495</td></tr><tr><td>16,97</td><td>2,091</td><td>1,801</td><td>2,497</td></tr><tr><td>18,00</td><td>2,082</td><td>1,809</td><td>2,497</td></tr><tr><td>19,02</td><td>2,074</td><td>1,814</td><td>2,486</td></tr><tr><td>20,00</td><td>2,065</td><td>1,821</td><td>2,482</td></tr></tbody></table> <								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	3,059	0,000	0,05	0,070	3,059	0,211	0,11	0,275	3,006	0,665	0,16	0,462	2,936	1,018	0,22	0,625	2,860	1,276	0,27	0,771	2,777	1,465	0,32	0,897	2,698	1,606	0,38	1,009	2,620	1,711	0,43	1,104	2,551	1,789	0,49	1,183	2,493	1,851	0,54	1,256	2,434	1,891	0,59	1,320	2,383	1,932	0,70	1,429	2,292	1,988	0,81	1,513	2,220	2,022	0,92	1,586	2,156	2,051	1,02	1,648	2,101	2,069	1,19	1,724	2,033	2,091	1,40	1,802	1,961	2,112	1,62	1,866	1,900	2,122	1,78	1,903	1,867	2,133	1,99	1,945	1,827	2,138	2,32	1,995	1,781	2,151	2,59	2,026	1,753	2,159	2,91	2,057	1,726	2,171	3,18	2,079	1,708	2,185	3,50	2,099	1,692	2,197	3,83	2,116	1,679	2,208	4,09	2,124	1,675	2,221	4,42	2,135	1,666	2,228	4,69	2,144	1,660	2,236	5,01	2,152	1,654	2,242	5,50	2,161	1,653	2,264	5,98	2,166	1,653	2,280	6,52	2,169	1,656	2,299	7,00	2,172	1,659	2,315	7,97	2,169	1,672	2,345	9,00	2,164	1,687	2,373	10,02	2,155	1,704	2,399	10,99	2,147	1,723	2,431	12,02	2,138	1,737	2,450	12,98	2,127	1,755	2,469	14,01	2,119	1,766	2,477	14,98	2,107	1,780	2,485	16,00	2,099	1,792	2,495	16,97	2,091	1,801	2,497	18,00	2,082	1,809	2,497	19,02	2,074	1,814	2,486	20,00	2,065	1,821	2,482
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																								
0,00	0,000	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																								
0,05	0,070	3,059	0,211																																																																																																																																																																																																								
0,11	0,275	3,006	0,665																																																																																																																																																																																																								
0,16	0,462	2,936	1,018																																																																																																																																																																																																								
0,22	0,625	2,860	1,276																																																																																																																																																																																																								
0,27	0,771	2,777	1,465																																																																																																																																																																																																								
0,32	0,897	2,698	1,606																																																																																																																																																																																																								
0,38	1,009	2,620	1,711																																																																																																																																																																																																								
0,43	1,104	2,551	1,789																																																																																																																																																																																																								
0,49	1,183	2,493	1,851																																																																																																																																																																																																								
0,54	1,256	2,434	1,891																																																																																																																																																																																																								
0,59	1,320	2,383	1,932																																																																																																																																																																																																								
0,70	1,429	2,292	1,988																																																																																																																																																																																																								
0,81	1,513	2,220	2,022																																																																																																																																																																																																								
0,92	1,586	2,156	2,051																																																																																																																																																																																																								
1,02	1,648	2,101	2,069																																																																																																																																																																																																								
1,19	1,724	2,033	2,091																																																																																																																																																																																																								
1,40	1,802	1,961	2,112																																																																																																																																																																																																								
1,62	1,866	1,900	2,122																																																																																																																																																																																																								
1,78	1,903	1,867	2,133																																																																																																																																																																																																								
1,99	1,945	1,827	2,138																																																																																																																																																																																																								
2,32	1,995	1,781	2,151																																																																																																																																																																																																								
2,59	2,026	1,753	2,159																																																																																																																																																																																																								
2,91	2,057	1,726	2,171																																																																																																																																																																																																								
3,18	2,079	1,708	2,185																																																																																																																																																																																																								
3,50	2,099	1,692	2,197																																																																																																																																																																																																								
3,83	2,116	1,679	2,208																																																																																																																																																																																																								
4,09	2,124	1,675	2,221																																																																																																																																																																																																								
4,42	2,135	1,666	2,228																																																																																																																																																																																																								
4,69	2,144	1,660	2,236																																																																																																																																																																																																								
5,01	2,152	1,654	2,242																																																																																																																																																																																																								
5,50	2,161	1,653	2,264																																																																																																																																																																																																								
5,98	2,166	1,653	2,280																																																																																																																																																																																																								
6,52	2,169	1,656	2,299																																																																																																																																																																																																								
7,00	2,172	1,659	2,315																																																																																																																																																																																																								
7,97	2,169	1,672	2,345																																																																																																																																																																																																								
9,00	2,164	1,687	2,373																																																																																																																																																																																																								
10,02	2,155	1,704	2,399																																																																																																																																																																																																								
10,99	2,147	1,723	2,431																																																																																																																																																																																																								
12,02	2,138	1,737	2,450																																																																																																																																																																																																								
12,98	2,127	1,755	2,469																																																																																																																																																																																																								
14,01	2,119	1,766	2,477																																																																																																																																																																																																								
14,98	2,107	1,780	2,485																																																																																																																																																																																																								
16,00	2,099	1,792	2,495																																																																																																																																																																																																								
16,97	2,091	1,801	2,497																																																																																																																																																																																																								
18,00	2,082	1,809	2,497																																																																																																																																																																																																								
19,02	2,074	1,814	2,486																																																																																																																																																																																																								
20,00	2,065	1,821	2,482																																																																																																																																																																																																								

Tabla E-4: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

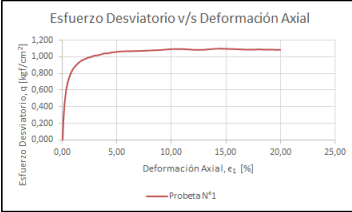
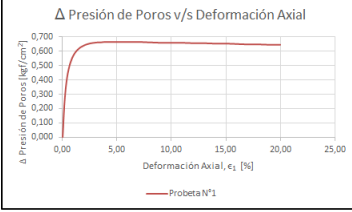
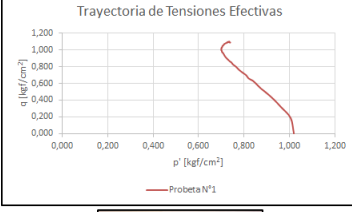
Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																												
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																												
Fecha realización:		05-01-2016																																																																																																																																																																																																																																	
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																	
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																													
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																													
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																													
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																													
					LP	-																																																																																																																																																																																																																													
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																													
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																													
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,20																																																																																																																																																																																																																													
	Alura promedio probeta	[cm]	10,02	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,697																																																																																																																																																																																																																													
	Masa húmeda probeta	[g]	331,24	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,542																																																																																																																																																																																																																													
	Humedad promedio probeta	[%]	10,1	Relación de vacíos	-	0,824																																																																																																																																																																																																																													
				Saturación	[%]	34,34																																																																																																																																																																																																																													
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,99	Área probeta	[cm²]	19,59																																																																																																																																																																																																																													
	Alura probeta	[cm]	9,95	Volumen probeta	[cm³]	194,90																																																																																																																																																																																																																													
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,997																																																																																																																																																																																																																													
	Humedad probeta	[%]	29,1	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,547																																																																																																																																																																																																																													
				Relación de vacíos	-	0,818																																																																																																																																																																																																																													
Otros	Parametro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	13,99																																																																																																																																																																																																																													
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	1,100																																																																																																																																																																																																																													
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,367																																																																																																																																																																																																																													
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	1,466																																																																																																																																																																																																																													
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,076</td><td>1,005</td><td>0,184</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,160</td><td>0,964</td><td>0,312</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,224</td><td>0,931</td><td>0,406</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,280</td><td>0,900</td><td>0,481</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,325</td><td>0,874</td><td>0,537</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,362</td><td>0,854</td><td>0,589</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,392</td><td>0,838</td><td>0,631</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,420</td><td>0,819</td><td>0,659</td></tr><tr><td>0,46</td><td>0,443</td><td>0,809</td><td>0,696</td></tr><tr><td>0,52</td><td>0,462</td><td>0,797</td><td>0,719</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,496</td><td>0,777</td><td>0,760</td></tr><tr><td>0,72</td><td>0,521</td><td>0,764</td><td>0,797</td></tr><tr><td>0,82</td><td>0,544</td><td>0,751</td><td>0,824</td></tr><tr><td>0,93</td><td>0,560</td><td>0,743</td><td>0,850</td></tr><tr><td>0,98</td><td>0,569</td><td>0,737</td><td>0,859</td></tr><tr><td>1,18</td><td>0,594</td><td>0,724</td><td>0,894</td></tr><tr><td>1,39</td><td>0,611</td><td>0,715</td><td>0,920</td></tr><tr><td>1,60</td><td>0,625</td><td>0,710</td><td>0,945</td></tr><tr><td>1,80</td><td>0,633</td><td>0,707</td><td>0,961</td></tr><tr><td>2,01</td><td>0,642</td><td>0,702</td><td>0,972</td></tr><tr><td>2,31</td><td>0,650</td><td>0,700</td><td>0,991</td></tr><tr><td>2,62</td><td>0,656</td><td>0,697</td><td>1,000</td></tr><tr><td>2,88</td><td>0,659</td><td>0,700</td><td>1,015</td></tr><tr><td>3,19</td><td>0,661</td><td>0,698</td><td>1,020</td></tr><tr><td>3,50</td><td>0,661</td><td>0,701</td><td>1,029</td></tr><tr><td>3,81</td><td>0,664</td><td>0,703</td><td>1,043</td></tr><tr><td>4,11</td><td>0,664</td><td>0,703</td><td>1,043</td></tr><tr><td>4,42</td><td>0,664</td><td>0,706</td><td>1,052</td></tr><tr><td>4,68</td><td>0,664</td><td>0,708</td><td>1,058</td></tr><tr><td>4,99</td><td>0,664</td><td>0,710</td><td>1,062</td></tr><tr><td>5,50</td><td>0,664</td><td>0,712</td><td>1,068</td></tr><tr><td>6,02</td><td>0,664</td><td>0,712</td><td>1,069</td></tr><tr><td>6,48</td><td>0,664</td><td>0,713</td><td>1,071</td></tr><tr><td>7,00</td><td>0,664</td><td>0,713</td><td>1,072</td></tr><tr><td>8,02</td><td>0,661</td><td>0,718</td><td>1,078</td></tr><tr><td>9,00</td><td>0,659</td><td>0,723</td><td>1,084</td></tr><tr><td>9,98</td><td>0,659</td><td>0,726</td><td>1,095</td></tr><tr><td>11,00</td><td>0,659</td><td>0,726</td><td>1,095</td></tr><tr><td>11,98</td><td>0,656</td><td>0,726</td><td>1,088</td></tr><tr><td>13,01</td><td>0,656</td><td>0,726</td><td>1,087</td></tr><tr><td>13,99</td><td>0,653</td><td>0,733</td><td>1,100</td></tr><tr><td>15,02</td><td>0,653</td><td>0,733</td><td>1,098</td></tr><tr><td>15,99</td><td>0,650</td><td>0,734</td><td>1,094</td></tr><tr><td>17,02</td><td>0,647</td><td>0,735</td><td>1,088</td></tr><tr><td>18,00</td><td>0,647</td><td>0,736</td><td>1,090</td></tr><tr><td>18,98</td><td>0,645</td><td>0,738</td><td>1,088</td></tr><tr><td>20,00</td><td>0,645</td><td>0,737</td><td>1,085</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table> Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial  Δ Presión de Poros v/s Deformación Axial  Trayectoria de Tensiones Efectivas   Def. Axial [%] $p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla ni tampoco un abultamiento excesivo. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana. <tr><td colspan="2">REG-FE-55</td><td colspan="2">Rev 1</td><td colspan="4">Fecha: 01/02/2016</td></tr>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	1,020	0,000	0,05	0,076	1,005	0,184	0,10	0,160	0,964	0,312	0,15	0,224	0,931	0,406	0,21	0,280	0,900	0,481	0,26	0,325	0,874	0,537	0,31	0,362	0,854	0,589	0,36	0,392	0,838	0,631	0,41	0,420	0,819	0,659	0,46	0,443	0,809	0,696	0,52	0,462	0,797	0,719	0,62	0,496	0,777	0,760	0,72	0,521	0,764	0,797	0,82	0,544	0,751	0,824	0,93	0,560	0,743	0,850	0,98	0,569	0,737	0,859	1,18	0,594	0,724	0,894	1,39	0,611	0,715	0,920	1,60	0,625	0,710	0,945	1,80	0,633	0,707	0,961	2,01	0,642	0,702	0,972	2,31	0,650	0,700	0,991	2,62	0,656	0,697	1,000	2,88	0,659	0,700	1,015	3,19	0,661	0,698	1,020	3,50	0,661	0,701	1,029	3,81	0,664	0,703	1,043	4,11	0,664	0,703	1,043	4,42	0,664	0,706	1,052	4,68	0,664	0,708	1,058	4,99	0,664	0,710	1,062	5,50	0,664	0,712	1,068	6,02	0,664	0,712	1,069	6,48	0,664	0,713	1,071	7,00	0,664	0,713	1,072	8,02	0,661	0,718	1,078	9,00	0,659	0,723	1,084	9,98	0,659	0,726	1,095	11,00	0,659	0,726	1,095	11,98	0,656	0,726	1,088	13,01	0,656	0,726	1,087	13,99	0,653	0,733	1,100	15,02	0,653	0,733	1,098	15,99	0,650	0,734	1,094	17,02	0,647	0,735	1,088	18,00	0,647	0,736	1,090	18,98	0,645	0,738	1,088	20,00	0,645	0,737	1,085																	REG-FE-55		Rev 1		Fecha: 01/02/2016			
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																
0,00	0,000	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																
0,05	0,076	1,005	0,184																																																																																																																																																																																																																																
0,10	0,160	0,964	0,312																																																																																																																																																																																																																																
0,15	0,224	0,931	0,406																																																																																																																																																																																																																																
0,21	0,280	0,900	0,481																																																																																																																																																																																																																																
0,26	0,325	0,874	0,537																																																																																																																																																																																																																																
0,31	0,362	0,854	0,589																																																																																																																																																																																																																																
0,36	0,392	0,838	0,631																																																																																																																																																																																																																																
0,41	0,420	0,819	0,659																																																																																																																																																																																																																																
0,46	0,443	0,809	0,696																																																																																																																																																																																																																																
0,52	0,462	0,797	0,719																																																																																																																																																																																																																																
0,62	0,496	0,777	0,760																																																																																																																																																																																																																																
0,72	0,521	0,764	0,797																																																																																																																																																																																																																																
0,82	0,544	0,751	0,824																																																																																																																																																																																																																																
0,93	0,560	0,743	0,850																																																																																																																																																																																																																																
0,98	0,569	0,737	0,859																																																																																																																																																																																																																																
1,18	0,594	0,724	0,894																																																																																																																																																																																																																																
1,39	0,611	0,715	0,920																																																																																																																																																																																																																																
1,60	0,625	0,710	0,945																																																																																																																																																																																																																																
1,80	0,633	0,707	0,961																																																																																																																																																																																																																																
2,01	0,642	0,702	0,972																																																																																																																																																																																																																																
2,31	0,650	0,700	0,991																																																																																																																																																																																																																																
2,62	0,656	0,697	1,000																																																																																																																																																																																																																																
2,88	0,659	0,700	1,015																																																																																																																																																																																																																																
3,19	0,661	0,698	1,020																																																																																																																																																																																																																																
3,50	0,661	0,701	1,029																																																																																																																																																																																																																																
3,81	0,664	0,703	1,043																																																																																																																																																																																																																																
4,11	0,664	0,703	1,043																																																																																																																																																																																																																																
4,42	0,664	0,706	1,052																																																																																																																																																																																																																																
4,68	0,664	0,708	1,058																																																																																																																																																																																																																																
4,99	0,664	0,710	1,062																																																																																																																																																																																																																																
5,50	0,664	0,712	1,068																																																																																																																																																																																																																																
6,02	0,664	0,712	1,069																																																																																																																																																																																																																																
6,48	0,664	0,713	1,071																																																																																																																																																																																																																																
7,00	0,664	0,713	1,072																																																																																																																																																																																																																																
8,02	0,661	0,718	1,078																																																																																																																																																																																																																																
9,00	0,659	0,723	1,084																																																																																																																																																																																																																																
9,98	0,659	0,726	1,095																																																																																																																																																																																																																																
11,00	0,659	0,726	1,095																																																																																																																																																																																																																																
11,98	0,656	0,726	1,088																																																																																																																																																																																																																																
13,01	0,656	0,726	1,087																																																																																																																																																																																																																																
13,99	0,653	0,733	1,100																																																																																																																																																																																																																																
15,02	0,653	0,733	1,098																																																																																																																																																																																																																																
15,99	0,650	0,734	1,094																																																																																																																																																																																																																																
17,02	0,647	0,735	1,088																																																																																																																																																																																																																																
18,00	0,647	0,736	1,090																																																																																																																																																																																																																																
18,98	0,645	0,738	1,088																																																																																																																																																																																																																																
20,00	0,645	0,737	1,085																																																																																																																																																																																																																																
REG-FE-55		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																															

Tabla E-5: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																								
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																																								
Fecha realización:	11-01-2016																																																																																																																																																																																																																														
Proyecto:	Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																														
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																										
Probeta Nº:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																										
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																										
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																										
				LP	-																																																																																																																																																																																																																										
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																										
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																									
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,37																																																																																																																																																																																																																									
	Altura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,695																																																																																																																																																																																																																									
	Masa húmeda probeta	[g]	331,24	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,547																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad promedio probeta	[%]	9,6	Relación de vacíos	-	0,818																																																																																																																																																																																																																									
			Saturación		[%]	33,09																																																																																																																																																																																																																									
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,92	Área probeta	[cm²]	19,05																																																																																																																																																																																																																									
	Altura probeta	[cm]	9,89	Volumen probeta	[cm³]	188,43																																																																																																																																																																																																																									
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,035																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad probeta	[%]	26,7	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,606																																																																																																																																																																																																																									
				Relación de vacíos		-	0,751																																																																																																																																																																																																																								
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,99	Deformación axial en la falla	[%]	15,99																																																																																																																																																																																																																									
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	1,747																																																																																																																																																																																																																									
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,101	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,697																																																																																																																																																																																																																									
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	2,444																																																																																																																																																																																																																									
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,112</td><td>2,020</td><td>0,277</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,266</td><td>1,943</td><td>0,510</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,392</td><td>1,872</td><td>0,675</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,502</td><td>1,803</td><td>0,796</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,594</td><td>1,741</td><td>0,888</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,670</td><td>1,691</td><td>0,965</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,737</td><td>1,645</td><td>1,027</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,799</td><td>1,602</td><td>1,084</td></tr><tr><td>0,47</td><td>0,849</td><td>1,566</td><td>1,127</td></tr><tr><td>0,52</td><td>0,891</td><td>1,537</td><td>1,165</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,967</td><td>1,483</td><td>1,231</td></tr><tr><td>0,72</td><td>1,026</td><td>1,441</td><td>1,283</td></tr><tr><td>0,78</td><td>1,051</td><td>1,424</td><td>1,306</td></tr><tr><td>0,88</td><td>1,096</td><td>1,391</td><td>1,343</td></tr><tr><td>0,98</td><td>1,132</td><td>1,364</td><td>1,370</td></tr><tr><td>1,19</td><td>1,188</td><td>1,324</td><td>1,420</td></tr><tr><td>1,40</td><td>1,230</td><td>1,294</td><td>1,454</td></tr><tr><td>1,61</td><td>1,264</td><td>1,270</td><td>1,484</td></tr><tr><td>1,81</td><td>1,289</td><td>1,253</td><td>1,509</td></tr><tr><td>2,02</td><td>1,309</td><td>1,240</td><td>1,529</td></tr><tr><td>2,28</td><td>1,328</td><td>1,227</td><td>1,548</td></tr><tr><td>2,59</td><td>1,345</td><td>1,216</td><td>1,565</td></tr><tr><td>2,90</td><td>1,359</td><td>1,206</td><td>1,578</td></tr><tr><td>3,21</td><td>1,368</td><td>1,202</td><td>1,591</td></tr><tr><td>3,52</td><td>1,376</td><td>1,196</td><td>1,598</td></tr><tr><td>3,78</td><td>1,379</td><td>1,196</td><td>1,607</td></tr><tr><td>4,09</td><td>1,384</td><td>1,193</td><td>1,615</td></tr><tr><td>4,40</td><td>1,387</td><td>1,195</td><td>1,627</td></tr><tr><td>4,71</td><td>1,390</td><td>1,193</td><td>1,630</td></tr><tr><td>5,02</td><td>1,393</td><td>1,192</td><td>1,638</td></tr><tr><td>5,49</td><td>1,393</td><td>1,197</td><td>1,651</td></tr><tr><td>6,00</td><td>1,393</td><td>1,199</td><td>1,658</td></tr><tr><td>6,52</td><td>1,393</td><td>1,203</td><td>1,670</td></tr><tr><td>6,98</td><td>1,390</td><td>1,212</td><td>1,687</td></tr><tr><td>8,02</td><td>1,387</td><td>1,220</td><td>1,704</td></tr><tr><td>9,00</td><td>1,382</td><td>1,227</td><td>1,709</td></tr><tr><td>9,98</td><td>1,379</td><td>1,233</td><td>1,717</td></tr><tr><td>11,02</td><td>1,370</td><td>1,247</td><td>1,733</td></tr><tr><td>12,00</td><td>1,365</td><td>1,254</td><td>1,740</td></tr><tr><td>12,99</td><td>1,359</td><td>1,262</td><td>1,746</td></tr><tr><td>14,02</td><td>1,354</td><td>1,266</td><td>1,742</td></tr><tr><td>15,00</td><td>1,348</td><td>1,274</td><td>1,747</td></tr><tr><td>15,99</td><td>1,342</td><td>1,279</td><td>1,747</td></tr><tr><td>17,02</td><td>1,337</td><td>1,283</td><td>1,741</td></tr><tr><td>18,00</td><td>1,331</td><td>1,290</td><td>1,745</td></tr><tr><td>18,99</td><td>1,326</td><td>1,295</td><td>1,743</td></tr><tr><td>20,00</td><td>1,323</td><td>1,297</td><td>1,740</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla ni tampoco un abultamiento excesivo. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	2,039	0,000	0,05	0,112	2,020	0,277	0,10	0,266	1,943	0,510	0,16	0,392	1,872	0,675	0,21	0,502	1,803	0,796	0,26	0,594	1,741	0,888	0,31	0,670	1,691	0,965	0,36	0,737	1,645	1,027	0,41	0,799	1,602	1,084	0,47	0,849	1,566	1,127	0,52	0,891	1,537	1,165	0,62	0,967	1,483	1,231	0,72	1,026	1,441	1,283	0,78	1,051	1,424	1,306	0,88	1,096	1,391	1,343	0,98	1,132	1,364	1,370	1,19	1,188	1,324	1,420	1,40	1,230	1,294	1,454	1,61	1,264	1,270	1,484	1,81	1,289	1,253	1,509	2,02	1,309	1,240	1,529	2,28	1,328	1,227	1,548	2,59	1,345	1,216	1,565	2,90	1,359	1,206	1,578	3,21	1,368	1,202	1,591	3,52	1,376	1,196	1,598	3,78	1,379	1,196	1,607	4,09	1,384	1,193	1,615	4,40	1,387	1,195	1,627	4,71	1,390	1,193	1,630	5,02	1,393	1,192	1,638	5,49	1,393	1,197	1,651	6,00	1,393	1,199	1,658	6,52	1,393	1,203	1,670	6,98	1,390	1,212	1,687	8,02	1,387	1,220	1,704	9,00	1,382	1,227	1,709	9,98	1,379	1,233	1,717	11,02	1,370	1,247	1,733	12,00	1,365	1,254	1,740	12,99	1,359	1,262	1,746	14,02	1,354	1,266	1,742	15,00	1,348	1,274	1,747	15,99	1,342	1,279	1,747	17,02	1,337	1,283	1,741	18,00	1,331	1,290	1,745	18,99	1,326	1,295	1,743	20,00	1,323	1,297	1,740																				
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																												
0,00	0,000	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																												
0,05	0,112	2,020	0,277																																																																																																																																																																																																																												
0,10	0,266	1,943	0,510																																																																																																																																																																																																																												
0,16	0,392	1,872	0,675																																																																																																																																																																																																																												
0,21	0,502	1,803	0,796																																																																																																																																																																																																																												
0,26	0,594	1,741	0,888																																																																																																																																																																																																																												
0,31	0,670	1,691	0,965																																																																																																																																																																																																																												
0,36	0,737	1,645	1,027																																																																																																																																																																																																																												
0,41	0,799	1,602	1,084																																																																																																																																																																																																																												
0,47	0,849	1,566	1,127																																																																																																																																																																																																																												
0,52	0,891	1,537	1,165																																																																																																																																																																																																																												
0,62	0,967	1,483	1,231																																																																																																																																																																																																																												
0,72	1,026	1,441	1,283																																																																																																																																																																																																																												
0,78	1,051	1,424	1,306																																																																																																																																																																																																																												
0,88	1,096	1,391	1,343																																																																																																																																																																																																																												
0,98	1,132	1,364	1,370																																																																																																																																																																																																																												
1,19	1,188	1,324	1,420																																																																																																																																																																																																																												
1,40	1,230	1,294	1,454																																																																																																																																																																																																																												
1,61	1,264	1,270	1,484																																																																																																																																																																																																																												
1,81	1,289	1,253	1,509																																																																																																																																																																																																																												
2,02	1,309	1,240	1,529																																																																																																																																																																																																																												
2,28	1,328	1,227	1,548																																																																																																																																																																																																																												
2,59	1,345	1,216	1,565																																																																																																																																																																																																																												
2,90	1,359	1,206	1,578																																																																																																																																																																																																																												
3,21	1,368	1,202	1,591																																																																																																																																																																																																																												
3,52	1,376	1,196	1,598																																																																																																																																																																																																																												
3,78	1,379	1,196	1,607																																																																																																																																																																																																																												
4,09	1,384	1,193	1,615																																																																																																																																																																																																																												
4,40	1,387	1,195	1,627																																																																																																																																																																																																																												
4,71	1,390	1,193	1,630																																																																																																																																																																																																																												
5,02	1,393	1,192	1,638																																																																																																																																																																																																																												
5,49	1,393	1,197	1,651																																																																																																																																																																																																																												
6,00	1,393	1,199	1,658																																																																																																																																																																																																																												
6,52	1,393	1,203	1,670																																																																																																																																																																																																																												
6,98	1,390	1,212	1,687																																																																																																																																																																																																																												
8,02	1,387	1,220	1,704																																																																																																																																																																																																																												
9,00	1,382	1,227	1,709																																																																																																																																																																																																																												
9,98	1,379	1,233	1,717																																																																																																																																																																																																																												
11,02	1,370	1,247	1,733																																																																																																																																																																																																																												
12,00	1,365	1,254	1,740																																																																																																																																																																																																																												
12,99	1,359	1,262	1,746																																																																																																																																																																																																																												
14,02	1,354	1,266	1,742																																																																																																																																																																																																																												
15,00	1,348	1,274	1,747																																																																																																																																																																																																																												
15,99	1,342	1,279	1,747																																																																																																																																																																																																																												
17,02	1,337	1,283	1,741																																																																																																																																																																																																																												
18,00	1,331	1,290	1,745																																																																																																																																																																																																																												
18,99	1,326	1,295	1,743																																																																																																																																																																																																																												
20,00	1,323	1,297	1,740																																																																																																																																																																																																																												
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																											

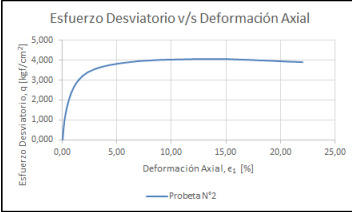
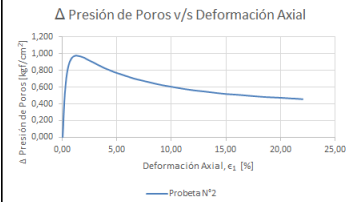
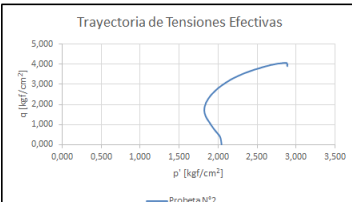
Tabla E-6: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Fecha realización:		12-01-2016																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Probeta Nº:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Altura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,695																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Masa húmeda probeta	[g]	331,11	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,545																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Humedad promedio probeta	[%]	9,7	Relación de vacíos	-	0,820																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
				Saturación	[%]	33,39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,88	Área probeta	[cm²]	18,74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Altura probeta	[cm]	9,81	Volumen probeta	[cm³]	183,78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,059																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Humedad probeta	[%]	25,3	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,644																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
				Relación de vacíos	-	0,711																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	18,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	2,541																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,080	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	0,940																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	3,481																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,028</td><td>3,057</td><td>0,079</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,118</td><td>3,047</td><td>0,316</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,308</td><td>2,961</td><td>0,632</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,490</td><td>2,860</td><td>0,873</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,661</td><td>2,751</td><td>1,060</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,804</td><td>2,657</td><td>1,207</td></tr><tr><td>0,37</td><td>0,933</td><td>2,571</td><td>1,335</td></tr><tr><td>0,42</td><td>1,043</td><td>2,492</td><td>1,428</td></tr><tr><td>0,47</td><td>1,146</td><td>2,418</td><td>1,515</td></tr><tr><td>0,52</td><td>1,233</td><td>2,355</td><td>1,588</td></tr><tr><td>0,57</td><td>1,312</td><td>2,298</td><td>1,651</td></tr><tr><td>0,68</td><td>1,440</td><td>2,201</td><td>1,747</td></tr><tr><td>0,78</td><td>1,541</td><td>2,124</td><td>1,819</td></tr><tr><td>0,89</td><td>1,625</td><td>2,060</td><td>1,880</td></tr><tr><td>0,99</td><td>1,695</td><td>2,004</td><td>1,922</td></tr><tr><td>1,20</td><td>1,805</td><td>1,921</td><td>2,000</td></tr><tr><td>1,41</td><td>1,886</td><td>1,856</td><td>2,049</td></tr><tr><td>1,62</td><td>1,945</td><td>1,812</td><td>2,092</td></tr><tr><td>1,77</td><td>1,981</td><td>1,784</td><td>2,118</td></tr><tr><td>1,98</td><td>2,021</td><td>1,754</td><td>2,146</td></tr><tr><td>2,30</td><td>2,065</td><td>1,721</td><td>2,182</td></tr><tr><td>2,61</td><td>2,099</td><td>1,697</td><td>2,212</td></tr><tr><td>2,92</td><td>2,124</td><td>1,681</td><td>2,238</td></tr><tr><td>3,18</td><td>2,141</td><td>1,668</td><td>2,250</td></tr><tr><td>3,50</td><td>2,155</td><td>1,662</td><td>2,275</td></tr><tr><td>3,81</td><td>2,166</td><td>1,656</td><td>2,290</td></tr><tr><td>4,12</td><td>2,175</td><td>1,654</td><td>2,310</td></tr><tr><td>4,38</td><td>2,180</td><td>1,653</td><td>2,322</td></tr><tr><td>4,70</td><td>2,186</td><td>1,650</td><td>2,332</td></tr><tr><td>5,01</td><td>2,192</td><td>1,650</td><td>2,346</td></tr><tr><td>5,48</td><td>2,194</td><td>1,653</td><td>2,366</td></tr><tr><td>6,00</td><td>2,197</td><td>1,656</td><td>2,383</td></tr><tr><td>6,52</td><td>2,197</td><td>1,664</td><td>2,405</td></tr><tr><td>6,99</td><td>2,200</td><td>1,665</td><td>2,419</td></tr><tr><td>7,98</td><td>2,194</td><td>1,681</td><td>2,448</td></tr><tr><td>8,97</td><td>2,189</td><td>1,693</td><td>2,468</td></tr><tr><td>10,02</td><td>2,183</td><td>1,706</td><td>2,489</td></tr><tr><td>11,01</td><td>2,175</td><td>1,720</td><td>2,506</td></tr><tr><td>12,00</td><td>2,166</td><td>1,732</td><td>2,518</td></tr><tr><td>12,99</td><td>2,161</td><td>1,743</td><td>2,533</td></tr><tr><td>13,99</td><td>2,152</td><td>1,753</td><td>2,538</td></tr><tr><td>14,98</td><td>2,144</td><td>1,761</td><td>2,538</td></tr><tr><td>16,02</td><td>2,135</td><td>1,770</td><td>2,540</td></tr><tr><td>17,01</td><td>2,127</td><td>1,778</td><td>2,539</td></tr><tr><td>18,00</td><td>2,119</td><td>1,787</td><td>2,541</td></tr><tr><td>18,99</td><td>2,113</td><td>1,789</td><td>2,530</td></tr><tr><td>19,84</td><td>2,107</td><td>1,795</td><td>2,531</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><</table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	3,059	0,000	0,05	0,028	3,057	0,079	0,10	0,118	3,047	0,316	0,16	0,308	2,961	0,632	0,21	0,490	2,860	0,873	0,26	0,661	2,751	1,060	0,31	0,804	2,657	1,207	0,37	0,933	2,571	1,335	0,42	1,043	2,492	1,428	0,47	1,146	2,418	1,515	0,52	1,233	2,355	1,588	0,57	1,312	2,298	1,651	0,68	1,440	2,201	1,747	0,78	1,541	2,124	1,819	0,89	1,625	2,060	1,880	0,99	1,695	2,004	1,922	1,20	1,805	1,921	2,000	1,41	1,886	1,856	2,049	1,62	1,945	1,812	2,092	1,77	1,981	1,784	2,118	1,98	2,021	1,754	2,146	2,30	2,065	1,721	2,182	2,61	2,099	1,697	2,212	2,92	2,124	1,681	2,238	3,18	2,141	1,668	2,250	3,50	2,155	1,662	2,275	3,81	2,166	1,656	2,290	4,12	2,175	1,654	2,310	4,38	2,180	1,653	2,322	4,70	2,186	1,650	2,332	5,01	2,192	1,650	2,346	5,48	2,194	1,653	2,366	6,00	2,197	1,656	2,383	6,52	2,197	1,664	2,405	6,99	2,200	1,665	2,419	7,98	2,194	1,681	2,448	8,97	2,189	1,693	2,468	10,02	2,183	1,706	2,489	11,01	2,175	1,720	2,506	12,00	2,166	1,732	2,518	12,99	2,161	1,743	2,533	13,99	2,152	1,753	2,538	14,98	2,144	1,761	2,538	16,02	2,135	1,770	2,540	17,01	2,127	1,778	2,539	18,00	2,119	1,787	2,541	18,99	2,113	1,789	2,530	19,84	2,107	1,795	2,531																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,00	0,000	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,05	0,028	3,057	0,079																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,10	0,118	3,047	0,316																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,16	0,308	2,961	0,632																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,21	0,490	2,860	0,873																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,26	0,661	2,751	1,060																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,31	0,804	2,657	1,207																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,37	0,933	2,571	1,335																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,42	1,043	2,492	1,428																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,47	1,146	2,418	1,515																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,52	1,233	2,355	1,588																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,57	1,312	2,298	1,651																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,68	1,440	2,201	1,747																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,78	1,541	2,124	1,819																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,89	1,625	2,060	1,880																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
0,99	1,695	2,004	1,922																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1,20	1,805	1,921	2,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1,41	1,886	1,856	2,049																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1,62	1,945	1,812	2,092																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1,77	1,981	1,784	2,118																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
1,98	2,021	1,754	2,146																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
2,30	2,065	1,721	2,182																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
2,61	2,099	1,697	2,212																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
2,92	2,124	1,681	2,238																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
3,18	2,141	1,668	2,250																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
3,50	2,155	1,662	2,275																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
3,81	2,166	1,656	2,290																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
4,12	2,175	1,654	2,310																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
4,38	2,180	1,653	2,322																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
4,70	2,186	1,650	2,332																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
5,01	2,192	1,650	2,346																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
5,48	2,194	1,653	2,366																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
6,00	2,197	1,656	2,383																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
6,52	2,197	1,664	2,405																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
6,99	2,200	1,665	2,419																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
7,98	2,194	1,681	2,448																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
8,97	2,189	1,693	2,468																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
10,02	2,183	1,706	2,489																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
11,01	2,175	1,720	2,506																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
12,00	2,166	1,732	2,518																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
12,99	2,161	1,743	2,533																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
13,99	2,152	1,753	2,538																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
14,98	2,144	1,761	2,538																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
16,02	2,135	1,770	2,540																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
17,01	2,127	1,778	2,539																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
18,00	2,119	1,787	2,541																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
18,99	2,113	1,789	2,530																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
19,84	2,107	1,795	2,531																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Tabla E-7: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						N° OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Fecha realización:		18-01-2016																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
SPT N°:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Probeta N°:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Límica																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,858																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Masa húmeda probeta	[g]	363,07	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,691																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad promedio probeta	[%]	9,8	Relación de vacíos	-	0,662																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
				Saturación	[%]	41,68																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	5,01	Área probeta	[cm²]	19,72																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura probeta	[cm]	9,96	Volumen probeta	[cm³]	196,53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,085																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad probeta	[%]	23,8	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,684																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
					Relación de vacíos	-	0,670																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	12,99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	3,546																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	3,079	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	1,303																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	4,849																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,109</td><td>0,998</td><td>0,263</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,202</td><td>0,963</td><td>0,436</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,266</td><td>0,944</td><td>0,572</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,317</td><td>0,933</td><td>0,689</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,356</td><td>0,928</td><td>0,792</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,387</td><td>0,926</td><td>0,880</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,409</td><td>0,935</td><td>0,973</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,426</td><td>0,948</td><td>1,061</td></tr><tr><td>0,46</td><td>0,437</td><td>0,963</td><td>1,140</td></tr><tr><td>0,51</td><td>0,448</td><td>0,979</td><td>1,224</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,457</td><td>1,023</td><td>1,381</td></tr><tr><td>0,72</td><td>0,457</td><td>1,072</td><td>1,529</td></tr><tr><td>0,82</td><td>0,448</td><td>1,125</td><td>1,662</td></tr><tr><td>0,93</td><td>0,437</td><td>1,181</td><td>1,795</td></tr><tr><td>0,98</td><td>0,429</td><td>1,211</td><td>1,859</td></tr><tr><td>1,18</td><td>0,398</td><td>1,314</td><td>2,077</td></tr><tr><td>1,39</td><td>0,362</td><td>1,414</td><td>2,267</td></tr><tr><td>1,59</td><td>0,328</td><td>1,500</td><td>2,423</td></tr><tr><td>1,80</td><td>0,294</td><td>1,576</td><td>2,552</td></tr><tr><td>2,00</td><td>0,263</td><td>1,642</td><td>2,656</td></tr><tr><td>2,31</td><td>0,219</td><td>1,729</td><td>2,784</td></tr><tr><td>2,62</td><td>0,182</td><td>1,801</td><td>2,889</td></tr><tr><td>2,88</td><td>0,151</td><td>1,854</td><td>2,958</td></tr><tr><td>3,19</td><td>0,121</td><td>1,908</td><td>3,025</td></tr><tr><td>3,49</td><td>0,091</td><td>1,958</td><td>3,087</td></tr><tr><td>3,80</td><td>0,064</td><td>2,002</td><td>3,139</td></tr><tr><td>4,11</td><td>0,039</td><td>2,041</td><td>3,182</td></tr><tr><td>4,42</td><td>0,017</td><td>2,073</td><td>3,211</td></tr><tr><td>4,73</td><td>-0,003</td><td>2,106</td><td>3,249</td></tr><tr><td>4,98</td><td>-0,020</td><td>2,131</td><td>3,275</td></tr><tr><td>5,50</td><td>-0,050</td><td>2,178</td><td>3,322</td></tr><tr><td>6,01</td><td>-0,078</td><td>2,218</td><td>3,360</td></tr><tr><td>6,52</td><td>-0,101</td><td>2,251</td><td>3,392</td></tr><tr><td>6,99</td><td>-0,121</td><td>2,279</td><td>3,417</td></tr><tr><td>8,01</td><td>-0,160</td><td>2,335</td><td>3,467</td></tr><tr><td>8,99</td><td>-0,193</td><td>2,378</td><td>3,495</td></tr><tr><td>10,01</td><td>-0,221</td><td>2,414</td><td>3,519</td></tr><tr><td>10,99</td><td>-0,244</td><td>2,441</td><td>3,531</td></tr><tr><td>12,02</td><td>-0,266</td><td>2,467</td><td>3,545</td></tr><tr><td>12,99</td><td>-0,283</td><td>2,485</td><td>3,546</td></tr><tr><td>14,02</td><td>-0,300</td><td>2,500</td><td>3,541</td></tr><tr><td>15,00</td><td>-0,314</td><td>2,514</td><td>3,541</td></tr><tr><td>16,02</td><td>-0,328</td><td>2,525</td><td>3,533</td></tr><tr><td>17,00</td><td>-0,342</td><td>2,536</td><td>3,523</td></tr><tr><td>17,97</td><td>-0,353</td><td>2,544</td><td>3,512</td></tr><tr><td>19,00</td><td>-0,364</td><td>2,550</td><td>3,498</td></tr><tr><td>20,00</td><td>-0,376</td><td>2,556</td><td>3,481</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	1,020	0,000	0,05	0,109	0,998	0,263	0,10	0,202	0,963	0,436	0,15	0,266	0,944	0,572	0,21	0,317	0,933	0,689	0,26	0,356	0,928	0,792	0,31	0,387	0,926	0,880	0,36	0,409	0,935	0,973	0,41	0,426	0,948	1,061	0,46	0,437	0,963	1,140	0,51	0,448	0,979	1,224	0,62	0,457	1,023	1,381	0,72	0,457	1,072	1,529	0,82	0,448	1,125	1,662	0,93	0,437	1,181	1,795	0,98	0,429	1,211	1,859	1,18	0,398	1,314	2,077	1,39	0,362	1,414	2,267	1,59	0,328	1,500	2,423	1,80	0,294	1,576	2,552	2,00	0,263	1,642	2,656	2,31	0,219	1,729	2,784	2,62	0,182	1,801	2,889	2,88	0,151	1,854	2,958	3,19	0,121	1,908	3,025	3,49	0,091	1,958	3,087	3,80	0,064	2,002	3,139	4,11	0,039	2,041	3,182	4,42	0,017	2,073	3,211	4,73	-0,003	2,106	3,249	4,98	-0,020	2,131	3,275	5,50	-0,050	2,178	3,322	6,01	-0,078	2,218	3,360	6,52	-0,101	2,251	3,392	6,99	-0,121	2,279	3,417	8,01	-0,160	2,335	3,467	8,99	-0,193	2,378	3,495	10,01	-0,221	2,414	3,519	10,99	-0,244	2,441	3,531	12,02	-0,266	2,467	3,545	12,99	-0,283	2,485	3,546	14,02	-0,300	2,500	3,541	15,00	-0,314	2,514	3,541	16,02	-0,328	2,525	3,533	17,00	-0,342	2,536	3,523	17,97	-0,353	2,544	3,512	19,00	-0,364	2,550	3,498	20,00	-0,376	2,556	3,481																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,00	0,000	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,05	0,109	0,998	0,263																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,10	0,202	0,963	0,436																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,15	0,266	0,944	0,572																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,21	0,317	0,933	0,689																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,26	0,356	0,928	0,792																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,31	0,387	0,926	0,880																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,36	0,409	0,935	0,973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,41	0,426	0,948	1,061																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,46	0,437	0,963	1,140																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,51	0,448	0,979	1,224																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,62	0,457	1,023	1,381																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,72	0,457	1,072	1,529																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,82	0,448	1,125	1,662																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,93	0,437	1,181	1,795																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,98	0,429	1,211	1,859																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,18	0,398	1,314	2,077																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,39	0,362	1,414	2,267																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,59	0,328	1,500	2,423																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,80	0,294	1,576	2,552																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,00	0,263	1,642	2,656																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,31	0,219	1,729	2,784																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,62	0,182	1,801	2,889																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,88	0,151	1,854	2,958																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,19	0,121	1,908	3,025																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,49	0,091	1,958	3,087																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,80	0,064	2,002	3,139																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,11	0,039	2,041	3,182																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,42	0,017	2,073	3,211																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,73	-0,003	2,106	3,249																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,98	-0,020	2,131	3,275																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,50	-0,050	2,178	3,322																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,01	-0,078	2,218	3,360																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,52	-0,101	2,251	3,392																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,99	-0,121	2,279	3,417																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8,01	-0,160	2,335	3,467																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8,99	-0,193	2,378	3,495																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
10,01	-0,221	2,414	3,519																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
10,99	-0,244	2,441	3,531																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
12,02	-0,266	2,467	3,545																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
12,99	-0,283	2,485	3,546																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
14,02	-0,300	2,500	3,541																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
15,00	-0,314	2,514	3,541																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
16,02	-0,328	2,525	3,533																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
17,00	-0,342	2,536	3,523																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
17,97	-0,353	2,544	3,512																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
19,00	-0,364	2,550	3,498																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
20,00	-0,376	2,556	3,481																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Tabla E-8: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																												
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																												
Fecha realización:		19-01-2016																																																																																																																																																																																																																	
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																	
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																													
Probeta Nº:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																													
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																													
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																													
					LP	-																																																																																																																																																																																																													
					IP	NP																																																																																																																																																																																																													
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																													
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,34																																																																																																																																																																																																													
	Altura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,859																																																																																																																																																																																																													
	Masa húmeda probeta	[g]	363,05	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,692																																																																																																																																																																																																													
	Humedad promedio probeta	[%]	9,9	Relación de vacíos	-	0,662																																																																																																																																																																																																													
				Saturación	[%]	41,90																																																																																																																																																																																																													
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	5,00	Área probeta	[cm²]	19,64																																																																																																																																																																																																													
	Altura probeta	[cm]	9,93	Volumen probeta	[cm³]	195,01																																																																																																																																																																																																													
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,093																																																																																																																																																																																																													
	Humedad probeta	[%]	23,4	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,696																																																																																																																																																																																																													
					Relación de vacíos	-	0,658																																																																																																																																																																																																												
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,99	Deformación axial en la falla	[%]	15,00																																																																																																																																																																																																													
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	4,073																																																																																																																																																																																																													
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	1,570	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	1,521																																																																																																																																																																																																													
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	5,594																																																																																																																																																																																																													
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,140</td><td>2,022</td><td>0,368</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,303</td><td>1,961</td><td>0,674</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,429</td><td>1,915</td><td>0,914</td></tr><tr><td>0,20</td><td>0,530</td><td>1,882</td><td>1,116</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,611</td><td>1,854</td><td>1,275</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,681</td><td>1,833</td><td>1,425</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,737</td><td>1,823</td><td>1,561</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,782</td><td>1,818</td><td>1,682</td></tr><tr><td>0,46</td><td>0,818</td><td>1,819</td><td>1,793</td></tr><tr><td>0,51</td><td>0,849</td><td>1,824</td><td>1,900</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,897</td><td>1,841</td><td>2,095</td></tr><tr><td>0,72</td><td>0,928</td><td>1,866</td><td>2,261</td></tr><tr><td>0,82</td><td>0,950</td><td>1,894</td><td>2,413</td></tr><tr><td>0,87</td><td>0,958</td><td>1,907</td><td>2,477</td></tr><tr><td>0,98</td><td>0,970</td><td>1,938</td><td>2,605</td></tr><tr><td>1,18</td><td>0,981</td><td>1,993</td><td>2,804</td></tr><tr><td>1,39</td><td>0,978</td><td>2,050</td><td>2,965</td></tr><tr><td>1,60</td><td>0,972</td><td>2,100</td><td>3,098</td></tr><tr><td>1,80</td><td>0,964</td><td>2,144</td><td>3,206</td></tr><tr><td>2,01</td><td>0,953</td><td>2,185</td><td>3,296</td></tr><tr><td>2,32</td><td>0,930</td><td>2,245</td><td>3,409</td></tr><tr><td>2,58</td><td>0,914</td><td>2,283</td><td>3,473</td></tr><tr><td>2,89</td><td>0,894</td><td>2,330</td><td>3,552</td></tr><tr><td>3,20</td><td>0,872</td><td>2,372</td><td>3,613</td></tr><tr><td>3,50</td><td>0,852</td><td>2,409</td><td>3,664</td></tr><tr><td>3,81</td><td>0,832</td><td>2,444</td><td>3,710</td></tr><tr><td>4,12</td><td>0,816</td><td>2,473</td><td>3,747</td></tr><tr><td>4,38</td><td>0,802</td><td>2,497</td><td>3,777</td></tr><tr><td>4,69</td><td>0,785</td><td>2,523</td><td>3,804</td></tr><tr><td>5,00</td><td>0,771</td><td>2,547</td><td>3,835</td></tr><tr><td>5,51</td><td>0,748</td><td>2,583</td><td>3,875</td></tr><tr><td>5,98</td><td>0,729</td><td>2,613</td><td>3,908</td></tr><tr><td>6,49</td><td>0,706</td><td>2,646</td><td>3,937</td></tr><tr><td>7,01</td><td>0,689</td><td>2,674</td><td>3,971</td></tr><tr><td>7,99</td><td>0,659</td><td>2,714</td><td>3,999</td></tr><tr><td>9,02</td><td>0,628</td><td>2,756</td><td>4,032</td></tr><tr><td>10,00</td><td>0,605</td><td>2,782</td><td>4,044</td></tr><tr><td>10,98</td><td>0,583</td><td>2,808</td><td>4,055</td></tr><tr><td>12,01</td><td>0,563</td><td>2,833</td><td>4,071</td></tr><tr><td>12,99</td><td>0,549</td><td>2,846</td><td>4,067</td></tr><tr><td>14,02</td><td>0,532</td><td>2,864</td><td>4,071</td></tr><tr><td>15,00</td><td>0,518</td><td>2,879</td><td>4,073</td></tr><tr><td>15,98</td><td>0,510</td><td>2,879</td><td>4,050</td></tr><tr><td>17,01</td><td>0,499</td><td>2,884</td><td>4,031</td></tr><tr><td>17,99</td><td>0,488</td><td>2,887</td><td>4,007</td></tr><tr><td>19,02</td><td>0,479</td><td>2,889</td><td>3,986</td></tr><tr><td>20,00</td><td>0,474</td><td>2,886</td><td>3,960</td></tr><tr><td>20,98</td><td>0,465</td><td>2,885</td><td>3,934</td></tr><tr><td>22,00</td><td>0,457</td><td>2,888</td><td>3,915</td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	2,039	0,000	0,05	0,140	2,022	0,368	0,10	0,303	1,961	0,674	0,15	0,429	1,915	0,914	0,20	0,530	1,882	1,116	0,26	0,611	1,854	1,275	0,31	0,681	1,833	1,425	0,36	0,737	1,823	1,561	0,41	0,782	1,818	1,682	0,46	0,818	1,819	1,793	0,51	0,849	1,824	1,900	0,62	0,897	1,841	2,095	0,72	0,928	1,866	2,261	0,82	0,950	1,894	2,413	0,87	0,958	1,907	2,477	0,98	0,970	1,938	2,605	1,18	0,981	1,993	2,804	1,39	0,978	2,050	2,965	1,60	0,972	2,100	3,098	1,80	0,964	2,144	3,206	2,01	0,953	2,185	3,296	2,32	0,930	2,245	3,409	2,58	0,914	2,283	3,473	2,89	0,894	2,330	3,552	3,20	0,872	2,372	3,613	3,50	0,852	2,409	3,664	3,81	0,832	2,444	3,710	4,12	0,816	2,473	3,747	4,38	0,802	2,497	3,777	4,69	0,785	2,523	3,804	5,00	0,771	2,547	3,835	5,51	0,748	2,583	3,875	5,98	0,729	2,613	3,908	6,49	0,706	2,646	3,937	7,01	0,689	2,674	3,971	7,99	0,659	2,714	3,999	9,02	0,628	2,756	4,032	10,00	0,605	2,782	4,044	10,98	0,583	2,808	4,055	12,01	0,563	2,833	4,071	12,99	0,549	2,846	4,067	14,02	0,532	2,864	4,071	15,00	0,518	2,879	4,073	15,98	0,510	2,879	4,050	17,01	0,499	2,884	4,031	17,99	0,488	2,887	4,007	19,02	0,479	2,889	3,986	20,00	0,474	2,886	3,960	20,98	0,465	2,885	3,934	22,00	0,457	2,888	3,915
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																
0,00	0,000	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																
0,05	0,140	2,022	0,368																																																																																																																																																																																																																
0,10	0,303	1,961	0,674																																																																																																																																																																																																																
0,15	0,429	1,915	0,914																																																																																																																																																																																																																
0,20	0,530	1,882	1,116																																																																																																																																																																																																																
0,26	0,611	1,854	1,275																																																																																																																																																																																																																
0,31	0,681	1,833	1,425																																																																																																																																																																																																																
0,36	0,737	1,823	1,561																																																																																																																																																																																																																
0,41	0,782	1,818	1,682																																																																																																																																																																																																																
0,46	0,818	1,819	1,793																																																																																																																																																																																																																
0,51	0,849	1,824	1,900																																																																																																																																																																																																																
0,62	0,897	1,841	2,095																																																																																																																																																																																																																
0,72	0,928	1,866	2,261																																																																																																																																																																																																																
0,82	0,950	1,894	2,413																																																																																																																																																																																																																
0,87	0,958	1,907	2,477																																																																																																																																																																																																																
0,98	0,970	1,938	2,605																																																																																																																																																																																																																
1,18	0,981	1,993	2,804																																																																																																																																																																																																																
1,39	0,978	2,050	2,965																																																																																																																																																																																																																
1,60	0,972	2,100	3,098																																																																																																																																																																																																																
1,80	0,964	2,144	3,206																																																																																																																																																																																																																
2,01	0,953	2,185	3,296																																																																																																																																																																																																																
2,32	0,930	2,245	3,409																																																																																																																																																																																																																
2,58	0,914	2,283	3,473																																																																																																																																																																																																																
2,89	0,894	2,330	3,552																																																																																																																																																																																																																
3,20	0,872	2,372	3,613																																																																																																																																																																																																																
3,50	0,852	2,409	3,664																																																																																																																																																																																																																
3,81	0,832	2,444	3,710																																																																																																																																																																																																																
4,12	0,816	2,473	3,747																																																																																																																																																																																																																
4,38	0,802	2,497	3,777																																																																																																																																																																																																																
4,69	0,785	2,523	3,804																																																																																																																																																																																																																
5,00	0,771	2,547	3,835																																																																																																																																																																																																																
5,51	0,748	2,583	3,875																																																																																																																																																																																																																
5,98	0,729	2,613	3,908																																																																																																																																																																																																																
6,49	0,706	2,646	3,937																																																																																																																																																																																																																
7,01	0,689	2,674	3,971																																																																																																																																																																																																																
7,99	0,659	2,714	3,999																																																																																																																																																																																																																
9,02	0,628	2,756	4,032																																																																																																																																																																																																																
10,00	0,605	2,782	4,044																																																																																																																																																																																																																
10,98	0,583	2,808	4,055																																																																																																																																																																																																																
12,01	0,563	2,833	4,071																																																																																																																																																																																																																
12,99	0,549	2,846	4,067																																																																																																																																																																																																																
14,02	0,532	2,864	4,071																																																																																																																																																																																																																
15,00	0,518	2,879	4,073																																																																																																																																																																																																																
15,98	0,510	2,879	4,050																																																																																																																																																																																																																
17,01	0,499	2,884	4,031																																																																																																																																																																																																																
17,99	0,488	2,887	4,007																																																																																																																																																																																																																
19,02	0,479	2,889	3,986																																																																																																																																																																																																																
20,00	0,474	2,886	3,960																																																																																																																																																																																																																
20,98	0,465	2,885	3,934																																																																																																																																																																																																																
22,00	0,457	2,888	3,915																																																																																																																																																																																																																
$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$q = \sigma_1 - \sigma_3$ Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial  Δ Presión de Poros v/s Deformación Axial  Trayectoria de Tensiones Efectivas  																																																																																																																																																																																																																			
Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla ni tampoco un abultamiento excesivo. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																			
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																															

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

Tabla E-9: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																
Fecha realización:		20-01-2016																																																																																																																																																																																																																					
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																					
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																	
Probeta Nº:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																	
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																	
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																	
					LP	-																																																																																																																																																																																																																	
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																	
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																	
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,95																																																																																																																																																																																																																	
	Alura promedio probeta	[cm]	10,06	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,853																																																																																																																																																																																																																	
	Masa húmeda probeta	[g]	363,00	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,685																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad promedio probeta	[%]	10,0	Relación de vacíos	-	0,669																																																																																																																																																																																																																	
				Saturación	[%]	41,86																																																																																																																																																																																																																	
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,97	Área probeta	[cm²]	19,40																																																																																																																																																																																																																	
	Alura probeta	[cm]	9,94	Volumen probeta	[cm³]	192,87																																																																																																																																																																																																																	
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,103																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad probeta	[%]	22,8	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,712																																																																																																																																																																																																																	
					Relación de vacíos	-	0,642																																																																																																																																																																																																																
Otros	Parametro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	13,02																																																																																																																																																																																																																	
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	4,109																																																																																																																																																																																																																	
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	3,049	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	1,563																																																																																																																																																																																																																	
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	5,671																																																																																																																																																																																																																	
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,207</td><td>3,038</td><td>0,559</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,423</td><td>2,959</td><td>0,969</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,594</td><td>2,883</td><td>1,255</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,740</td><td>2,818</td><td>1,497</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,866</td><td>2,760</td><td>1,701</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,972</td><td>2,712</td><td>1,877</td></tr><tr><td>0,36</td><td>1,065</td><td>2,669</td><td>2,023</td></tr><tr><td>0,41</td><td>1,141</td><td>2,635</td><td>2,151</td></tr><tr><td>0,46</td><td>1,211</td><td>2,606</td><td>2,273</td></tr><tr><td>0,51</td><td>1,270</td><td>2,582</td><td>2,376</td></tr><tr><td>0,62</td><td>1,365</td><td>2,546</td><td>2,554</td></tr><tr><td>0,72</td><td>1,438</td><td>2,521</td><td>2,698</td></tr><tr><td>0,82</td><td>1,497</td><td>2,505</td><td>2,828</td></tr><tr><td>0,87</td><td>1,522</td><td>2,498</td><td>2,883</td></tr><tr><td>0,98</td><td>1,567</td><td>2,487</td><td>2,984</td></tr><tr><td>1,18</td><td>1,628</td><td>2,480</td><td>3,147</td></tr><tr><td>1,39</td><td>1,667</td><td>2,482</td><td>3,272</td></tr><tr><td>1,60</td><td>1,695</td><td>2,486</td><td>3,368</td></tr><tr><td>1,80</td><td>1,715</td><td>2,495</td><td>3,454</td></tr><tr><td>2,01</td><td>1,726</td><td>2,505</td><td>3,516</td></tr><tr><td>2,32</td><td>1,735</td><td>2,525</td><td>3,602</td></tr><tr><td>2,57</td><td>1,738</td><td>2,540</td><td>3,657</td></tr><tr><td>2,88</td><td>1,735</td><td>2,562</td><td>3,714</td></tr><tr><td>3,19</td><td>1,729</td><td>2,582</td><td>3,756</td></tr><tr><td>3,50</td><td>1,724</td><td>2,603</td><td>3,803</td></tr><tr><td>3,81</td><td>1,715</td><td>2,624</td><td>3,840</td></tr><tr><td>4,12</td><td>1,707</td><td>2,642</td><td>3,868</td></tr><tr><td>4,37</td><td>1,698</td><td>2,657</td><td>3,889</td></tr><tr><td>4,68</td><td>1,687</td><td>2,679</td><td>3,921</td></tr><tr><td>4,99</td><td>1,679</td><td>2,695</td><td>3,943</td></tr><tr><td>5,51</td><td>1,662</td><td>2,723</td><td>3,979</td></tr><tr><td>6,02</td><td>1,648</td><td>2,748</td><td>4,009</td></tr><tr><td>6,49</td><td>1,634</td><td>2,768</td><td>4,028</td></tr><tr><td>7,00</td><td>1,620</td><td>2,786</td><td>4,039</td></tr><tr><td>7,98</td><td>1,595</td><td>2,820</td><td>4,068</td></tr><tr><td>9,01</td><td>1,569</td><td>2,855</td><td>4,097</td></tr><tr><td>9,98</td><td>1,550</td><td>2,878</td><td>4,105</td></tr><tr><td>11,01</td><td>1,530</td><td>2,897</td><td>4,105</td></tr><tr><td>11,99</td><td>1,511</td><td>2,917</td><td>4,107</td></tr><tr><td>13,02</td><td>1,497</td><td>2,932</td><td>4,109</td></tr><tr><td>14,00</td><td>1,480</td><td>2,947</td><td>4,104</td></tr><tr><td>14,98</td><td>1,468</td><td>2,958</td><td>4,102</td></tr><tr><td>16,00</td><td>1,454</td><td>2,969</td><td>4,092</td></tr><tr><td>16,98</td><td>1,443</td><td>2,973</td><td>4,072</td></tr><tr><td>18,01</td><td>1,429</td><td>2,983</td><td>4,060</td></tr><tr><td>18,99</td><td>1,418</td><td>2,991</td><td>4,050</td></tr><tr><td>20,02</td><td>1,407</td><td>2,998</td><td>4,036</td></tr><tr><td>21,00</td><td>1,396</td><td>3,005</td><td>4,024</td></tr><tr><td>21,98</td><td>1,387</td><td>3,005</td><td>4,000</td></tr><tr><td>22,67</td><td>1,376</td><td>3,012</td><td>3,987</td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	3,059	0,000	0,05	0,207	3,038	0,559	0,10	0,423	2,959	0,969	0,15	0,594	2,883	1,255	0,21	0,740	2,818	1,497	0,26	0,866	2,760	1,701	0,31	0,972	2,712	1,877	0,36	1,065	2,669	2,023	0,41	1,141	2,635	2,151	0,46	1,211	2,606	2,273	0,51	1,270	2,582	2,376	0,62	1,365	2,546	2,554	0,72	1,438	2,521	2,698	0,82	1,497	2,505	2,828	0,87	1,522	2,498	2,883	0,98	1,567	2,487	2,984	1,18	1,628	2,480	3,147	1,39	1,667	2,482	3,272	1,60	1,695	2,486	3,368	1,80	1,715	2,495	3,454	2,01	1,726	2,505	3,516	2,32	1,735	2,525	3,602	2,57	1,738	2,540	3,657	2,88	1,735	2,562	3,714	3,19	1,729	2,582	3,756	3,50	1,724	2,603	3,803	3,81	1,715	2,624	3,840	4,12	1,707	2,642	3,868	4,37	1,698	2,657	3,889	4,68	1,687	2,679	3,921	4,99	1,679	2,695	3,943	5,51	1,662	2,723	3,979	6,02	1,648	2,748	4,009	6,49	1,634	2,768	4,028	7,00	1,620	2,786	4,039	7,98	1,595	2,820	4,068	9,01	1,569	2,855	4,097	9,98	1,550	2,878	4,105	11,01	1,530	2,897	4,105	11,99	1,511	2,917	4,107	13,02	1,497	2,932	4,109	14,00	1,480	2,947	4,104	14,98	1,468	2,958	4,102	16,00	1,454	2,969	4,092	16,98	1,443	2,973	4,072	18,01	1,429	2,983	4,060	18,99	1,418	2,991	4,050	20,02	1,407	2,998	4,036	21,00	1,396	3,005	4,024	21,98	1,387	3,005	4,000	22,67	1,376	3,012	3,987
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																				
0,00	0,000	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																				
0,05	0,207	3,038	0,559																																																																																																																																																																																																																				
0,10	0,423	2,959	0,969																																																																																																																																																																																																																				
0,15	0,594	2,883	1,255																																																																																																																																																																																																																				
0,21	0,740	2,818	1,497																																																																																																																																																																																																																				
0,26	0,866	2,760	1,701																																																																																																																																																																																																																				
0,31	0,972	2,712	1,877																																																																																																																																																																																																																				
0,36	1,065	2,669	2,023																																																																																																																																																																																																																				
0,41	1,141	2,635	2,151																																																																																																																																																																																																																				
0,46	1,211	2,606	2,273																																																																																																																																																																																																																				
0,51	1,270	2,582	2,376																																																																																																																																																																																																																				
0,62	1,365	2,546	2,554																																																																																																																																																																																																																				
0,72	1,438	2,521	2,698																																																																																																																																																																																																																				
0,82	1,497	2,505	2,828																																																																																																																																																																																																																				
0,87	1,522	2,498	2,883																																																																																																																																																																																																																				
0,98	1,567	2,487	2,984																																																																																																																																																																																																																				
1,18	1,628	2,480	3,147																																																																																																																																																																																																																				
1,39	1,667	2,482	3,272																																																																																																																																																																																																																				
1,60	1,695	2,486	3,368																																																																																																																																																																																																																				
1,80	1,715	2,495	3,454																																																																																																																																																																																																																				
2,01	1,726	2,505	3,516																																																																																																																																																																																																																				
2,32	1,735	2,525	3,602																																																																																																																																																																																																																				
2,57	1,738	2,540	3,657																																																																																																																																																																																																																				
2,88	1,735	2,562	3,714																																																																																																																																																																																																																				
3,19	1,729	2,582	3,756																																																																																																																																																																																																																				
3,50	1,724	2,603	3,803																																																																																																																																																																																																																				
3,81	1,715	2,624	3,840																																																																																																																																																																																																																				
4,12	1,707	2,642	3,868																																																																																																																																																																																																																				
4,37	1,698	2,657	3,889																																																																																																																																																																																																																				
4,68	1,687	2,679	3,921																																																																																																																																																																																																																				
4,99	1,679	2,695	3,943																																																																																																																																																																																																																				
5,51	1,662	2,723	3,979																																																																																																																																																																																																																				
6,02	1,648	2,748	4,009																																																																																																																																																																																																																				
6,49	1,634	2,768	4,028																																																																																																																																																																																																																				
7,00	1,620	2,786	4,039																																																																																																																																																																																																																				
7,98	1,595	2,820	4,068																																																																																																																																																																																																																				
9,01	1,569	2,855	4,097																																																																																																																																																																																																																				
9,98	1,550	2,878	4,105																																																																																																																																																																																																																				
11,01	1,530	2,897	4,105																																																																																																																																																																																																																				
11,99	1,511	2,917	4,107																																																																																																																																																																																																																				
13,02	1,497	2,932	4,109																																																																																																																																																																																																																				
14,00	1,480	2,947	4,104																																																																																																																																																																																																																				
14,98	1,468	2,958	4,102																																																																																																																																																																																																																				
16,00	1,454	2,969	4,092																																																																																																																																																																																																																				
16,98	1,443	2,973	4,072																																																																																																																																																																																																																				
18,01	1,429	2,983	4,060																																																																																																																																																																																																																				
18,99	1,418	2,991	4,050																																																																																																																																																																																																																				
20,02	1,407	2,998	4,036																																																																																																																																																																																																																				
21,00	1,396	3,005	4,024																																																																																																																																																																																																																				
21,98	1,387	3,005	4,000																																																																																																																																																																																																																				
22,67	1,376	3,012	3,987																																																																																																																																																																																																																				
$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$ $q = \sigma_1 - \sigma_3$ Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial Δ Presión de Poros v/s Deformación Axial Trayectoria de Tensiones Efectivas Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla ni tampoco un abultamiento excesivo. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																							
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																			

Tabla E-10: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																												
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																												
Fecha realización:		28-01-2016																																																																																																																																																																																																																	
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																	
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																													
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																													
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																													
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																													
					LP	-																																																																																																																																																																																																													
					IP	NP																																																																																																																																																																																																													
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																													
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,26																																																																																																																																																																																																													
	Altura promedio probeta	[cm]	10,02	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,074																																																																																																																																																																																																													
	Masa húmeda probeta	[g]	405,05	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,886																																																																																																																																																																																																													
	Humedad promedio probeta	[%]	10,0	Relación de vacíos	-	0,491																																																																																																																																																																																																													
				Saturación	[%]	57,13																																																																																																																																																																																																													
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,98	Área probeta	[cm²]	19,50																																																																																																																																																																																																													
	Altura probeta	[cm]	9,98	Volumen probeta	[cm³]	194,66																																																																																																																																																																																																													
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,219																																																																																																																																																																																																													
	Humedad probeta	[%]	17,3	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,892																																																																																																																																																																																																													
				Relación de vacíos	-	0,486																																																																																																																																																																																																													
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	8,00																																																																																																																																																																																																													
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	11,085																																																																																																																																																																																																													
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,590	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	3,584																																																																																																																																																																																																													
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	14,669																																																																																																																																																																																																													
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,149</td><td>0,977</td><td>0,318</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,249</td><td>0,940</td><td>0,508</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,319</td><td>0,918</td><td>0,655</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,370</td><td>0,909</td><td>0,778</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,409</td><td>0,909</td><td>0,896</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,437</td><td>0,916</td><td>0,999</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,460</td><td>0,931</td><td>1,112</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,476</td><td>0,950</td><td>1,220</td></tr><tr><td>0,46</td><td>0,488</td><td>0,975</td><td>1,328</td></tr><tr><td>0,51</td><td>0,496</td><td>1,006</td><td>1,446</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,504</td><td>1,077</td><td>1,685</td></tr><tr><td>0,72</td><td>0,499</td><td>1,167</td><td>1,938</td></tr><tr><td>0,82</td><td>0,482</td><td>1,274</td><td>2,209</td></tr><tr><td>0,92</td><td>0,460</td><td>1,395</td><td>2,503</td></tr><tr><td>0,97</td><td>0,443</td><td>1,463</td><td>2,657</td></tr><tr><td>1,18</td><td>0,362</td><td>1,755</td><td>3,290</td></tr><tr><td>1,38</td><td>0,252</td><td>2,091</td><td>3,972</td></tr><tr><td>1,59</td><td>0,123</td><td>2,450</td><td>4,660</td></tr><tr><td>1,80</td><td>-0,025</td><td>2,824</td><td>5,336</td></tr><tr><td>2,00</td><td>-0,177</td><td>3,184</td><td>5,963</td></tr><tr><td>2,31</td><td>-0,412</td><td>3,699</td><td>6,802</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-0,642</td><td>4,161</td><td>7,498</td></tr><tr><td>2,92</td><td>-0,858</td><td>4,576</td><td>8,096</td></tr><tr><td>3,18</td><td>-1,023</td><td>4,875</td><td>8,497</td></tr><tr><td>3,49</td><td>-1,211</td><td>5,199</td><td>8,905</td></tr><tr><td>3,79</td><td>-1,379</td><td>5,485</td><td>9,260</td></tr><tr><td>4,10</td><td>-1,533</td><td>5,740</td><td>9,562</td></tr><tr><td>4,41</td><td>-1,676</td><td>5,972</td><td>9,831</td></tr><tr><td>4,72</td><td>-1,802</td><td>6,172</td><td>10,051</td></tr><tr><td>5,03</td><td>-1,920</td><td>6,354</td><td>10,244</td></tr><tr><td>5,49</td><td>-2,077</td><td>6,596</td><td>10,498</td></tr><tr><td>6,00</td><td>-2,231</td><td>6,826</td><td>10,725</td></tr><tr><td>6,51</td><td>-2,362</td><td>7,016</td><td>10,900</td></tr><tr><td>7,02</td><td>-2,472</td><td>7,174</td><td>11,047</td></tr><tr><td>8,00</td><td>-2,564</td><td>7,279</td><td>11,085</td></tr><tr><td>9,02</td><td>-2,573</td><td>7,249</td><td>10,970</td></tr><tr><td>10,00</td><td>-2,587</td><td>7,223</td><td>10,849</td></tr><tr><td>11,02</td><td>-2,609</td><td>7,205</td><td>10,730</td></tr><tr><td>12,00</td><td>-2,629</td><td>7,192</td><td>10,630</td></tr><tr><td>13,02</td><td>-2,651</td><td>7,188</td><td>10,551</td></tr><tr><td>14,00</td><td>-2,668</td><td>7,174</td><td>10,458</td></tr><tr><td>15,02</td><td>-2,682</td><td>7,114</td><td>10,236</td></tr><tr><td>16,00</td><td>-2,696</td><td>7,083</td><td>10,103</td></tr><tr><td>17,02</td><td>-2,702</td><td>7,044</td><td>9,967</td></tr><tr><td>17,99</td><td>-2,707</td><td>7,002</td><td>9,827</td></tr><tr><td>19,02</td><td>-2,713</td><td>6,964</td><td>9,696</td></tr><tr><td>19,99</td><td>-2,718</td><td>6,941</td><td>9,609</td></tr><tr><td>21,02</td><td>-2,721</td><td>6,910</td><td>9,508</td></tr><tr><td>22,00</td><td>-2,724</td><td>6,878</td><td>9,404</td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	1,020	0,000	0,05	0,149	0,977	0,318	0,10	0,249	0,940	0,508	0,15	0,319	0,918	0,655	0,21	0,370	0,909	0,778	0,26	0,409	0,909	0,896	0,31	0,437	0,916	0,999	0,36	0,460	0,931	1,112	0,41	0,476	0,950	1,220	0,46	0,488	0,975	1,328	0,51	0,496	1,006	1,446	0,62	0,504	1,077	1,685	0,72	0,499	1,167	1,938	0,82	0,482	1,274	2,209	0,92	0,460	1,395	2,503	0,97	0,443	1,463	2,657	1,18	0,362	1,755	3,290	1,38	0,252	2,091	3,972	1,59	0,123	2,450	4,660	1,80	-0,025	2,824	5,336	2,00	-0,177	3,184	5,963	2,31	-0,412	3,699	6,802	2,61	-0,642	4,161	7,498	2,92	-0,858	4,576	8,096	3,18	-1,023	4,875	8,497	3,49	-1,211	5,199	8,905	3,79	-1,379	5,485	9,260	4,10	-1,533	5,740	9,562	4,41	-1,676	5,972	9,831	4,72	-1,802	6,172	10,051	5,03	-1,920	6,354	10,244	5,49	-2,077	6,596	10,498	6,00	-2,231	6,826	10,725	6,51	-2,362	7,016	10,900	7,02	-2,472	7,174	11,047	8,00	-2,564	7,279	11,085	9,02	-2,573	7,249	10,970	10,00	-2,587	7,223	10,849	11,02	-2,609	7,205	10,730	12,00	-2,629	7,192	10,630	13,02	-2,651	7,188	10,551	14,00	-2,668	7,174	10,458	15,02	-2,682	7,114	10,236	16,00	-2,696	7,083	10,103	17,02	-2,702	7,044	9,967	17,99	-2,707	7,002	9,827	19,02	-2,713	6,964	9,696	19,99	-2,718	6,941	9,609	21,02	-2,721	6,910	9,508	22,00	-2,724	6,878	9,404
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																
0,00	0,000	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																
0,05	0,149	0,977	0,318																																																																																																																																																																																																																
0,10	0,249	0,940	0,508																																																																																																																																																																																																																
0,15	0,319	0,918	0,655																																																																																																																																																																																																																
0,21	0,370	0,909	0,778																																																																																																																																																																																																																
0,26	0,409	0,909	0,896																																																																																																																																																																																																																
0,31	0,437	0,916	0,999																																																																																																																																																																																																																
0,36	0,460	0,931	1,112																																																																																																																																																																																																																
0,41	0,476	0,950	1,220																																																																																																																																																																																																																
0,46	0,488	0,975	1,328																																																																																																																																																																																																																
0,51	0,496	1,006	1,446																																																																																																																																																																																																																
0,62	0,504	1,077	1,685																																																																																																																																																																																																																
0,72	0,499	1,167	1,938																																																																																																																																																																																																																
0,82	0,482	1,274	2,209																																																																																																																																																																																																																
0,92	0,460	1,395	2,503																																																																																																																																																																																																																
0,97	0,443	1,463	2,657																																																																																																																																																																																																																
1,18	0,362	1,755	3,290																																																																																																																																																																																																																
1,38	0,252	2,091	3,972																																																																																																																																																																																																																
1,59	0,123	2,450	4,660																																																																																																																																																																																																																
1,80	-0,025	2,824	5,336																																																																																																																																																																																																																
2,00	-0,177	3,184	5,963																																																																																																																																																																																																																
2,31	-0,412	3,699	6,802																																																																																																																																																																																																																
2,61	-0,642	4,161	7,498																																																																																																																																																																																																																
2,92	-0,858	4,576	8,096																																																																																																																																																																																																																
3,18	-1,023	4,875	8,497																																																																																																																																																																																																																
3,49	-1,211	5,199	8,905																																																																																																																																																																																																																
3,79	-1,379	5,485	9,260																																																																																																																																																																																																																
4,10	-1,533	5,740	9,562																																																																																																																																																																																																																
4,41	-1,676	5,972	9,831																																																																																																																																																																																																																
4,72	-1,802	6,172	10,051																																																																																																																																																																																																																
5,03	-1,920	6,354	10,244																																																																																																																																																																																																																
5,49	-2,077	6,596	10,498																																																																																																																																																																																																																
6,00	-2,231	6,826	10,725																																																																																																																																																																																																																
6,51	-2,362	7,016	10,900																																																																																																																																																																																																																
7,02	-2,472	7,174	11,047																																																																																																																																																																																																																
8,00	-2,564	7,279	11,085																																																																																																																																																																																																																
9,02	-2,573	7,249	10,970																																																																																																																																																																																																																
10,00	-2,587	7,223	10,849																																																																																																																																																																																																																
11,02	-2,609	7,205	10,730																																																																																																																																																																																																																
12,00	-2,629	7,192	10,630																																																																																																																																																																																																																
13,02	-2,651	7,188	10,551																																																																																																																																																																																																																
14,00	-2,668	7,174	10,458																																																																																																																																																																																																																
15,02	-2,682	7,114	10,236																																																																																																																																																																																																																
16,00	-2,696	7,083	10,103																																																																																																																																																																																																																
17,02	-2,702	7,044	9,967																																																																																																																																																																																																																
17,99	-2,707	7,002	9,827																																																																																																																																																																																																																
19,02	-2,713	6,964	9,696																																																																																																																																																																																																																
19,99	-2,718	6,941	9,609																																																																																																																																																																																																																
21,02	-2,721	6,910	9,508																																																																																																																																																																																																																
22,00	-2,724	6,878	9,404																																																																																																																																																																																																																
$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$ $q = \sigma_1 - \sigma_3$ Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial Δ Presión de Poros v/s Deformación Axial Trayectoria de Tensiones Efectivas Descripción de la falla																																																																																																																																																																																																																			
Falla por corte. Se visualiza claramente el plano de falla y el abultamiento es mínimo. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte.																																																																																																																																																																																																																			
Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																			
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																															

Tabla E-11: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						N° OT:	-																																																																																																																																																																																																				
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																				
Fecha realización:		25-01-2016																																																																																																																																																																																																									
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																									
SPT N°:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																						
Probeta N°:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																						
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																						
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																						
				LP	-																																																																																																																																																																																																						
				IP	NP																																																																																																																																																																																																						
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																					
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,82																																																																																																																																																																																																					
	Altura promedio probeta	[cm]	10,05	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,067																																																																																																																																																																																																					
	Masa húmeda probeta	[g]	404,79	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,875																																																																																																																																																																																																					
	Humedad promedio probeta	[%]	10,3	Relación de vacíos	-	0,500																																																																																																																																																																																																					
				Saturación	[%]	57,71																																																																																																																																																																																																					
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,99	Área probeta	[cm²]	19,56																																																																																																																																																																																																					
	Altura probeta	[cm]	9,96	Volumen probeta	[cm³]	194,68																																																																																																																																																																																																					
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,213																																																																																																																																																																																																					
	Humedad probeta	[%]	17,6	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,883																																																																																																																																																																																																					
				Relación de vacíos	-	0,494																																																																																																																																																																																																					
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	11,00																																																																																																																																																																																																					
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	12,208																																																																																																																																																																																																					
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,549	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	4,354																																																																																																																																																																																																					
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	16,562																																																																																																																																																																																																					
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,129</td><td>2,032</td><td>0,365</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,291</td><td>1,980</td><td>0,696</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,426</td><td>1,938</td><td>0,975</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,535</td><td>1,911</td><td>1,220</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,622</td><td>1,895</td><td>1,432</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,695</td><td>1,892</td><td>1,644</td></tr><tr><td>0,36</td><td>0,748</td><td>1,902</td><td>1,832</td></tr><tr><td>0,41</td><td>0,793</td><td>1,920</td><td>2,020</td></tr><tr><td>0,46</td><td>0,827</td><td>1,947</td><td>2,202</td></tr><tr><td>0,52</td><td>0,855</td><td>1,981</td><td>2,390</td></tr><tr><td>0,62</td><td>0,883</td><td>2,076</td><td>2,759</td></tr><tr><td>0,72</td><td>0,891</td><td>2,199</td><td>3,151</td></tr><tr><td>0,82</td><td>0,880</td><td>2,339</td><td>3,538</td></tr><tr><td>0,88</td><td>0,872</td><td>2,414</td><td>3,738</td></tr><tr><td>0,98</td><td>0,838</td><td>2,578</td><td>4,128</td></tr><tr><td>1,18</td><td>0,740</td><td>2,946</td><td>4,939</td></tr><tr><td>1,39</td><td>0,611</td><td>3,331</td><td>5,709</td></tr><tr><td>1,59</td><td>0,465</td><td>3,714</td><td>6,420</td></tr><tr><td>1,80</td><td>0,314</td><td>4,086</td><td>7,081</td></tr><tr><td>2,00</td><td>0,160</td><td>4,434</td><td>7,664</td></tr><tr><td>2,31</td><td>-0,064</td><td>4,902</td><td>8,394</td></tr><tr><td>2,62</td><td>-0,269</td><td>5,310</td><td>9,004</td></tr><tr><td>2,88</td><td>-0,423</td><td>5,598</td><td>9,407</td></tr><tr><td>3,19</td><td>-0,600</td><td>5,918</td><td>9,835</td></tr><tr><td>3,50</td><td>-0,754</td><td>6,191</td><td>10,192</td></tr><tr><td>3,80</td><td>-0,900</td><td>6,433</td><td>10,482</td></tr><tr><td>4,11</td><td>-1,031</td><td>6,647</td><td>10,729</td></tr><tr><td>4,42</td><td>-1,149</td><td>6,835</td><td>10,938</td></tr><tr><td>4,68</td><td>-1,241</td><td>6,977</td><td>11,089</td></tr><tr><td>4,99</td><td>-1,342</td><td>7,132</td><td>11,250</td></tr><tr><td>5,50</td><td>-1,494</td><td>7,359</td><td>11,479</td></tr><tr><td>6,01</td><td>-1,625</td><td>7,554</td><td>11,668</td></tr><tr><td>6,48</td><td>-1,726</td><td>7,695</td><td>11,787</td></tr><tr><td>6,99</td><td>-1,830</td><td>7,835</td><td>11,896</td></tr><tr><td>8,02</td><td>-1,998</td><td>8,052</td><td>12,044</td></tr><tr><td>9,00</td><td>-2,124</td><td>8,206</td><td>12,128</td></tr><tr><td>10,02</td><td>-2,234</td><td>8,336</td><td>12,188</td></tr><tr><td>11,00</td><td>-2,315</td><td>8,424</td><td>12,208</td></tr><tr><td>11,98</td><td>-2,385</td><td>8,492</td><td>12,204</td></tr><tr><td>13,01</td><td>-2,441</td><td>8,541</td><td>12,181</td></tr><tr><td>13,98</td><td>-2,489</td><td>8,577</td><td>12,146</td></tr><tr><td>15,01</td><td>-2,531</td><td>8,605</td><td>12,106</td></tr><tr><td>15,99</td><td>-2,564</td><td>8,624</td><td>12,062</td></tr><tr><td>17,01</td><td>-2,589</td><td>8,631</td><td>12,005</td></tr><tr><td>17,99</td><td>-2,603</td><td>8,622</td><td>11,937</td></tr><tr><td>19,02</td><td>-2,612</td><td>8,607</td><td>11,868</td></tr><tr><td>19,95</td><td>-2,618</td><td>8,600</td><td>11,830</td></tr></tbody></table> Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial Δ Presión de Poros v/s Deformación Axial Trayectoria de Tensiones Efectivas $p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ Descripción de la falla Falla por deformación. No se visualiza el plano de falla y el abultamiento es moderado. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	2,039	0,000	0,05	0,129	2,032	0,365	0,10	0,291	1,980	0,696	0,15	0,426	1,938	0,975	0,21	0,535	1,911	1,220	0,26	0,622	1,895	1,432	0,31	0,695	1,892	1,644	0,36	0,748	1,902	1,832	0,41	0,793	1,920	2,020	0,46	0,827	1,947	2,202	0,52	0,855	1,981	2,390	0,62	0,883	2,076	2,759	0,72	0,891	2,199	3,151	0,82	0,880	2,339	3,538	0,88	0,872	2,414	3,738	0,98	0,838	2,578	4,128	1,18	0,740	2,946	4,939	1,39	0,611	3,331	5,709	1,59	0,465	3,714	6,420	1,80	0,314	4,086	7,081	2,00	0,160	4,434	7,664	2,31	-0,064	4,902	8,394	2,62	-0,269	5,310	9,004	2,88	-0,423	5,598	9,407	3,19	-0,600	5,918	9,835	3,50	-0,754	6,191	10,192	3,80	-0,900	6,433	10,482	4,11	-1,031	6,647	10,729	4,42	-1,149	6,835	10,938	4,68	-1,241	6,977	11,089	4,99	-1,342	7,132	11,250	5,50	-1,494	7,359	11,479	6,01	-1,625	7,554	11,668	6,48	-1,726	7,695	11,787	6,99	-1,830	7,835	11,896	8,02	-1,998	8,052	12,044	9,00	-2,124	8,206	12,128	10,02	-2,234	8,336	12,188	11,00	-2,315	8,424	12,208	11,98	-2,385	8,492	12,204	13,01	-2,441	8,541	12,181	13,98	-2,489	8,577	12,146	15,01	-2,531	8,605	12,106	15,99	-2,564	8,624	12,062	17,01	-2,589	8,631	12,005	17,99	-2,603	8,622	11,937	19,02	-2,612	8,607	11,868	19,95	-2,618	8,600	11,830
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																								
0,00	0,000	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																								
0,05	0,129	2,032	0,365																																																																																																																																																																																																								
0,10	0,291	1,980	0,696																																																																																																																																																																																																								
0,15	0,426	1,938	0,975																																																																																																																																																																																																								
0,21	0,535	1,911	1,220																																																																																																																																																																																																								
0,26	0,622	1,895	1,432																																																																																																																																																																																																								
0,31	0,695	1,892	1,644																																																																																																																																																																																																								
0,36	0,748	1,902	1,832																																																																																																																																																																																																								
0,41	0,793	1,920	2,020																																																																																																																																																																																																								
0,46	0,827	1,947	2,202																																																																																																																																																																																																								
0,52	0,855	1,981	2,390																																																																																																																																																																																																								
0,62	0,883	2,076	2,759																																																																																																																																																																																																								
0,72	0,891	2,199	3,151																																																																																																																																																																																																								
0,82	0,880	2,339	3,538																																																																																																																																																																																																								
0,88	0,872	2,414	3,738																																																																																																																																																																																																								
0,98	0,838	2,578	4,128																																																																																																																																																																																																								
1,18	0,740	2,946	4,939																																																																																																																																																																																																								
1,39	0,611	3,331	5,709																																																																																																																																																																																																								
1,59	0,465	3,714	6,420																																																																																																																																																																																																								
1,80	0,314	4,086	7,081																																																																																																																																																																																																								
2,00	0,160	4,434	7,664																																																																																																																																																																																																								
2,31	-0,064	4,902	8,394																																																																																																																																																																																																								
2,62	-0,269	5,310	9,004																																																																																																																																																																																																								
2,88	-0,423	5,598	9,407																																																																																																																																																																																																								
3,19	-0,600	5,918	9,835																																																																																																																																																																																																								
3,50	-0,754	6,191	10,192																																																																																																																																																																																																								
3,80	-0,900	6,433	10,482																																																																																																																																																																																																								
4,11	-1,031	6,647	10,729																																																																																																																																																																																																								
4,42	-1,149	6,835	10,938																																																																																																																																																																																																								
4,68	-1,241	6,977	11,089																																																																																																																																																																																																								
4,99	-1,342	7,132	11,250																																																																																																																																																																																																								
5,50	-1,494	7,359	11,479																																																																																																																																																																																																								
6,01	-1,625	7,554	11,668																																																																																																																																																																																																								
6,48	-1,726	7,695	11,787																																																																																																																																																																																																								
6,99	-1,830	7,835	11,896																																																																																																																																																																																																								
8,02	-1,998	8,052	12,044																																																																																																																																																																																																								
9,00	-2,124	8,206	12,128																																																																																																																																																																																																								
10,02	-2,234	8,336	12,188																																																																																																																																																																																																								
11,00	-2,315	8,424	12,208																																																																																																																																																																																																								
11,98	-2,385	8,492	12,204																																																																																																																																																																																																								
13,01	-2,441	8,541	12,181																																																																																																																																																																																																								
13,98	-2,489	8,577	12,146																																																																																																																																																																																																								
15,01	-2,531	8,605	12,106																																																																																																																																																																																																								
15,99	-2,564	8,624	12,062																																																																																																																																																																																																								
17,01	-2,589	8,631	12,005																																																																																																																																																																																																								
17,99	-2,603	8,622	11,937																																																																																																																																																																																																								
19,02	-2,612	8,607	11,868																																																																																																																																																																																																								
19,95	-2,618	8,600	11,830																																																																																																																																																																																																								
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																							

Tabla E-12: Ficha de ensayo de compresión triaxial CIU – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - No drenado (CIU), según ASTM D 4767-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																
Fecha realización:		26-01-2016																																																																																																																																																																																																																					
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																					
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																		
Probeta Nº:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																		
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																		
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																		
				LP	-																																																																																																																																																																																																																		
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																		
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																	
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	193,37																																																																																																																																																																																																																	
	Altura promedio probeta	[cm]	10,03	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,075																																																																																																																																																																																																																	
	Masa húmeda probeta	[g]	405,46	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,887																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad promedio probeta	[%]	10,0	Relación de vacíos	-	0,490																																																																																																																																																																																																																	
				Saturación	[%]	57,21																																																																																																																																																																																																																	
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,97	Área probeta	[cm²]	19,40																																																																																																																																																																																																																	
	Altura probeta	[cm]	9,95	Volumen probeta	[cm³]	193,07																																																																																																																																																																																																																	
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,229																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad probeta	[%]	16,9	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,908																																																																																																																																																																																																																	
					Relación de vacíos	-	0,474																																																																																																																																																																																																																
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	13,01																																																																																																																																																																																																																	
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,130	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	14,188																																																																																																																																																																																																																	
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,570	Esfuerzo principal menor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	5,245																																																																																																																																																																																																																	
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor efectivo en la falla	[kgf/cm²]	19,433																																																																																																																																																																																																																	
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Presión de Poros [kgf/cm²]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,070</td><td>3,057</td><td>0,205</td></tr><tr><td>0,10</td><td>0,249</td><td>3,015</td><td>0,615</td></tr><tr><td>0,15</td><td>0,476</td><td>2,934</td><td>1,054</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,681</td><td>2,860</td><td>1,444</td></tr><tr><td>0,26</td><td>0,846</td><td>2,807</td><td>1,782</td></tr><tr><td>0,31</td><td>0,981</td><td>2,775</td><td>2,090</td></tr><tr><td>0,36</td><td>1,087</td><td>2,762</td><td>2,370</td></tr><tr><td>0,41</td><td>1,174</td><td>2,765</td><td>2,640</td></tr><tr><td>0,46</td><td>1,241</td><td>2,783</td><td>2,895</td></tr><tr><td>0,51</td><td>1,298</td><td>2,810</td><td>3,145</td></tr><tr><td>0,62</td><td>1,370</td><td>2,902</td><td>3,641</td></tr><tr><td>0,72</td><td>1,404</td><td>3,029</td><td>4,120</td></tr><tr><td>0,82</td><td>1,410</td><td>3,179</td><td>4,590</td></tr><tr><td>0,92</td><td>1,393</td><td>3,352</td><td>5,058</td></tr><tr><td>0,98</td><td>1,376</td><td>3,447</td><td>5,292</td></tr><tr><td>1,18</td><td>1,275</td><td>3,854</td><td>6,210</td></tr><tr><td>1,39</td><td>1,135</td><td>4,276</td><td>7,054</td></tr><tr><td>1,59</td><td>0,975</td><td>4,698</td><td>7,843</td></tr><tr><td>1,80</td><td>0,813</td><td>5,088</td><td>8,525</td></tr><tr><td>2,01</td><td>0,653</td><td>5,446</td><td>9,120</td></tr><tr><td>2,31</td><td>0,423</td><td>5,921</td><td>9,856</td></tr><tr><td>2,62</td><td>0,216</td><td>6,332</td><td>10,466</td></tr><tr><td>2,88</td><td>0,056</td><td>6,628</td><td>10,873</td></tr><tr><td>3,19</td><td>-0,118</td><td>6,945</td><td>11,305</td></tr><tr><td>3,50</td><td>-0,277</td><td>7,222</td><td>11,655</td></tr><tr><td>3,80</td><td>-0,426</td><td>7,472</td><td>11,962</td></tr><tr><td>4,11</td><td>-0,558</td><td>7,693</td><td>12,229</td></tr><tr><td>4,42</td><td>-0,681</td><td>7,896</td><td>12,467</td></tr><tr><td>4,68</td><td>-0,773</td><td>8,042</td><td>12,629</td></tr><tr><td>4,99</td><td>-0,880</td><td>8,212</td><td>12,818</td></tr><tr><td>5,50</td><td>-1,037</td><td>8,458</td><td>13,086</td></tr><tr><td>6,02</td><td>-1,180</td><td>8,668</td><td>13,286</td></tr><tr><td>6,48</td><td>-1,295</td><td>8,839</td><td>13,456</td></tr><tr><td>6,99</td><td>-1,410</td><td>9,006</td><td>13,611</td></tr><tr><td>8,02</td><td>-1,606</td><td>9,276</td><td>13,835</td></tr><tr><td>9,00</td><td>-1,766</td><td>9,477</td><td>13,958</td></tr><tr><td>9,98</td><td>-1,894</td><td>9,644</td><td>14,071</td></tr><tr><td>11,01</td><td>-2,012</td><td>9,783</td><td>14,136</td></tr><tr><td>11,98</td><td>-2,105</td><td>9,890</td><td>14,179</td></tr><tr><td>13,01</td><td>-2,186</td><td>9,974</td><td>14,188</td></tr><tr><td>13,99</td><td>-2,248</td><td>10,034</td><td>14,181</td></tr><tr><td>15,02</td><td>-2,309</td><td>10,089</td><td>14,161</td></tr><tr><td>15,99</td><td>-2,360</td><td>10,134</td><td>14,147</td></tr><tr><td>17,02</td><td>-2,407</td><td>10,174</td><td>14,124</td></tr><tr><td>18,00</td><td>-2,447</td><td>10,205</td><td>14,099</td></tr><tr><td>18,98</td><td>-2,477</td><td>10,221</td><td>14,054</td></tr><tr><td>20,01</td><td>-2,517</td><td>10,252</td><td>14,028</td></tr><tr><td>20,98</td><td>-2,550</td><td>10,276</td><td>14,000</td></tr><tr><td>22,01</td><td>-2,581</td><td>10,292</td><td>13,955</td></tr><tr><td>23,12</td><td>-2,615</td><td>10,304</td><td>13,891</td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,000	3,059	0,000	0,05	0,070	3,057	0,205	0,10	0,249	3,015	0,615	0,15	0,476	2,934	1,054	0,21	0,681	2,860	1,444	0,26	0,846	2,807	1,782	0,31	0,981	2,775	2,090	0,36	1,087	2,762	2,370	0,41	1,174	2,765	2,640	0,46	1,241	2,783	2,895	0,51	1,298	2,810	3,145	0,62	1,370	2,902	3,641	0,72	1,404	3,029	4,120	0,82	1,410	3,179	4,590	0,92	1,393	3,352	5,058	0,98	1,376	3,447	5,292	1,18	1,275	3,854	6,210	1,39	1,135	4,276	7,054	1,59	0,975	4,698	7,843	1,80	0,813	5,088	8,525	2,01	0,653	5,446	9,120	2,31	0,423	5,921	9,856	2,62	0,216	6,332	10,466	2,88	0,056	6,628	10,873	3,19	-0,118	6,945	11,305	3,50	-0,277	7,222	11,655	3,80	-0,426	7,472	11,962	4,11	-0,558	7,693	12,229	4,42	-0,681	7,896	12,467	4,68	-0,773	8,042	12,629	4,99	-0,880	8,212	12,818	5,50	-1,037	8,458	13,086	6,02	-1,180	8,668	13,286	6,48	-1,295	8,839	13,456	6,99	-1,410	9,006	13,611	8,02	-1,606	9,276	13,835	9,00	-1,766	9,477	13,958	9,98	-1,894	9,644	14,071	11,01	-2,012	9,783	14,136	11,98	-2,105	9,890	14,179	13,01	-2,186	9,974	14,188	13,99	-2,248	10,034	14,181	15,02	-2,309	10,089	14,161	15,99	-2,360	10,134	14,147	17,02	-2,407	10,174	14,124	18,00	-2,447	10,205	14,099	18,98	-2,477	10,221	14,054	20,01	-2,517	10,252	14,028	20,98	-2,550	10,276	14,000	22,01	-2,581	10,292	13,955	23,12	-2,615	10,304	13,891
Def. Axial [%]	Δ Presión de Poros [kgf/cm²]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																				
0,00	0,000	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																				
0,05	0,070	3,057	0,205																																																																																																																																																																																																																				
0,10	0,249	3,015	0,615																																																																																																																																																																																																																				
0,15	0,476	2,934	1,054																																																																																																																																																																																																																				
0,21	0,681	2,860	1,444																																																																																																																																																																																																																				
0,26	0,846	2,807	1,782																																																																																																																																																																																																																				
0,31	0,981	2,775	2,090																																																																																																																																																																																																																				
0,36	1,087	2,762	2,370																																																																																																																																																																																																																				
0,41	1,174	2,765	2,640																																																																																																																																																																																																																				
0,46	1,241	2,783	2,895																																																																																																																																																																																																																				
0,51	1,298	2,810	3,145																																																																																																																																																																																																																				
0,62	1,370	2,902	3,641																																																																																																																																																																																																																				
0,72	1,404	3,029	4,120																																																																																																																																																																																																																				
0,82	1,410	3,179	4,590																																																																																																																																																																																																																				
0,92	1,393	3,352	5,058																																																																																																																																																																																																																				
0,98	1,376	3,447	5,292																																																																																																																																																																																																																				
1,18	1,275	3,854	6,210																																																																																																																																																																																																																				
1,39	1,135	4,276	7,054																																																																																																																																																																																																																				
1,59	0,975	4,698	7,843																																																																																																																																																																																																																				
1,80	0,813	5,088	8,525																																																																																																																																																																																																																				
2,01	0,653	5,446	9,120																																																																																																																																																																																																																				
2,31	0,423	5,921	9,856																																																																																																																																																																																																																				
2,62	0,216	6,332	10,466																																																																																																																																																																																																																				
2,88	0,056	6,628	10,873																																																																																																																																																																																																																				
3,19	-0,118	6,945	11,305																																																																																																																																																																																																																				
3,50	-0,277	7,222	11,655																																																																																																																																																																																																																				
3,80	-0,426	7,472	11,962																																																																																																																																																																																																																				
4,11	-0,558	7,693	12,229																																																																																																																																																																																																																				
4,42	-0,681	7,896	12,467																																																																																																																																																																																																																				
4,68	-0,773	8,042	12,629																																																																																																																																																																																																																				
4,99	-0,880	8,212	12,818																																																																																																																																																																																																																				
5,50	-1,037	8,458	13,086																																																																																																																																																																																																																				
6,02	-1,180	8,668	13,286																																																																																																																																																																																																																				
6,48	-1,295	8,839	13,456																																																																																																																																																																																																																				
6,99	-1,410	9,006	13,611																																																																																																																																																																																																																				
8,02	-1,606	9,276	13,835																																																																																																																																																																																																																				
9,00	-1,766	9,477	13,958																																																																																																																																																																																																																				
9,98	-1,894	9,644	14,071																																																																																																																																																																																																																				
11,01	-2,012	9,783	14,136																																																																																																																																																																																																																				
11,98	-2,105	9,890	14,179																																																																																																																																																																																																																				
13,01	-2,186	9,974	14,188																																																																																																																																																																																																																				
13,99	-2,248	10,034	14,181																																																																																																																																																																																																																				
15,02	-2,309	10,089	14,161																																																																																																																																																																																																																				
15,99	-2,360	10,134	14,147																																																																																																																																																																																																																				
17,02	-2,407	10,174	14,124																																																																																																																																																																																																																				
18,00	-2,447	10,205	14,099																																																																																																																																																																																																																				
18,98	-2,477	10,221	14,054																																																																																																																																																																																																																				
20,01	-2,517	10,252	14,028																																																																																																																																																																																																																				
20,98	-2,550	10,276	14,000																																																																																																																																																																																																																				
22,01	-2,581	10,292	13,955																																																																																																																																																																																																																				
23,12	-2,615	10,304	13,891																																																																																																																																																																																																																				
$p' = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$q = \sigma_1 - \sigma_3$																																																																																																																																																																																																																							
Descripción de la falla Falla por corte con visible abultamiento. Se visualiza levemente en plano de falla y el abultamiento no es menor. La probeta fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																							
REG-FE-55		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																			

Tabla F-1: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400$ [g/cm³] – Arena Limosa (1/3).

188

Tabla F-2: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Fecha realización:		22-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
SPT N°:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Probeta N°:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	194,76																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Altura promedio probeta	[cm]	10,00	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,537																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Masa húmeda probeta	[g]	299,29	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,402																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Humedad promedio probeta	[%]	9,6	Relación de vacíos		1,005																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
				Saturación	[%]	26,82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,78	Área probeta	[cm²]	17,98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Altura probeta	[cm]	9,69	Volumen probeta	[cm³]	174,15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,012																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Humedad probeta	[%]	28,1	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,571																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
				Relación de vacíos	-	0,790																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Finales	Humedad probeta	[%]	23,1	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,098																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Relación de vacíos	-	0,650	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,704																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	20,02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	5,690																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,060	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	2,039																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	7,729																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>2,099</td><td>0,180</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,09</td><td>2,141</td><td>0,304</td></tr><tr><td>0,16</td><td>-0,17</td><td>2,163</td><td>0,371</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,26</td><td>2,182</td><td>0,427</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,34</td><td>2,197</td><td>0,473</td></tr><tr><td>0,32</td><td>-0,43</td><td>2,211</td><td>0,514</td></tr><tr><td>0,37</td><td>-0,51</td><td>2,224</td><td>0,555</td></tr><tr><td>0,42</td><td>-0,60</td><td>2,236</td><td>0,591</td></tr><tr><td>0,47</td><td>-0,69</td><td>2,248</td><td>0,627</td></tr><tr><td>0,53</td><td>-0,77</td><td>2,259</td><td>0,658</td></tr><tr><td>0,58</td><td>-0,89</td><td>2,271</td><td>0,694</td></tr><tr><td>0,69</td><td>-1,06</td><td>2,293</td><td>0,760</td></tr><tr><td>0,79</td><td>-1,23</td><td>2,313</td><td>0,822</td></tr><tr><td>0,90</td><td>-1,40</td><td>2,334</td><td>0,883</td></tr><tr><td>1,00</td><td>-1,57</td><td>2,352</td><td>0,939</td></tr><tr><td>1,21</td><td>-1,91</td><td>2,393</td><td>1,062</td></tr><tr><td>1,43</td><td>-2,23</td><td>2,429</td><td>1,169</td></tr><tr><td>1,58</td><td>-2,46</td><td>2,458</td><td>1,256</td></tr><tr><td>1,80</td><td>-2,80</td><td>2,492</td><td>1,358</td></tr><tr><td>2,01</td><td>-3,11</td><td>2,529</td><td>1,470</td></tr><tr><td>2,32</td><td>-3,54</td><td>2,582</td><td>1,627</td></tr><tr><td>2,59</td><td>-3,91</td><td>2,622</td><td>1,748</td></tr><tr><td>2,90</td><td>-4,34</td><td>2,673</td><td>1,900</td></tr><tr><td>3,22</td><td>-4,77</td><td>2,721</td><td>2,046</td></tr><tr><td>3,49</td><td>-5,08</td><td>2,763</td><td>2,172</td></tr><tr><td>3,80</td><td>-5,48</td><td>2,808</td><td>2,307</td></tr><tr><td>4,12</td><td>-5,85</td><td>2,853</td><td>2,441</td></tr><tr><td>4,38</td><td>-6,17</td><td>2,891</td><td>2,556</td></tr><tr><td>4,70</td><td>-6,54</td><td>2,938</td><td>2,695</td></tr><tr><td>5,02</td><td>-6,88</td><td>2,980</td><td>2,823</td></tr><tr><td>5,49</td><td>-7,37</td><td>3,042</td><td>3,008</td></tr><tr><td>6,02</td><td>-7,88</td><td>3,110</td><td>3,212</td></tr><tr><td>6,50</td><td>-8,34</td><td>3,168</td><td>3,385</td></tr><tr><td>7,03</td><td>-8,83</td><td>3,231</td><td>3,576</td></tr><tr><td>7,98</td><td>-9,60</td><td>3,339</td><td>3,899</td></tr><tr><td>8,98</td><td>-10,31</td><td>3,442</td><td>4,209</td></tr><tr><td>9,98</td><td>-10,94</td><td>3,533</td><td>4,482</td></tr><tr><td>10,99</td><td>-11,51</td><td>3,617</td><td>4,733</td></tr><tr><td>11,99</td><td>-11,97</td><td>3,690</td><td>4,952</td></tr><tr><td>13,00</td><td>-12,37</td><td>3,751</td><td>5,136</td></tr><tr><td>14,00</td><td>-12,68</td><td>3,805</td><td>5,297</td></tr><tr><td>15,00</td><td>-12,97</td><td>3,848</td><td>5,425</td></tr><tr><td>16,01</td><td>-13,17</td><td>3,882</td><td>5,528</td></tr><tr><td>17,01</td><td>-13,34</td><td>3,905</td><td>5,598</td></tr><tr><td>18,01</td><td>-13,45</td><td>3,924</td><td>5,653</td></tr><tr><td>19,02</td><td>-13,54</td><td>3,932</td><td>5,678</td></tr><tr><td>20,02</td><td>-13,59</td><td>3,936</td><td>5,690</td></tr><tr><td>21,29</td><td>-13,62</td><td>3,934</td><td>5,683</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	2,039	0,000	0,05	-0,03	2,099	0,180	0,10	-0,09	2,141	0,304	0,16	-0,17	2,163	0,371	0,21	-0,26	2,182	0,427	0,26	-0,34	2,197	0,473	0,32	-0,43	2,211	0,514	0,37	-0,51	2,224	0,555	0,42	-0,60	2,236	0,591	0,47	-0,69	2,248	0,627	0,53	-0,77	2,259	0,658	0,58	-0,89	2,271	0,694	0,69	-1,06	2,293	0,760	0,79	-1,23	2,313	0,822	0,90	-1,40	2,334	0,883	1,00	-1,57	2,352	0,939	1,21	-1,91	2,393	1,062	1,43	-2,23	2,429	1,169	1,58	-2,46	2,458	1,256	1,80	-2,80	2,492	1,358	2,01	-3,11	2,529	1,470	2,32	-3,54	2,582	1,627	2,59	-3,91	2,622	1,748	2,90	-4,34	2,673	1,900	3,22	-4,77	2,721	2,046	3,49	-5,08	2,763	2,172	3,80	-5,48	2,808	2,307	4,12	-5,85	2,853	2,441	4,38	-6,17	2,891	2,556	4,70	-6,54	2,938	2,695	5,02	-6,88	2,980	2,823	5,49	-7,37	3,042	3,008	6,02	-7,88	3,110	3,212	6,50	-8,34	3,168	3,385	7,03	-8,83	3,231	3,576	7,98	-9,60	3,339	3,899	8,98	-10,31	3,442	4,209	9,98	-10,94	3,533	4,482	10,99	-11,51	3,617	4,733	11,99	-11,97	3,690	4,952	13,00	-12,37	3,751	5,136	14,00	-12,68	3,805	5,297	15,00	-12,97	3,848	5,425	16,01	-13,17	3,882	5,528	17,01	-13,34	3,905	5,598	18,01	-13,45	3,924	5,653	19,02	-13,54	3,932	5,678	20,02	-13,59	3,936	5,690	21,29	-13,62	3,934	5,683																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,00	0,00	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,05	-0,03	2,099	0,180																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,10	-0,09	2,141	0,304																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,16	-0,17	2,163	0,371																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,21	-0,26	2,182	0,427																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,26	-0,34	2,197	0,473																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,32	-0,43	2,211	0,514																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,37	-0,51	2,224	0,555																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,42	-0,60	2,236	0,591																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,47	-0,69	2,248	0,627																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,53	-0,77	2,259	0,658																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,58	-0,89	2,271	0,694																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,69	-1,06	2,293	0,760																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,79	-1,23	2,313	0,822																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
0,90	-1,40	2,334	0,883																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1,00	-1,57	2,352	0,939																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1,21	-1,91	2,393	1,062																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1,43	-2,23	2,429	1,169																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1,58	-2,46	2,458	1,256																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
1,80	-2,80	2,492	1,358																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
2,01	-3,11	2,529	1,470																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
2,32	-3,54	2,582	1,627																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
2,59	-3,91	2,622	1,748																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
2,90	-4,34	2,673	1,900																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
3,22	-4,77	2,721	2,046																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
3,49	-5,08	2,763	2,172																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
3,80	-5,48	2,808	2,307																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
4,12	-5,85	2,853	2,441																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
4,38	-6,17	2,891	2,556																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
4,70	-6,54	2,938	2,695																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
5,02	-6,88	2,980	2,823																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
5,49	-7,37	3,042	3,008																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
6,02	-7,88	3,110	3,212																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
6,50	-8,34	3,168	3,385																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
7,03	-8,83	3,231	3,576																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
7,98	-9,60	3,339	3,899																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
8,98	-10,31	3,442	4,209																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
9,98	-10,94	3,533	4,482																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
10,99	-11,51	3,617	4,733																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
11,99	-11,97	3,690	4,952																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
13,00	-12,37	3,751	5,136																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
14,00	-12,68	3,805	5,297																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
15,00	-12,97	3,848	5,425																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
16,01	-13,17	3,882	5,528																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
17,01	-13,34	3,905	5,598																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
18,01	-13,45	3,924	5,653																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
19,02	-13,54	3,932	5,678																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
20,02	-13,59	3,936	5,690																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
21,29	-13,62	3,934	5,683																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			

Tabla F-3: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 20 [%] – $\rho_s = 1,400 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																
Fecha realización:		23-12-2015																																																																																																																																																																																																																					
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																					
SPT N°:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																		
Probeta N°:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																		
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																		
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																		
				LP	-																																																																																																																																																																																																																		
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																		
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																	
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	194,83																																																																																																																																																																																																																	
	Altura promedio probeta	[cm]	10,00	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,534																																																																																																																																																																																																																	
	Masa húmeda probeta	[g]	298,96	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,395																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad promedio probeta	[%]	10,0	Relación de vacíos		1,016																																																																																																																																																																																																																	
				Saturación	[%]	27,66																																																																																																																																																																																																																	
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,71	Área probeta	[cm²]	17,41																																																																																																																																																																																																																	
	Altura probeta	[cm]	9,61	Volumen probeta	[cm³]	167,38																																																																																																																																																																																																																	
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,049																																																																																																																																																																																																																	
	Humedad probeta	[%]	25,9	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,628																																																																																																																																																																																																																	
				Relación de vacíos		0,727																																																																																																																																																																																																																	
Finales	Humedad probeta	[%]	20,7	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,145																																																																																																																																																																																																																	
	Relación de vacíos	-	0,583	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,777																																																																																																																																																																																																																	
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	20,02																																																																																																																																																																																																																	
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	8,419																																																																																																																																																																																																																	
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,060	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	3,059																																																																																																																																																																																																																	
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	11,478																																																																																																																																																																																																																	
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>3,144</td><td>0,255</td></tr><tr><td>0,11</td><td>-0,11</td><td>3,206</td><td>0,441</td></tr><tr><td>0,16</td><td>-0,17</td><td>3,245</td><td>0,558</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,26</td><td>3,273</td><td>0,643</td></tr><tr><td>0,27</td><td>-0,34</td><td>3,298</td><td>0,717</td></tr><tr><td>0,32</td><td>-0,43</td><td>3,319</td><td>0,781</td></tr><tr><td>0,37</td><td>-0,51</td><td>3,339</td><td>0,839</td></tr><tr><td>0,43</td><td>-0,60</td><td>3,358</td><td>0,898</td></tr><tr><td>0,48</td><td>-0,69</td><td>3,374</td><td>0,945</td></tr><tr><td>0,53</td><td>-0,77</td><td>3,390</td><td>0,993</td></tr><tr><td>0,59</td><td>-0,86</td><td>3,406</td><td>1,041</td></tr><tr><td>0,69</td><td>-1,03</td><td>3,436</td><td>1,131</td></tr><tr><td>0,80</td><td>-1,20</td><td>3,464</td><td>1,216</td></tr><tr><td>0,91</td><td>-1,37</td><td>3,493</td><td>1,300</td></tr><tr><td>1,01</td><td>-1,54</td><td>3,521</td><td>1,385</td></tr><tr><td>1,22</td><td>-1,86</td><td>3,575</td><td>1,549</td></tr><tr><td>1,38</td><td>-2,08</td><td>3,614</td><td>1,665</td></tr><tr><td>1,60</td><td>-2,40</td><td>3,667</td><td>1,823</td></tr><tr><td>1,81</td><td>-2,71</td><td>3,716</td><td>1,970</td></tr><tr><td>2,02</td><td>-3,03</td><td>3,765</td><td>2,118</td></tr><tr><td>2,29</td><td>-3,40</td><td>3,826</td><td>2,302</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-3,83</td><td>3,902</td><td>2,527</td></tr><tr><td>2,88</td><td>-4,17</td><td>3,959</td><td>2,700</td></tr><tr><td>3,19</td><td>-4,60</td><td>4,030</td><td>2,914</td></tr><tr><td>3,51</td><td>-5,00</td><td>4,100</td><td>3,122</td></tr><tr><td>3,78</td><td>-5,31</td><td>4,157</td><td>3,293</td></tr><tr><td>4,10</td><td>-5,71</td><td>4,224</td><td>3,496</td></tr><tr><td>4,42</td><td>-6,05</td><td>4,289</td><td>3,691</td></tr><tr><td>4,68</td><td>-6,37</td><td>4,344</td><td>3,856</td></tr><tr><td>5,00</td><td>-6,71</td><td>4,409</td><td>4,050</td></tr><tr><td>5,48</td><td>-7,23</td><td>4,504</td><td>4,335</td></tr><tr><td>6,02</td><td>-7,77</td><td>4,603</td><td>4,633</td></tr><tr><td>6,49</td><td>-8,23</td><td>4,690</td><td>4,893</td></tr><tr><td>6,97</td><td>-8,65</td><td>4,774</td><td>5,146</td></tr><tr><td>7,99</td><td>-9,48</td><td>4,938</td><td>5,637</td></tr><tr><td>9,00</td><td>-10,22</td><td>5,088</td><td>6,088</td></tr><tr><td>10,01</td><td>-10,91</td><td>5,231</td><td>6,514</td></tr><tr><td>11,02</td><td>-11,48</td><td>5,359</td><td>6,898</td></tr><tr><td>11,98</td><td>-11,94</td><td>5,465</td><td>7,219</td></tr><tr><td>12,99</td><td>-12,37</td><td>5,560</td><td>7,502</td></tr><tr><td>14,00</td><td>-12,74</td><td>5,639</td><td>7,740</td></tr><tr><td>15,01</td><td>-13,08</td><td>5,708</td><td>7,947</td></tr><tr><td>16,02</td><td>-13,34</td><td>5,762</td><td>8,109</td></tr><tr><td>16,98</td><td>-13,51</td><td>5,803</td><td>8,233</td></tr><tr><td>17,99</td><td>-13,65</td><td>5,833</td><td>8,321</td></tr><tr><td>19,01</td><td>-13,77</td><td>5,854</td><td>8,384</td></tr><tr><td>20,02</td><td>-13,85</td><td>5,865</td><td>8,419</td></tr><tr><td>20,98</td><td>-13,94</td><td>5,864</td><td>8,415</td></tr><tr><td>21,99</td><td>-13,97</td><td>5,859</td><td>8,399</td></tr><tr><td>22,61</td><td>-13,99</td><td>5,857</td><td>8,393</td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	3,059	0,000	0,05	-0,03	3,144	0,255	0,11	-0,11	3,206	0,441	0,16	-0,17	3,245	0,558	0,21	-0,26	3,273	0,643	0,27	-0,34	3,298	0,717	0,32	-0,43	3,319	0,781	0,37	-0,51	3,339	0,839	0,43	-0,60	3,358	0,898	0,48	-0,69	3,374	0,945	0,53	-0,77	3,390	0,993	0,59	-0,86	3,406	1,041	0,69	-1,03	3,436	1,131	0,80	-1,20	3,464	1,216	0,91	-1,37	3,493	1,300	1,01	-1,54	3,521	1,385	1,22	-1,86	3,575	1,549	1,38	-2,08	3,614	1,665	1,60	-2,40	3,667	1,823	1,81	-2,71	3,716	1,970	2,02	-3,03	3,765	2,118	2,29	-3,40	3,826	2,302	2,61	-3,83	3,902	2,527	2,88	-4,17	3,959	2,700	3,19	-4,60	4,030	2,914	3,51	-5,00	4,100	3,122	3,78	-5,31	4,157	3,293	4,10	-5,71	4,224	3,496	4,42	-6,05	4,289	3,691	4,68	-6,37	4,344	3,856	5,00	-6,71	4,409	4,050	5,48	-7,23	4,504	4,335	6,02	-7,77	4,603	4,633	6,49	-8,23	4,690	4,893	6,97	-8,65	4,774	5,146	7,99	-9,48	4,938	5,637	9,00	-10,22	5,088	6,088	10,01	-10,91	5,231	6,514	11,02	-11,48	5,359	6,898	11,98	-11,94	5,465	7,219	12,99	-12,37	5,560	7,502	14,00	-12,74	5,639	7,740	15,01	-13,08	5,708	7,947	16,02	-13,34	5,762	8,109	16,98	-13,51	5,803	8,233	17,99	-13,65	5,833	8,321	19,01	-13,77	5,854	8,384	20,02	-13,85	5,865	8,419	20,98	-13,94	5,864	8,415	21,99	-13,97	5,859	8,399	22,61	-13,99	5,857	8,393
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																				
0,00	0,00	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																				
0,05	-0,03	3,144	0,255																																																																																																																																																																																																																				
0,11	-0,11	3,206	0,441																																																																																																																																																																																																																				
0,16	-0,17	3,245	0,558																																																																																																																																																																																																																				
0,21	-0,26	3,273	0,643																																																																																																																																																																																																																				
0,27	-0,34	3,298	0,717																																																																																																																																																																																																																				
0,32	-0,43	3,319	0,781																																																																																																																																																																																																																				
0,37	-0,51	3,339	0,839																																																																																																																																																																																																																				
0,43	-0,60	3,358	0,898																																																																																																																																																																																																																				
0,48	-0,69	3,374	0,945																																																																																																																																																																																																																				
0,53	-0,77	3,390	0,993																																																																																																																																																																																																																				
0,59	-0,86	3,406	1,041																																																																																																																																																																																																																				
0,69	-1,03	3,436	1,131																																																																																																																																																																																																																				
0,80	-1,20	3,464	1,216																																																																																																																																																																																																																				
0,91	-1,37	3,493	1,300																																																																																																																																																																																																																				
1,01	-1,54	3,521	1,385																																																																																																																																																																																																																				
1,22	-1,86	3,575	1,549																																																																																																																																																																																																																				
1,38	-2,08	3,614	1,665																																																																																																																																																																																																																				
1,60	-2,40	3,667	1,823																																																																																																																																																																																																																				
1,81	-2,71	3,716	1,970																																																																																																																																																																																																																				
2,02	-3,03	3,765	2,118																																																																																																																																																																																																																				
2,29	-3,40	3,826	2,302																																																																																																																																																																																																																				
2,61	-3,83	3,902	2,527																																																																																																																																																																																																																				
2,88	-4,17	3,959	2,700																																																																																																																																																																																																																				
3,19	-4,60	4,030	2,914																																																																																																																																																																																																																				
3,51	-5,00	4,100	3,122																																																																																																																																																																																																																				
3,78	-5,31	4,157	3,293																																																																																																																																																																																																																				
4,10	-5,71	4,224	3,496																																																																																																																																																																																																																				
4,42	-6,05	4,289	3,691																																																																																																																																																																																																																				
4,68	-6,37	4,344	3,856																																																																																																																																																																																																																				
5,00	-6,71	4,409	4,050																																																																																																																																																																																																																				
5,48	-7,23	4,504	4,335																																																																																																																																																																																																																				
6,02	-7,77	4,603	4,633																																																																																																																																																																																																																				
6,49	-8,23	4,690	4,893																																																																																																																																																																																																																				
6,97	-8,65	4,774	5,146																																																																																																																																																																																																																				
7,99	-9,48	4,938	5,637																																																																																																																																																																																																																				
9,00	-10,22	5,088	6,088																																																																																																																																																																																																																				
10,01	-10,91	5,231	6,514																																																																																																																																																																																																																				
11,02	-11,48	5,359	6,898																																																																																																																																																																																																																				
11,98	-11,94	5,465	7,219																																																																																																																																																																																																																				
12,99	-12,37	5,560	7,502																																																																																																																																																																																																																				
14,00	-12,74	5,639	7,740																																																																																																																																																																																																																				
15,01	-13,08	5,708	7,947																																																																																																																																																																																																																				
16,02	-13,34	5,762	8,109																																																																																																																																																																																																																				
16,98	-13,51	5,803	8,233																																																																																																																																																																																																																				
17,99	-13,65	5,833	8,321																																																																																																																																																																																																																				
19,01	-13,77	5,854	8,384																																																																																																																																																																																																																				
20,02	-13,85	5,865	8,419																																																																																																																																																																																																																				
20,98	-13,94	5,864	8,415																																																																																																																																																																																																																				
21,99	-13,97	5,859	8,399																																																																																																																																																																																																																				
22,61	-13,99	5,857	8,393																																																																																																																																																																																																																				
$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$ $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$				Descripción de la falla Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla ni tampoco se visualiza un abultamiento excesivo. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																			
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																			

Tabla F-4: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Fecha realización:		16-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	194,78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura promedio probeta	[cm]	10,00	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,703																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Masa húmeda probeta	[g]	331,79	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,551																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad promedio probeta	[%]	9,8	Relación de vacíos		0,813																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
				Saturación	[%]	34,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,99	Área probeta	[cm²]	19,55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura probeta	[cm]	9,93	Volumen probeta	[cm³]	194,16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,001																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad probeta	[%]	28,8	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,553																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
				Relación de vacíos		0,810																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Finales	Humedad probeta	[%]	25,9	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,049																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Relación de vacíos	-	0,728	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,627																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	16,02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	2,791																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	1,540	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	1,020																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	3,810																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>1,072</td><td>0,156</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,11</td><td>1,099</td><td>0,237</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,20</td><td>1,114</td><td>0,284</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,29</td><td>1,132</td><td>0,336</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,34</td><td>1,146</td><td>0,378</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,46</td><td>1,160</td><td>0,421</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,54</td><td>1,173</td><td>0,459</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,63</td><td>1,185</td><td>0,496</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,71</td><td>1,198</td><td>0,534</td></tr><tr><td>0,52</td><td>-0,80</td><td>1,209</td><td>0,567</td></tr><tr><td>0,62</td><td>-0,97</td><td>1,232</td><td>0,638</td></tr><tr><td>0,72</td><td>-1,11</td><td>1,254</td><td>0,703</td></tr><tr><td>0,82</td><td>-1,29</td><td>1,273</td><td>0,760</td></tr><tr><td>0,88</td><td>-1,37</td><td>1,282</td><td>0,788</td></tr><tr><td>0,98</td><td>-1,51</td><td>1,301</td><td>0,844</td></tr><tr><td>1,18</td><td>-1,83</td><td>1,337</td><td>0,952</td></tr><tr><td>1,39</td><td>-2,11</td><td>1,366</td><td>1,040</td></tr><tr><td>1,60</td><td>-2,40</td><td>1,399</td><td>1,138</td></tr><tr><td>1,80</td><td>-2,68</td><td>1,427</td><td>1,222</td></tr><tr><td>2,01</td><td>-2,94</td><td>1,453</td><td>1,301</td></tr><tr><td>2,32</td><td>-3,31</td><td>1,492</td><td>1,416</td></tr><tr><td>2,58</td><td>-3,63</td><td>1,522</td><td>1,508</td></tr><tr><td>2,88</td><td>-3,97</td><td>1,554</td><td>1,603</td></tr><tr><td>3,19</td><td>-4,28</td><td>1,581</td><td>1,684</td></tr><tr><td>3,50</td><td>-4,57</td><td>1,609</td><td>1,769</td></tr><tr><td>3,81</td><td>-4,86</td><td>1,638</td><td>1,854</td></tr><tr><td>4,12</td><td>-5,14</td><td>1,661</td><td>1,925</td></tr><tr><td>4,38</td><td>-5,34</td><td>1,680</td><td>1,981</td></tr><tr><td>4,69</td><td>-5,57</td><td>1,699</td><td>2,037</td></tr><tr><td>5,00</td><td>-5,83</td><td>1,719</td><td>2,097</td></tr><tr><td>5,51</td><td>-6,17</td><td>1,749</td><td>2,189</td></tr><tr><td>5,98</td><td>-6,45</td><td>1,776</td><td>2,268</td></tr><tr><td>6,49</td><td>-6,74</td><td>1,800</td><td>2,340</td></tr><tr><td>7,01</td><td>-7,00</td><td>1,819</td><td>2,397</td></tr><tr><td>7,98</td><td>-7,43</td><td>1,855</td><td>2,505</td></tr><tr><td>9,02</td><td>-7,80</td><td>1,892</td><td>2,617</td></tr><tr><td>9,99</td><td>-8,08</td><td>1,916</td><td>2,687</td></tr><tr><td>11,02</td><td>-8,31</td><td>1,929</td><td>2,727</td></tr><tr><td>12,00</td><td>-8,48</td><td>1,936</td><td>2,748</td></tr><tr><td>12,98</td><td>-8,60</td><td>1,943</td><td>2,771</td></tr><tr><td>14,01</td><td>-8,71</td><td>1,949</td><td>2,787</td></tr><tr><td>14,99</td><td>-8,77</td><td>1,950</td><td>2,790</td></tr><tr><td>16,02</td><td>-8,83</td><td>1,950</td><td>2,791</td></tr><tr><td>17,00</td><td>-8,83</td><td>1,947</td><td>2,783</td></tr><tr><td>17,98</td><td>-8,83</td><td>1,943</td><td>2,770</td></tr><tr><td>19,01</td><td>-8,83</td><td>1,938</td><td>2,755</td></tr><tr><td>20,06</td><td>-8,83</td><td>1,927</td><td>2,723</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	1,020	0,000	0,05	-0,03	1,072	0,156	0,10	-0,11	1,099	0,237	0,15	-0,20	1,114	0,284	0,21	-0,29	1,132	0,336	0,26	-0,34	1,146	0,378	0,31	-0,46	1,160	0,421	0,36	-0,54	1,173	0,459	0,41	-0,63	1,185	0,496	0,46	-0,71	1,198	0,534	0,52	-0,80	1,209	0,567	0,62	-0,97	1,232	0,638	0,72	-1,11	1,254	0,703	0,82	-1,29	1,273	0,760	0,88	-1,37	1,282	0,788	0,98	-1,51	1,301	0,844	1,18	-1,83	1,337	0,952	1,39	-2,11	1,366	1,040	1,60	-2,40	1,399	1,138	1,80	-2,68	1,427	1,222	2,01	-2,94	1,453	1,301	2,32	-3,31	1,492	1,416	2,58	-3,63	1,522	1,508	2,88	-3,97	1,554	1,603	3,19	-4,28	1,581	1,684	3,50	-4,57	1,609	1,769	3,81	-4,86	1,638	1,854	4,12	-5,14	1,661	1,925	4,38	-5,34	1,680	1,981	4,69	-5,57	1,699	2,037	5,00	-5,83	1,719	2,097	5,51	-6,17	1,749	2,189	5,98	-6,45	1,776	2,268	6,49	-6,74	1,800	2,340	7,01	-7,00	1,819	2,397	7,98	-7,43	1,855	2,505	9,02	-7,80	1,892	2,617	9,99	-8,08	1,916	2,687	11,02	-8,31	1,929	2,727	12,00	-8,48	1,936	2,748	12,98	-8,60	1,943	2,771	14,01	-8,71	1,949	2,787	14,99	-8,77	1,950	2,790	16,02	-8,83	1,950	2,791	17,00	-8,83	1,947	2,783	17,98	-8,83	1,943	2,770	19,01	-8,83	1,938	2,755	20,06	-8,83	1,927	2,723																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,00	0,00	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,05	-0,03	1,072	0,156																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,10	-0,11	1,099	0,237																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,15	-0,20	1,114	0,284																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,21	-0,29	1,132	0,336																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,26	-0,34	1,146	0,378																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,31	-0,46	1,160	0,421																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,36	-0,54	1,173	0,459																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,41	-0,63	1,185	0,496																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,46	-0,71	1,198	0,534																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,52	-0,80	1,209	0,567																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,62	-0,97	1,232	0,638																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,72	-1,11	1,254	0,703																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,82	-1,29	1,273	0,760																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,88	-1,37	1,282	0,788																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,98	-1,51	1,301	0,844																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,18	-1,83	1,337	0,952																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,39	-2,11	1,366	1,040																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,60	-2,40	1,399	1,138																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,80	-2,68	1,427	1,222																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,01	-2,94	1,453	1,301																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,32	-3,31	1,492	1,416																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,58	-3,63	1,522	1,508																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,88	-3,97	1,554	1,603																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,19	-4,28	1,581	1,684																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,50	-4,57	1,609	1,769																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,81	-4,86	1,638	1,854																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,12	-5,14	1,661	1,925																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,38	-5,34	1,680	1,981																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,69	-5,57	1,699	2,037																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,00	-5,83	1,719	2,097																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,51	-6,17	1,749	2,189																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,98	-6,45	1,776	2,268																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,49	-6,74	1,800	2,340																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
7,01	-7,00	1,819	2,397																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
7,98	-7,43	1,855	2,505																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
9,02	-7,80	1,892	2,617																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
9,99	-8,08	1,916	2,687																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
11,02	-8,31	1,929	2,727																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
12,00	-8,48	1,936	2,748																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
12,98	-8,60	1,943	2,771																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
14,01	-8,71	1,949	2,787																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
14,99	-8,77	1,950	2,790																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
16,02	-8,83	1,950	2,791																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
17,00	-8,83	1,947	2,783																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
17,98	-8,83	1,943	2,770																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
19,01	-8,83	1,938	2,755																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
20,06	-8,83	1,927	2,723																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Tabla F-5: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																				
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																				
Fecha realización:		28-12-2015																																																																																																																																																																																																									
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																									
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																						
Probeta Nº:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																						
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																						
Descripción Visual:				LL	-																																																																																																																																																																																																						
				LP	-																																																																																																																																																																																																						
				IP	NP																																																																																																																																																																																																						
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																					
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,04																																																																																																																																																																																																					
	Altura promedio probeta	[cm]	10,01	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,699																																																																																																																																																																																																					
	Masa húmeda probeta	[g]	331,42	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,549																																																																																																																																																																																																					
	Humedad promedio probeta	[%]	9,7	Relación de vacíos		0,816																																																																																																																																																																																																					
				Saturación	[%]	33,51																																																																																																																																																																																																					
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,94	Área probeta	[cm²]	19,20																																																																																																																																																																																																					
	Altura probeta	[cm]	9,85	Volumen probeta	[cm³]	189,18																																																																																																																																																																																																					
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,030																																																																																																																																																																																																					
	Humedad probeta	[%]	27,0	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,598																																																																																																																																																																																																					
				Relación de vacíos	-	0,760																																																																																																																																																																																																					
Finales	Humedad probeta	[%]	23,1	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,098																																																																																																																																																																																																					
	Relación de vacíos	-	0,650	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,704																																																																																																																																																																																																					
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	18,02																																																																																																																																																																																																					
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	5,514																																																																																																																																																																																																					
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,162	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	2,039																																																																																																																																																																																																					
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	7,553																																																																																																																																																																																																					
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>2,049</td><td>0,029</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,06</td><td>2,118</td><td>0,236</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,14</td><td>2,158</td><td>0,357</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,23</td><td>2,186</td><td>0,438</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,31</td><td>2,206</td><td>0,501</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,40</td><td>2,226</td><td>0,559</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,49</td><td>2,243</td><td>0,611</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,57</td><td>2,259</td><td>0,659</td></tr><tr><td>0,47</td><td>-0,66</td><td>2,275</td><td>0,707</td></tr><tr><td>0,52</td><td>-0,74</td><td>2,291</td><td>0,755</td></tr><tr><td>0,62</td><td>-0,91</td><td>2,318</td><td>0,837</td></tr><tr><td>0,73</td><td>-1,11</td><td>2,347</td><td>0,923</td></tr><tr><td>0,78</td><td>-1,20</td><td>2,360</td><td>0,962</td></tr><tr><td>0,88</td><td>-1,37</td><td>2,387</td><td>1,043</td></tr><tr><td>0,99</td><td>-1,54</td><td>2,413</td><td>1,120</td></tr><tr><td>1,19</td><td>-1,86</td><td>2,464</td><td>1,273</td></tr><tr><td>1,40</td><td>-2,20</td><td>2,513</td><td>1,421</td></tr><tr><td>1,61</td><td>-2,51</td><td>2,556</td><td>1,550</td></tr><tr><td>1,82</td><td>-2,83</td><td>2,604</td><td>1,693</td></tr><tr><td>2,02</td><td>-3,11</td><td>2,646</td><td>1,821</td></tr><tr><td>2,28</td><td>-3,48</td><td>2,700</td><td>1,982</td></tr><tr><td>2,60</td><td>-3,91</td><td>2,760</td><td>2,162</td></tr><tr><td>2,91</td><td>-4,34</td><td>2,820</td><td>2,341</td></tr><tr><td>3,22</td><td>-4,71</td><td>2,874</td><td>2,505</td></tr><tr><td>3,48</td><td>-5,03</td><td>2,921</td><td>2,646</td></tr><tr><td>3,79</td><td>-5,40</td><td>2,971</td><td>2,794</td></tr><tr><td>4,10</td><td>-5,74</td><td>3,022</td><td>2,947</td></tr><tr><td>4,41</td><td>-6,08</td><td>3,071</td><td>3,094</td></tr><tr><td>4,72</td><td>-6,40</td><td>3,117</td><td>3,231</td></tr><tr><td>4,98</td><td>-6,65</td><td>3,156</td><td>3,350</td></tr><tr><td>5,50</td><td>-7,14</td><td>3,227</td><td>3,561</td></tr><tr><td>6,02</td><td>-7,60</td><td>3,290</td><td>3,752</td></tr><tr><td>6,49</td><td>-7,97</td><td>3,346</td><td>3,919</td></tr><tr><td>7,01</td><td>-8,37</td><td>3,403</td><td>4,092</td></tr><tr><td>8,00</td><td>-9,05</td><td>3,500</td><td>4,382</td></tr><tr><td>8,98</td><td>-9,62</td><td>3,587</td><td>4,641</td></tr><tr><td>10,02</td><td>-10,14</td><td>3,661</td><td>4,864</td></tr><tr><td>11,01</td><td>-10,54</td><td>3,718</td><td>5,036</td></tr><tr><td>12,00</td><td>-10,85</td><td>3,764</td><td>5,175</td></tr><tr><td>12,98</td><td>-11,11</td><td>3,801</td><td>5,285</td></tr><tr><td>14,02</td><td>-11,34</td><td>3,831</td><td>5,375</td></tr><tr><td>15,01</td><td>-11,51</td><td>3,853</td><td>5,441</td></tr><tr><td>16,00</td><td>-11,62</td><td>3,866</td><td>5,481</td></tr><tr><td>16,98</td><td>-11,71</td><td>3,874</td><td>5,505</td></tr><tr><td>18,02</td><td>-11,77</td><td>3,877</td><td>5,514</td></tr><tr><td>19,01</td><td>-11,82</td><td>3,874</td><td>5,503</td></tr><tr><td>19,67</td><td>-11,82</td><td>3,869</td><td>5,488</td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	2,039	0,000	0,05	-0,03	2,049	0,029	0,10	-0,06	2,118	0,236	0,15	-0,14	2,158	0,357	0,21	-0,23	2,186	0,438	0,26	-0,31	2,206	0,501	0,31	-0,40	2,226	0,559	0,36	-0,49	2,243	0,611	0,41	-0,57	2,259	0,659	0,47	-0,66	2,275	0,707	0,52	-0,74	2,291	0,755	0,62	-0,91	2,318	0,837	0,73	-1,11	2,347	0,923	0,78	-1,20	2,360	0,962	0,88	-1,37	2,387	1,043	0,99	-1,54	2,413	1,120	1,19	-1,86	2,464	1,273	1,40	-2,20	2,513	1,421	1,61	-2,51	2,556	1,550	1,82	-2,83	2,604	1,693	2,02	-3,11	2,646	1,821	2,28	-3,48	2,700	1,982	2,60	-3,91	2,760	2,162	2,91	-4,34	2,820	2,341	3,22	-4,71	2,874	2,505	3,48	-5,03	2,921	2,646	3,79	-5,40	2,971	2,794	4,10	-5,74	3,022	2,947	4,41	-6,08	3,071	3,094	4,72	-6,40	3,117	3,231	4,98	-6,65	3,156	3,350	5,50	-7,14	3,227	3,561	6,02	-7,60	3,290	3,752	6,49	-7,97	3,346	3,919	7,01	-8,37	3,403	4,092	8,00	-9,05	3,500	4,382	8,98	-9,62	3,587	4,641	10,02	-10,14	3,661	4,864	11,01	-10,54	3,718	5,036	12,00	-10,85	3,764	5,175	12,98	-11,11	3,801	5,285	14,02	-11,34	3,831	5,375	15,01	-11,51	3,853	5,441	16,00	-11,62	3,866	5,481	16,98	-11,71	3,874	5,505	18,02	-11,77	3,877	5,514	19,01	-11,82	3,874	5,503	19,67	-11,82	3,869	5,488
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																								
0,00	0,00	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																								
0,05	-0,03	2,049	0,029																																																																																																																																																																																																								
0,10	-0,06	2,118	0,236																																																																																																																																																																																																								
0,15	-0,14	2,158	0,357																																																																																																																																																																																																								
0,21	-0,23	2,186	0,438																																																																																																																																																																																																								
0,26	-0,31	2,206	0,501																																																																																																																																																																																																								
0,31	-0,40	2,226	0,559																																																																																																																																																																																																								
0,36	-0,49	2,243	0,611																																																																																																																																																																																																								
0,41	-0,57	2,259	0,659																																																																																																																																																																																																								
0,47	-0,66	2,275	0,707																																																																																																																																																																																																								
0,52	-0,74	2,291	0,755																																																																																																																																																																																																								
0,62	-0,91	2,318	0,837																																																																																																																																																																																																								
0,73	-1,11	2,347	0,923																																																																																																																																																																																																								
0,78	-1,20	2,360	0,962																																																																																																																																																																																																								
0,88	-1,37	2,387	1,043																																																																																																																																																																																																								
0,99	-1,54	2,413	1,120																																																																																																																																																																																																								
1,19	-1,86	2,464	1,273																																																																																																																																																																																																								
1,40	-2,20	2,513	1,421																																																																																																																																																																																																								
1,61	-2,51	2,556	1,550																																																																																																																																																																																																								
1,82	-2,83	2,604	1,693																																																																																																																																																																																																								
2,02	-3,11	2,646	1,821																																																																																																																																																																																																								
2,28	-3,48	2,700	1,982																																																																																																																																																																																																								
2,60	-3,91	2,760	2,162																																																																																																																																																																																																								
2,91	-4,34	2,820	2,341																																																																																																																																																																																																								
3,22	-4,71	2,874	2,505																																																																																																																																																																																																								
3,48	-5,03	2,921	2,646																																																																																																																																																																																																								
3,79	-5,40	2,971	2,794																																																																																																																																																																																																								
4,10	-5,74	3,022	2,947																																																																																																																																																																																																								
4,41	-6,08	3,071	3,094																																																																																																																																																																																																								
4,72	-6,40	3,117	3,231																																																																																																																																																																																																								
4,98	-6,65	3,156	3,350																																																																																																																																																																																																								
5,50	-7,14	3,227	3,561																																																																																																																																																																																																								
6,02	-7,60	3,290	3,752																																																																																																																																																																																																								
6,49	-7,97	3,346	3,919																																																																																																																																																																																																								
7,01	-8,37	3,403	4,092																																																																																																																																																																																																								
8,00	-9,05	3,500	4,382																																																																																																																																																																																																								
8,98	-9,62	3,587	4,641																																																																																																																																																																																																								
10,02	-10,14	3,661	4,864																																																																																																																																																																																																								
11,01	-10,54	3,718	5,036																																																																																																																																																																																																								
12,00	-10,85	3,764	5,175																																																																																																																																																																																																								
12,98	-11,11	3,801	5,285																																																																																																																																																																																																								
14,02	-11,34	3,831	5,375																																																																																																																																																																																																								
15,01	-11,51	3,853	5,441																																																																																																																																																																																																								
16,00	-11,62	3,866	5,481																																																																																																																																																																																																								
16,98	-11,71	3,874	5,505																																																																																																																																																																																																								
18,02	-11,77	3,877	5,514																																																																																																																																																																																																								
19,01	-11,82	3,874	5,503																																																																																																																																																																																																								
19,67	-11,82	3,869	5,488																																																																																																																																																																																																								
$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3}$ $q = \sigma_1 - \sigma_3$ Descripción de la falla Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla ni tampoco se visualiza un abultamiento excesivo. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana. 																																																																																																																																																																																																											
REG-FE-63		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																							

Tabla F-6: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 48 [%] – $\rho_s = 1,550 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																								
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																								
Fecha realización:		29-12-2015																																																																																																																																																																																																																													
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																													
SPT N°:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																										
Probeta N°:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																										
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																										
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																										
				LP	-																																																																																																																																																																																																																										
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																										
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																									
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	194,98																																																																																																																																																																																																																									
	Altura promedio probeta	[cm]	10,01	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,700																																																																																																																																																																																																																									
	Masa húmeda probeta	[g]	331,42	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,545																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad promedio probeta	[%]	10,0	Relación de vacíos		0,820																																																																																																																																																																																																																									
				Saturación	[%]	34,28																																																																																																																																																																																																																									
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,89	Área probeta	[cm²]	18,77																																																																																																																																																																																																																									
	Altura probeta	[cm]	9,81	Volumen probeta	[cm³]	184,16																																																																																																																																																																																																																									
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,055																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad probeta	[%]	25,5	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,637																																																																																																																																																																																																																									
				Relación de vacíos		0,718																																																																																																																																																																																																																									
Finales	Humedad probeta	[%]	21,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,139																																																																																																																																																																																																																									
	Relación de vacíos	-	0,591	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,768																																																																																																																																																																																																																									
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	18,98																																																																																																																																																																																																																									
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	8,076																																																																																																																																																																																																																									
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	1,530	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	3,059																																																																																																																																																																																																																									
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	11,135																																																																																																																																																																																																																									
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,06</td><td>3,143</td><td>0,252</td></tr><tr><td>0,11</td><td>-0,11</td><td>3,207</td><td>0,444</td></tr><tr><td>0,16</td><td>-0,20</td><td>3,248</td><td>0,567</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,29</td><td>3,278</td><td>0,656</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,37</td><td>3,306</td><td>0,740</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,46</td><td>3,329</td><td>0,809</td></tr><tr><td>0,37</td><td>-0,54</td><td>3,350</td><td>0,873</td></tr><tr><td>0,42</td><td>-0,63</td><td>3,371</td><td>0,937</td></tr><tr><td>0,47</td><td>-0,71</td><td>3,393</td><td>1,001</td></tr><tr><td>0,52</td><td>-0,83</td><td>3,411</td><td>1,055</td></tr><tr><td>0,63</td><td>-1,00</td><td>3,448</td><td>1,168</td></tr><tr><td>0,68</td><td>-1,09</td><td>3,466</td><td>1,222</td></tr><tr><td>0,78</td><td>-1,26</td><td>3,502</td><td>1,330</td></tr><tr><td>0,89</td><td>-1,46</td><td>3,539</td><td>1,438</td></tr><tr><td>0,99</td><td>-1,63</td><td>3,571</td><td>1,537</td></tr><tr><td>1,20</td><td>-1,97</td><td>3,638</td><td>1,738</td></tr><tr><td>1,41</td><td>-2,31</td><td>3,700</td><td>1,924</td></tr><tr><td>1,62</td><td>-2,63</td><td>3,762</td><td>2,110</td></tr><tr><td>1,83</td><td>-2,97</td><td>3,824</td><td>2,296</td></tr><tr><td>1,98</td><td>-3,20</td><td>3,867</td><td>2,423</td></tr><tr><td>2,29</td><td>-3,66</td><td>3,953</td><td>2,681</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-4,11</td><td>4,036</td><td>2,929</td></tr><tr><td>2,92</td><td>-4,57</td><td>4,115</td><td>3,167</td></tr><tr><td>3,18</td><td>-4,91</td><td>4,179</td><td>3,361</td></tr><tr><td>3,49</td><td>-5,31</td><td>4,253</td><td>3,582</td></tr><tr><td>3,81</td><td>-5,71</td><td>4,325</td><td>3,798</td></tr><tr><td>4,12</td><td>-6,11</td><td>4,394</td><td>4,004</td></tr><tr><td>4,38</td><td>-6,40</td><td>4,451</td><td>4,174</td></tr><tr><td>4,69</td><td>-6,74</td><td>4,517</td><td>4,373</td></tr><tr><td>5,01</td><td>-7,08</td><td>4,578</td><td>4,556</td></tr><tr><td>5,48</td><td>-7,60</td><td>4,667</td><td>4,823</td></tr><tr><td>6,00</td><td>-8,11</td><td>4,761</td><td>5,105</td></tr><tr><td>6,52</td><td>-8,57</td><td>4,850</td><td>5,374</td></tr><tr><td>6,99</td><td>-9,00</td><td>4,926</td><td>5,600</td></tr><tr><td>7,98</td><td>-9,77</td><td>5,071</td><td>6,036</td></tr><tr><td>8,97</td><td>-10,45</td><td>5,199</td><td>6,420</td></tr><tr><td>10,01</td><td>-11,08</td><td>5,321</td><td>6,787</td></tr><tr><td>11,00</td><td>-11,60</td><td>5,421</td><td>7,085</td></tr><tr><td>11,99</td><td>-12,02</td><td>5,504</td><td>7,336</td></tr><tr><td>12,99</td><td>-12,40</td><td>5,573</td><td>7,542</td></tr><tr><td>13,97</td><td>-12,71</td><td>5,630</td><td>7,712</td></tr><tr><td>15,02</td><td>-12,97</td><td>5,678</td><td>7,856</td></tr><tr><td>16,01</td><td>-13,14</td><td>5,707</td><td>7,943</td></tr><tr><td>17,00</td><td>-13,31</td><td>5,731</td><td>8,016</td></tr><tr><td>17,99</td><td>-13,42</td><td>5,740</td><td>8,044</td></tr><tr><td>18,98</td><td>-13,51</td><td>5,751</td><td>8,076</td></tr><tr><td>20,02</td><td>-13,59</td><td>5,749</td><td>8,070</td></tr><tr><td>20,80</td><td>-13,62</td><td>5,744</td><td>8,053</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table> Descripción de la falla Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla ni tampoco se visualiza un abultamiento excesivo. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte. Se considera corrección por el uso de membrana.								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	3,059	0,000	0,05	-0,06	3,143	0,252	0,11	-0,11	3,207	0,444	0,16	-0,20	3,248	0,567	0,21	-0,29	3,278	0,656	0,26	-0,37	3,306	0,740	0,31	-0,46	3,329	0,809	0,37	-0,54	3,350	0,873	0,42	-0,63	3,371	0,937	0,47	-0,71	3,393	1,001	0,52	-0,83	3,411	1,055	0,63	-1,00	3,448	1,168	0,68	-1,09	3,466	1,222	0,78	-1,26	3,502	1,330	0,89	-1,46	3,539	1,438	0,99	-1,63	3,571	1,537	1,20	-1,97	3,638	1,738	1,41	-2,31	3,700	1,924	1,62	-2,63	3,762	2,110	1,83	-2,97	3,824	2,296	1,98	-3,20	3,867	2,423	2,29	-3,66	3,953	2,681	2,61	-4,11	4,036	2,929	2,92	-4,57	4,115	3,167	3,18	-4,91	4,179	3,361	3,49	-5,31	4,253	3,582	3,81	-5,71	4,325	3,798	4,12	-6,11	4,394	4,004	4,38	-6,40	4,451	4,174	4,69	-6,74	4,517	4,373	5,01	-7,08	4,578	4,556	5,48	-7,60	4,667	4,823	6,00	-8,11	4,761	5,105	6,52	-8,57	4,850	5,374	6,99	-9,00	4,926	5,600	7,98	-9,77	5,071	6,036	8,97	-10,45	5,199	6,420	10,01	-11,08	5,321	6,787	11,00	-11,60	5,421	7,085	11,99	-12,02	5,504	7,336	12,99	-12,40	5,573	7,542	13,97	-12,71	5,630	7,712	15,02	-12,97	5,678	7,856	16,01	-13,14	5,707	7,943	17,00	-13,31	5,731	8,016	17,99	-13,42	5,740	8,044	18,98	-13,51	5,751	8,076	20,02	-13,59	5,749	8,070	20,80	-13,62	5,744	8,053																
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																												
0,00	0,00	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																												
0,05	-0,06	3,143	0,252																																																																																																																																																																																																																												
0,11	-0,11	3,207	0,444																																																																																																																																																																																																																												
0,16	-0,20	3,248	0,567																																																																																																																																																																																																																												
0,21	-0,29	3,278	0,656																																																																																																																																																																																																																												
0,26	-0,37	3,306	0,740																																																																																																																																																																																																																												
0,31	-0,46	3,329	0,809																																																																																																																																																																																																																												
0,37	-0,54	3,350	0,873																																																																																																																																																																																																																												
0,42	-0,63	3,371	0,937																																																																																																																																																																																																																												
0,47	-0,71	3,393	1,001																																																																																																																																																																																																																												
0,52	-0,83	3,411	1,055																																																																																																																																																																																																																												
0,63	-1,00	3,448	1,168																																																																																																																																																																																																																												
0,68	-1,09	3,466	1,222																																																																																																																																																																																																																												
0,78	-1,26	3,502	1,330																																																																																																																																																																																																																												
0,89	-1,46	3,539	1,438																																																																																																																																																																																																																												
0,99	-1,63	3,571	1,537																																																																																																																																																																																																																												
1,20	-1,97	3,638	1,738																																																																																																																																																																																																																												
1,41	-2,31	3,700	1,924																																																																																																																																																																																																																												
1,62	-2,63	3,762	2,110																																																																																																																																																																																																																												
1,83	-2,97	3,824	2,296																																																																																																																																																																																																																												
1,98	-3,20	3,867	2,423																																																																																																																																																																																																																												
2,29	-3,66	3,953	2,681																																																																																																																																																																																																																												
2,61	-4,11	4,036	2,929																																																																																																																																																																																																																												
2,92	-4,57	4,115	3,167																																																																																																																																																																																																																												
3,18	-4,91	4,179	3,361																																																																																																																																																																																																																												
3,49	-5,31	4,253	3,582																																																																																																																																																																																																																												
3,81	-5,71	4,325	3,798																																																																																																																																																																																																																												
4,12	-6,11	4,394	4,004																																																																																																																																																																																																																												
4,38	-6,40	4,451	4,174																																																																																																																																																																																																																												
4,69	-6,74	4,517	4,373																																																																																																																																																																																																																												
5,01	-7,08	4,578	4,556																																																																																																																																																																																																																												
5,48	-7,60	4,667	4,823																																																																																																																																																																																																																												
6,00	-8,11	4,761	5,105																																																																																																																																																																																																																												
6,52	-8,57	4,850	5,374																																																																																																																																																																																																																												
6,99	-9,00	4,926	5,600																																																																																																																																																																																																																												
7,98	-9,77	5,071	6,036																																																																																																																																																																																																																												
8,97	-10,45	5,199	6,420																																																																																																																																																																																																																												
10,01	-11,08	5,321	6,787																																																																																																																																																																																																																												
11,00	-11,60	5,421	7,085																																																																																																																																																																																																																												
11,99	-12,02	5,504	7,336																																																																																																																																																																																																																												
12,99	-12,40	5,573	7,542																																																																																																																																																																																																																												
13,97	-12,71	5,630	7,712																																																																																																																																																																																																																												
15,02	-12,97	5,678	7,856																																																																																																																																																																																																																												
16,01	-13,14	5,707	7,943																																																																																																																																																																																																																												
17,00	-13,31	5,731	8,016																																																																																																																																																																																																																												
17,99	-13,42	5,740	8,044																																																																																																																																																																																																																												
18,98	-13,51	5,751	8,076																																																																																																																																																																																																																												
20,02	-13,59	5,749	8,070																																																																																																																																																																																																																												
20,80	-13,62	5,744	8,053																																																																																																																																																																																																																												
p' = σ'₁ + 2 * σ'₃ / 3																																																																																																																																																																																																																															
q = σ₁ - σ₃																																																																																																																																																																																																																															
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																											

Tabla F-7: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																								
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																																																								
Fecha realización:		18-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																													
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																													
SPT Nº:	-	Horizonte:	-		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																									
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																									
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.				Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																									
Descripción Visual:	-				LL	-																																																																																																																																																																																																																																																									
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																									
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																									
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																									
	Díámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	196,72																																																																																																																																																																																																																																																									
	Altura promedio probeta	[cm]	10,10	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,845																																																																																																																																																																																																																																																									
	Masa húmeda probeta	[g]	362,88	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,680																																																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad promedio probeta	[%]	9,8	Relación de vacíos	-	0,674																																																																																																																																																																																																																																																									
				Saturación	[%]	40,97																																																																																																																																																																																																																																																									
Después de la consolidación	Díámetro probeta	[cm]	5,03	Área probeta	[cm²]	19,86																																																																																																																																																																																																																																																									
	Altura probeta	[cm]	10,05	Volumen probeta	[cm³]	199,54																																																																																																																																																																																																																																																									
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,068																																																																																																																																																																																																																																																									
	Humedad probeta	[%]	24,8	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,657																																																																																																																																																																																																																																																									
					Relación de vacíos	-	0,697																																																																																																																																																																																																																																																								
Finales	Humedad probeta	[%]	25,2	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,060																																																																																																																																																																																																																																																									
	Relación de vacíos	-	0,710	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,645																																																																																																																																																																																																																																																									
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	5,50																																																																																																																																																																																																																																																									
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	3,314																																																																																																																																																																																																																																																									
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	1,530	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	1,020																																																																																																																																																																																																																																																									
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	4,334																																																																																																																																																																																																																																																									
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,09</td><td>1,071</td><td>0,154</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,14</td><td>1,111</td><td>0,275</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,23</td><td>1,150</td><td>0,392</td></tr><tr><td>0,20</td><td>-0,31</td><td>1,186</td><td>0,499</td></tr><tr><td>0,25</td><td>-0,37</td><td>1,222</td><td>0,606</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,46</td><td>1,257</td><td>0,713</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,51</td><td>1,290</td><td>0,810</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,60</td><td>1,322</td><td>0,908</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,66</td><td>1,355</td><td>1,006</td></tr><tr><td>0,51</td><td>-0,71</td><td>1,386</td><td>1,099</td></tr><tr><td>0,61</td><td>-0,86</td><td>1,445</td><td>1,275</td></tr><tr><td>0,71</td><td>-0,94</td><td>1,502</td><td>1,446</td></tr><tr><td>0,81</td><td>-1,06</td><td>1,556</td><td>1,608</td></tr><tr><td>0,92</td><td>-1,14</td><td>1,607</td><td>1,761</td></tr><tr><td>1,02</td><td>-1,23</td><td>1,649</td><td>1,889</td></tr><tr><td>1,22</td><td>-1,37</td><td>1,729</td><td>2,128</td></tr><tr><td>1,37</td><td>-1,46</td><td>1,777</td><td>2,273</td></tr><tr><td>1,58</td><td>-1,57</td><td>1,836</td><td>2,450</td></tr><tr><td>1,78</td><td>-1,66</td><td>1,887</td><td>2,602</td></tr><tr><td>1,99</td><td>-1,71</td><td>1,925</td><td>2,717</td></tr><tr><td>2,29</td><td>-1,80</td><td>1,973</td><td>2,861</td></tr><tr><td>2,60</td><td>-1,86</td><td>2,011</td><td>2,975</td></tr><tr><td>2,90</td><td>-1,88</td><td>2,042</td><td>3,066</td></tr><tr><td>3,21</td><td>-1,91</td><td>2,063</td><td>3,129</td></tr><tr><td>3,51</td><td>-1,91</td><td>2,082</td><td>3,186</td></tr><tr><td>3,82</td><td>-1,91</td><td>2,096</td><td>3,229</td></tr><tr><td>4,12</td><td>-1,88</td><td>2,104</td><td>3,254</td></tr><tr><td>4,38</td><td>-1,86</td><td>2,113</td><td>3,280</td></tr><tr><td>4,68</td><td>-1,83</td><td>2,119</td><td>3,299</td></tr><tr><td>4,99</td><td>-1,77</td><td>2,124</td><td>3,313</td></tr><tr><td>5,50</td><td>-1,69</td><td>2,124</td><td>3,314</td></tr><tr><td>6,01</td><td>-1,60</td><td>2,123</td><td>3,311</td></tr><tr><td>6,52</td><td>-1,51</td><td>2,121</td><td>3,303</td></tr><tr><td>6,98</td><td>-1,43</td><td>2,117</td><td>3,292</td></tr><tr><td>8,00</td><td>-1,20</td><td>2,107</td><td>3,262</td></tr><tr><td>9,01</td><td>-1,00</td><td>2,094</td><td>3,223</td></tr><tr><td>9,98</td><td>-0,83</td><td>2,080</td><td>3,182</td></tr><tr><td>11,00</td><td>-0,66</td><td>2,065</td><td>3,135</td></tr><tr><td>12,02</td><td>-0,49</td><td>2,048</td><td>3,084</td></tr><tr><td>12,99</td><td>-0,34</td><td>2,032</td><td>3,036</td></tr><tr><td>14,00</td><td>-0,20</td><td>2,019</td><td>2,999</td></tr><tr><td>15,02</td><td>-0,09</td><td>2,011</td><td>2,973</td></tr><tr><td>15,99</td><td>0,03</td><td>2,003</td><td>2,949</td></tr><tr><td>17,01</td><td>0,14</td><td>1,991</td><td>2,915</td></tr><tr><td>17,98</td><td>0,23</td><td>1,978</td><td>2,876</td></tr><tr><td>18,99</td><td>0,34</td><td>1,970</td><td>2,850</td></tr><tr><td>20,01</td><td>0,43</td><td>1,961</td><td>2,823</td></tr><tr><td>20,98</td><td>0,51</td><td>1,955</td><td>2,806</td></tr><tr><td>22,00</td><td>0,60</td><td>1,943</td><td>2,771</td></tr><tr><td>23,02</td><td>0,69</td><td>1,934</td><td>2,743</td></tr><tr><td>23,98</td><td>0,77</td><td>1,933</td><td>2,739</td></tr><tr><td>25,00</td><td>0,86</td><td>1,925</td><td>2,717</td></tr><tr><td>26,02</td><td>0,94</td><td>1,915</td><td>2,685</td></tr><tr><td>26,99</td><td>1,00</td><td>1,907</td><td>2,661</td></tr><tr><td>28,01</td><td>1,09</td><td>1,898</td><td>2,635</td></tr><tr><td>28,98</td><td>1,17</td><td>1,886</td><td>2,600</td></tr><tr><td>29,99</td><td>1,26</td><td>1,884</td><td>2,593</td></tr><tr><td>31,01</td><td>1,34</td><td>1,878</td><td>2,574</td></tr><tr><td>31,98</td><td>1,43</td><td>1,870</td><td>2,551</td></tr><tr><td>32,32</td><td>1,46</td><td>1,866</td><td>2,539</td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	1,020	0,000	0,05	-0,09	1,071	0,154	0,10	-0,14	1,111	0,275	0,15	-0,23	1,150	0,392	0,20	-0,31	1,186	0,499	0,25	-0,37	1,222	0,606	0,31	-0,46	1,257	0,713	0,36	-0,51	1,290	0,810	0,41	-0,60	1,322	0,908	0,46	-0,66	1,355	1,006	0,51	-0,71	1,386	1,099	0,61	-0,86	1,445	1,275	0,71	-0,94	1,502	1,446	0,81	-1,06	1,556	1,608	0,92	-1,14	1,607	1,761	1,02	-1,23	1,649	1,889	1,22	-1,37	1,729	2,128	1,37	-1,46	1,777	2,273	1,58	-1,57	1,836	2,450	1,78	-1,66	1,887	2,602	1,99	-1,71	1,925	2,717	2,29	-1,80	1,973	2,861	2,60	-1,86	2,011	2,975	2,90	-1,88	2,042	3,066	3,21	-1,91	2,063	3,129	3,51	-1,91	2,082	3,186	3,82	-1,91	2,096	3,229	4,12	-1,88	2,104	3,254	4,38	-1,86	2,113	3,280	4,68	-1,83	2,119	3,299	4,99	-1,77	2,124	3,313	5,50	-1,69	2,124	3,314	6,01	-1,60	2,123	3,311	6,52	-1,51	2,121	3,303	6,98	-1,43	2,117	3,292	8,00	-1,20	2,107	3,262	9,01	-1,00	2,094	3,223	9,98	-0,83	2,080	3,182	11,00	-0,66	2,065	3,135	12,02	-0,49	2,048	3,084	12,99	-0,34	2,032	3,036	14,00	-0,20	2,019	2,999	15,02	-0,09	2,011	2,973	15,99	0,03	2,003	2,949	17,01	0,14	1,991	2,915	17,98	0,23	1,978	2,876	18,99	0,34	1,970	2,850	20,01	0,43	1,961	2,823	20,98	0,51	1,955	2,806	22,00	0,60	1,943	2,771	23,02	0,69	1,934	2,743	23,98	0,77	1,933	2,739	25,00	0,86	1,925	2,717	26,02	0,94	1,915	2,685	26,99	1,00	1,907	2,661	28,01	1,09	1,898	2,635	28,98	1,17	1,886	2,600	29,99	1,26	1,884	2,593	31,01	1,34	1,878	2,574	31,98	1,43	1,870	2,551	32,32	1,46	1,866	2,539
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																												
0,00	0,00	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																																												
0,05	-0,09	1,071	0,154																																																																																																																																																																																																																																																												
0,10	-0,14	1,111	0,275																																																																																																																																																																																																																																																												
0,15	-0,23	1,150	0,392																																																																																																																																																																																																																																																												
0,20	-0,31	1,186	0,499																																																																																																																																																																																																																																																												
0,25	-0,37	1,222	0,606																																																																																																																																																																																																																																																												
0,31	-0,46	1,257	0,713																																																																																																																																																																																																																																																												
0,36	-0,51	1,290	0,810																																																																																																																																																																																																																																																												
0,41	-0,60	1,322	0,908																																																																																																																																																																																																																																																												
0,46	-0,66	1,355	1,006																																																																																																																																																																																																																																																												
0,51	-0,71	1,386	1,099																																																																																																																																																																																																																																																												
0,61	-0,86	1,445	1,275																																																																																																																																																																																																																																																												
0,71	-0,94	1,502	1,446																																																																																																																																																																																																																																																												
0,81	-1,06	1,556	1,608																																																																																																																																																																																																																																																												
0,92	-1,14	1,607	1,761																																																																																																																																																																																																																																																												
1,02	-1,23	1,649	1,889																																																																																																																																																																																																																																																												
1,22	-1,37	1,729	2,128																																																																																																																																																																																																																																																												
1,37	-1,46	1,777	2,273																																																																																																																																																																																																																																																												
1,58	-1,57	1,836	2,450																																																																																																																																																																																																																																																												
1,78	-1,66	1,887	2,602																																																																																																																																																																																																																																																												
1,99	-1,71	1,925	2,717																																																																																																																																																																																																																																																												
2,29	-1,80	1,973	2,861																																																																																																																																																																																																																																																												
2,60	-1,86	2,011	2,975																																																																																																																																																																																																																																																												
2,90	-1,88	2,042	3,066																																																																																																																																																																																																																																																												
3,21	-1,91	2,063	3,129																																																																																																																																																																																																																																																												
3,51	-1,91	2,082	3,186																																																																																																																																																																																																																																																												
3,82	-1,91	2,096	3,229																																																																																																																																																																																																																																																												
4,12	-1,88	2,104	3,254																																																																																																																																																																																																																																																												
4,38	-1,86	2,113	3,280																																																																																																																																																																																																																																																												
4,68	-1,83	2,119	3,299																																																																																																																																																																																																																																																												
4,99	-1,77	2,124	3,313																																																																																																																																																																																																																																																												
5,50	-1,69	2,124	3,314																																																																																																																																																																																																																																																												
6,01	-1,60	2,123	3,311																																																																																																																																																																																																																																																												
6,52	-1,51	2,121	3,303																																																																																																																																																																																																																																																												
6,98	-1,43	2,117	3,292																																																																																																																																																																																																																																																												
8,00	-1,20	2,107	3,262																																																																																																																																																																																																																																																												
9,01	-1,00	2,094	3,223																																																																																																																																																																																																																																																												
9,98	-0,83	2,080	3,182																																																																																																																																																																																																																																																												
11,00	-0,66	2,065	3,135																																																																																																																																																																																																																																																												
12,02	-0,49	2,048	3,084																																																																																																																																																																																																																																																												
12,99	-0,34	2,032	3,036																																																																																																																																																																																																																																																												
14,00	-0,20	2,019	2,999																																																																																																																																																																																																																																																												
15,02	-0,09	2,011	2,973																																																																																																																																																																																																																																																												
15,99	0,03	2,003	2,949																																																																																																																																																																																																																																																												
17,01	0,14	1,991	2,915																																																																																																																																																																																																																																																												
17,98	0,23	1,978	2,876																																																																																																																																																																																																																																																												
18,99	0,34	1,970	2,850																																																																																																																																																																																																																																																												
20,01	0,43	1,961	2,823																																																																																																																																																																																																																																																												
20,98	0,51	1,955	2,806																																																																																																																																																																																																																																																												
22,00	0,60	1,943	2,771																																																																																																																																																																																																																																																												
23,02	0,69	1,934	2,743																																																																																																																																																																																																																																																												
23,98	0,77	1,933	2,739																																																																																																																																																																																																																																																												
25,00	0,86	1,925	2,717																																																																																																																																																																																																																																																												
26,02	0,94	1,915	2,685																																																																																																																																																																																																																																																												
26,99	1,00	1,907	2,661																																																																																																																																																																																																																																																												
28,01	1,09	1,898	2,635																																																																																																																																																																																																																																																												
28,98	1,17	1,886	2,600																																																																																																																																																																																																																																																												
29,99	1,26	1,884	2,593																																																																																																																																																																																																																																																												
31,01	1,34	1,878	2,574																																																																																																																																																																																																																																																												
31,98	1,43	1,870	2,551																																																																																																																																																																																																																																																												
32,32	1,46	1,866	2,539																																																																																																																																																																																																																																																												
$p = \frac{\sigma_1 + 2 \times \sigma_3}{3}$$q = \sigma_1 - \sigma_3$ Descripción de la falla Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla, pero sí un gran abultamiento producto del nivel de deformación al cual se llegó durante del corte. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte y la fotografía fue tomada en estado seco para evitar pérdidas de humedad. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																																																															
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																																																											

Tabla F-8: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT: -																																																																																																																																																																																																																																																								
						Pag: 2 de 3																																																																																																																																																																																																																																																								
Fecha realización:		30-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																												
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																												
SPT Nº:		-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																								
Probeta Nº:		2	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																								
Laboratorista:		Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																								
Descripción Visual:					LL	-																																																																																																																																																																																																																																																								
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																								
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																								
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																								
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,64																																																																																																																																																																																																																																																								
	Altura promedio probeta	[cm]	10,04	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	1,856																																																																																																																																																																																																																																																								
	Masa húmeda probeta	[g]	363,06	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,690																																																																																																																																																																																																																																																								
	Humedad promedio probeta	[%]	9,8	Relación de vacíos	-	0,664																																																																																																																																																																																																																																																								
				Saturación	[%]	41,52																																																																																																																																																																																																																																																								
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,96	Área probeta	[cm²]	19,30																																																																																																																																																																																																																																																								
	Altura probeta	[cm]	10,01	Volumen probeta	[cm³]	193,10																																																																																																																																																																																																																																																								
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,103																																																																																																																																																																																																																																																								
	Humedad probeta	[%]	22,8	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,712																																																																																																																																																																																																																																																								
				Relación de vacíos	-	0,642																																																																																																																																																																																																																																																								
Finales	Humedad probeta	[%]	21,7	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,124																																																																																																																																																																																																																																																								
	Relación de vacíos	-	0,611	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,745																																																																																																																																																																																																																																																								
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	10,02																																																																																																																																																																																																																																																								
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	5,946																																																																																																																																																																																																																																																								
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,050	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	2,039																																																																																																																																																																																																																																																								
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	7,985																																																																																																																																																																																																																																																								
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,06</td><td>2,111</td><td>0,216</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,11</td><td>2,187</td><td>0,441</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,17</td><td>2,254</td><td>0,643</td></tr><tr><td>0,20</td><td>-0,26</td><td>2,310</td><td>0,811</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,34</td><td>2,364</td><td>0,974</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,43</td><td>2,417</td><td>1,132</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,49</td><td>2,466</td><td>1,280</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,57</td><td>2,514</td><td>1,424</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,66</td><td>2,560</td><td>1,563</td></tr><tr><td>0,51</td><td>-0,71</td><td>2,603</td><td>1,692</td></tr><tr><td>0,61</td><td>-0,86</td><td>2,683</td><td>1,931</td></tr><tr><td>0,72</td><td>-1,00</td><td>2,756</td><td>2,150</td></tr><tr><td>0,82</td><td>-1,11</td><td>2,826</td><td>2,360</td></tr><tr><td>0,92</td><td>-1,26</td><td>2,890</td><td>2,551</td></tr><tr><td>1,02</td><td>-1,37</td><td>2,950</td><td>2,731</td></tr><tr><td>1,18</td><td>-1,54</td><td>3,030</td><td>2,973</td></tr><tr><td>1,38</td><td>-1,77</td><td>3,127</td><td>3,261</td></tr><tr><td>1,59</td><td>-1,97</td><td>3,211</td><td>3,515</td></tr><tr><td>1,79</td><td>-2,17</td><td>3,286</td><td>3,740</td></tr><tr><td>2,00</td><td>-2,37</td><td>3,353</td><td>3,940</td></tr><tr><td>2,30</td><td>-2,63</td><td>3,441</td><td>4,204</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-2,88</td><td>3,517</td><td>4,432</td></tr><tr><td>2,92</td><td>-3,08</td><td>3,583</td><td>4,631</td></tr><tr><td>3,22</td><td>-3,28</td><td>3,642</td><td>4,809</td></tr><tr><td>3,48</td><td>-3,43</td><td>3,685</td><td>4,936</td></tr><tr><td>3,78</td><td>-3,60</td><td>3,729</td><td>5,070</td></tr><tr><td>4,09</td><td>-3,74</td><td>3,769</td><td>5,188</td></tr><tr><td>4,40</td><td>-3,86</td><td>3,803</td><td>5,290</td></tr><tr><td>4,71</td><td>-3,97</td><td>3,834</td><td>5,383</td></tr><tr><td>5,01</td><td>-4,08</td><td>3,863</td><td>5,470</td></tr><tr><td>5,52</td><td>-4,23</td><td>3,903</td><td>5,591</td></tr><tr><td>5,98</td><td>-4,34</td><td>3,930</td><td>5,672</td></tr><tr><td>6,50</td><td>-4,46</td><td>3,956</td><td>5,749</td></tr><tr><td>7,01</td><td>-4,51</td><td>3,979</td><td>5,818</td></tr><tr><td>7,98</td><td>-4,63</td><td>4,005</td><td>5,897</td></tr><tr><td>9,00</td><td>-4,68</td><td>4,021</td><td>5,946</td></tr><tr><td>10,02</td><td>-4,68</td><td>4,021</td><td>5,946</td></tr><tr><td>11,00</td><td>-4,68</td><td>4,021</td><td>5,944</td></tr><tr><td>12,02</td><td>-4,66</td><td>4,015</td><td>5,927</td></tr><tr><td>12,99</td><td>-4,60</td><td>4,004</td><td>5,894</td></tr><tr><td>14,01</td><td>-4,57</td><td>3,986</td><td>5,841</td></tr><tr><td>14,99</td><td>-4,51</td><td>3,967</td><td>5,782</td></tr><tr><td>16,01</td><td>-4,46</td><td>3,944</td><td>5,715</td></tr><tr><td>16,98</td><td>-4,37</td><td>3,927</td><td>5,662</td></tr><tr><td>18,00</td><td>-4,31</td><td>3,906</td><td>5,599</td></tr><tr><td>19,03</td><td>-4,26</td><td>3,884</td><td>5,535</td></tr><tr><td>20,00</td><td>-4,20</td><td>3,868</td><td>5,486</td></tr><tr><td>21,02</td><td>-4,14</td><td>3,836</td><td>5,390</td></tr><tr><td>21,99</td><td>-4,11</td><td>3,814</td><td>5,323</td></tr><tr><td>23,01</td><td>-4,06</td><td>3,795</td><td>5,265</td></tr><tr><td>23,99</td><td>-4,00</td><td>3,780</td><td>5,223</td></tr><tr><td>25,01</td><td>-3,94</td><td>3,758</td><td>5,157</td></tr><tr><td>25,98</td><td>-3,91</td><td>3,739</td><td>5,100</td></tr><tr><td>27,00</td><td>-3,86</td><td>3,721</td><td>5,044</td></tr><tr><td>27,98</td><td>-3,83</td><td>3,702</td><td>4,989</td></tr><tr><td>29,00</td><td>-3,77</td><td>3,683</td><td>4,929</td></tr><tr><td>30,02</td><td>-3,74</td><td>3,663</td><td>4,870</td></tr><tr><td>30,99</td><td>-3,71</td><td>3,645</td><td>4,817</td></tr><tr><td>32,02</td><td>-3,66</td><td>3,628</td><td>4,765</td></tr><tr><td>32,58</td><td>-3,66</td><td>3,617</td><td>4,732</td></tr></table>							Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	2,039	0,000	0,05	-0,06	2,111	0,216	0,10	-0,11	2,187	0,441	0,15	-0,17	2,254	0,643	0,20	-0,26	2,310	0,811	0,26	-0,34	2,364	0,974	0,31	-0,43	2,417	1,132	0,36	-0,49	2,466	1,280	0,41	-0,57	2,514	1,424	0,46	-0,66	2,560	1,563	0,51	-0,71	2,603	1,692	0,61	-0,86	2,683	1,931	0,72	-1,00	2,756	2,150	0,82	-1,11	2,826	2,360	0,92	-1,26	2,890	2,551	1,02	-1,37	2,950	2,731	1,18	-1,54	3,030	2,973	1,38	-1,77	3,127	3,261	1,59	-1,97	3,211	3,515	1,79	-2,17	3,286	3,740	2,00	-2,37	3,353	3,940	2,30	-2,63	3,441	4,204	2,61	-2,88	3,517	4,432	2,92	-3,08	3,583	4,631	3,22	-3,28	3,642	4,809	3,48	-3,43	3,685	4,936	3,78	-3,60	3,729	5,070	4,09	-3,74	3,769	5,188	4,40	-3,86	3,803	5,290	4,71	-3,97	3,834	5,383	5,01	-4,08	3,863	5,470	5,52	-4,23	3,903	5,591	5,98	-4,34	3,930	5,672	6,50	-4,46	3,956	5,749	7,01	-4,51	3,979	5,818	7,98	-4,63	4,005	5,897	9,00	-4,68	4,021	5,946	10,02	-4,68	4,021	5,946	11,00	-4,68	4,021	5,944	12,02	-4,66	4,015	5,927	12,99	-4,60	4,004	5,894	14,01	-4,57	3,986	5,841	14,99	-4,51	3,967	5,782	16,01	-4,46	3,944	5,715	16,98	-4,37	3,927	5,662	18,00	-4,31	3,906	5,599	19,03	-4,26	3,884	5,535	20,00	-4,20	3,868	5,486	21,02	-4,14	3,836	5,390	21,99	-4,11	3,814	5,323	23,01	-4,06	3,795	5,265	23,99	-4,00	3,780	5,223	25,01	-3,94	3,758	5,157	25,98	-3,91	3,739	5,100	27,00	-3,86	3,721	5,044	27,98	-3,83	3,702	4,989	29,00	-3,77	3,683	4,929	30,02	-3,74	3,663	4,870	30,99	-3,71	3,645	4,817	32,02	-3,66	3,628	4,765	32,58	-3,66	3,617	4,732
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																											
0,00	0,00	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																																																											
0,05	-0,06	2,111	0,216																																																																																																																																																																																																																																																											
0,10	-0,11	2,187	0,441																																																																																																																																																																																																																																																											
0,15	-0,17	2,254	0,643																																																																																																																																																																																																																																																											
0,20	-0,26	2,310	0,811																																																																																																																																																																																																																																																											
0,26	-0,34	2,364	0,974																																																																																																																																																																																																																																																											
0,31	-0,43	2,417	1,132																																																																																																																																																																																																																																																											
0,36	-0,49	2,466	1,280																																																																																																																																																																																																																																																											
0,41	-0,57	2,514	1,424																																																																																																																																																																																																																																																											
0,46	-0,66	2,560	1,563																																																																																																																																																																																																																																																											
0,51	-0,71	2,603	1,692																																																																																																																																																																																																																																																											
0,61	-0,86	2,683	1,931																																																																																																																																																																																																																																																											
0,72	-1,00	2,756	2,150																																																																																																																																																																																																																																																											
0,82	-1,11	2,826	2,360																																																																																																																																																																																																																																																											
0,92	-1,26	2,890	2,551																																																																																																																																																																																																																																																											
1,02	-1,37	2,950	2,731																																																																																																																																																																																																																																																											
1,18	-1,54	3,030	2,973																																																																																																																																																																																																																																																											
1,38	-1,77	3,127	3,261																																																																																																																																																																																																																																																											
1,59	-1,97	3,211	3,515																																																																																																																																																																																																																																																											
1,79	-2,17	3,286	3,740																																																																																																																																																																																																																																																											
2,00	-2,37	3,353	3,940																																																																																																																																																																																																																																																											
2,30	-2,63	3,441	4,204																																																																																																																																																																																																																																																											
2,61	-2,88	3,517	4,432																																																																																																																																																																																																																																																											
2,92	-3,08	3,583	4,631																																																																																																																																																																																																																																																											
3,22	-3,28	3,642	4,809																																																																																																																																																																																																																																																											
3,48	-3,43	3,685	4,936																																																																																																																																																																																																																																																											
3,78	-3,60	3,729	5,070																																																																																																																																																																																																																																																											
4,09	-3,74	3,769	5,188																																																																																																																																																																																																																																																											
4,40	-3,86	3,803	5,290																																																																																																																																																																																																																																																											
4,71	-3,97	3,834	5,383																																																																																																																																																																																																																																																											
5,01	-4,08	3,863	5,470																																																																																																																																																																																																																																																											
5,52	-4,23	3,903	5,591																																																																																																																																																																																																																																																											
5,98	-4,34	3,930	5,672																																																																																																																																																																																																																																																											
6,50	-4,46	3,956	5,749																																																																																																																																																																																																																																																											
7,01	-4,51	3,979	5,818																																																																																																																																																																																																																																																											
7,98	-4,63	4,005	5,897																																																																																																																																																																																																																																																											
9,00	-4,68	4,021	5,946																																																																																																																																																																																																																																																											
10,02	-4,68	4,021	5,946																																																																																																																																																																																																																																																											
11,00	-4,68	4,021	5,944																																																																																																																																																																																																																																																											
12,02	-4,66	4,015	5,927																																																																																																																																																																																																																																																											
12,99	-4,60	4,004	5,894																																																																																																																																																																																																																																																											
14,01	-4,57	3,986	5,841																																																																																																																																																																																																																																																											
14,99	-4,51	3,967	5,782																																																																																																																																																																																																																																																											
16,01	-4,46	3,944	5,715																																																																																																																																																																																																																																																											
16,98	-4,37	3,927	5,662																																																																																																																																																																																																																																																											
18,00	-4,31	3,906	5,599																																																																																																																																																																																																																																																											
19,03	-4,26	3,884	5,535																																																																																																																																																																																																																																																											
20,00	-4,20	3,868	5,486																																																																																																																																																																																																																																																											
21,02	-4,14	3,836	5,390																																																																																																																																																																																																																																																											
21,99	-4,11	3,814	5,323																																																																																																																																																																																																																																																											
23,01	-4,06	3,795	5,265																																																																																																																																																																																																																																																											
23,99	-4,00	3,780	5,223																																																																																																																																																																																																																																																											
25,01	-3,94	3,758	5,157																																																																																																																																																																																																																																																											
25,98	-3,91	3,739	5,100																																																																																																																																																																																																																																																											
27,00	-3,86	3,721	5,044																																																																																																																																																																																																																																																											
27,98	-3,83	3,702	4,989																																																																																																																																																																																																																																																											
29,00	-3,77	3,683	4,929																																																																																																																																																																																																																																																											
30,02	-3,74	3,663	4,870																																																																																																																																																																																																																																																											
30,99	-3,71	3,645	4,817																																																																																																																																																																																																																																																											
32,02	-3,66	3,628	4,765																																																																																																																																																																																																																																																											
32,58	-3,66	3,617	4,732																																																																																																																																																																																																																																																											
Esfuerzo Desviatorio v/s Deformación Axial Δ Volumétrica v/s Deformación Axial Trayectoria de Tensiones Efectivas Descripción de la falla Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla, pero sí un gran abultamiento producto del nivel de deformación al cual se llegó durante del corte. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte y la fotografía fue tomada en estado seco para evitar pérdidas de humedad. Se considera corrección por el uso de membrana.																																																																																																																																																																																																																																																														
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																																																										

Tabla F-9: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 71 [%] – $\rho_s = 1,700 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT: -																																																																																																																																																																																																																																																					
						Pag: 3 de 3																																																																																																																																																																																																																																																					
Fecha realización:		04-01-2016																																																																																																																																																																																																																																																									
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																									
SPT Nº:	-	Horizonte:	-	Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																						
Probeta Nº:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																						
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																						
Descripción Visual:	-			LL	-																																																																																																																																																																																																																																																						
				LP	-																																																																																																																																																																																																																																																						
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																						
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm ²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																					
	Díámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm ³]	196,34																																																																																																																																																																																																																																																					
	Altura promedio probeta	[cm]	10,08	Densidad húmeda probeta	[g/cm ³]	1,850																																																																																																																																																																																																																																																					
	Masa húmeda probeta	[g]	363,17	Densidad seca probeta	[g/cm ³]	1,688																																																																																																																																																																																																																																																					
	Humedad promedio probeta	[%]	9,6	Relación de vacíos	-	0,666																																																																																																																																																																																																																																																					
				Saturación	[%]	40,39																																																																																																																																																																																																																																																					
Después de la consolidación	Díámetro probeta	[cm]	5,03	Área probeta	[cm ²]	19,87																																																																																																																																																																																																																																																					
	Altura probeta	[cm]	9,96	Volumen probeta	[cm ³]	197,81																																																																																																																																																																																																																																																					
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm ³]	2,081																																																																																																																																																																																																																																																					
	Humedad probeta	[%]	24,1	Densidad seca probeta	[g/cm ³]	1,678																																																																																																																																																																																																																																																					
			Relación de vacíos	-	0,676																																																																																																																																																																																																																																																						
Finales	Humedad probeta	[%]	21,9	Densidad húmeda probeta	[g/cm ³]	2,121																																																																																																																																																																																																																																																					
	Relación de vacíos	-	0,617	Densidad seca probeta	[g/cm ³]	1,740																																																																																																																																																																																																																																																					
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	13,98																																																																																																																																																																																																																																																					
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm ²]	8,106																																																																																																																																																																																																																																																					
	Contrapresión total	[kgf/cm ²]	2,039	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm ²]	3,059																																																																																																																																																																																																																																																					
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm ²]	3,059	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm ²]	11,165																																																																																																																																																																																																																																																					
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>3.059</td><td>0.000</td></tr><tr><td>0.05</td><td>-0.03</td><td>3.126</td><td>0.200</td></tr><tr><td>0.10</td><td>-0.09</td><td>3.235</td><td>0.527</td></tr><tr><td>0.15</td><td>-0.17</td><td>3.312</td><td>0.760</td></tr><tr><td>0.21</td><td>-0.26</td><td>3.376</td><td>0.951</td></tr><tr><td>0.26</td><td>-0.34</td><td>3.433</td><td>1.123</td></tr><tr><td>0.31</td><td>-0.43</td><td>3.486</td><td>1.281</td></tr><tr><td>0.36</td><td>-0.51</td><td>3.534</td><td>1.425</td></tr><tr><td>0.41</td><td>-0.57</td><td>3.581</td><td>1.565</td></tr><tr><td>0.46</td><td>-0.66</td><td>3.624</td><td>1.695</td></tr><tr><td>0.51</td><td>-0.74</td><td>3.666</td><td>1.821</td></tr><tr><td>0.62</td><td>-0.91</td><td>3.746</td><td>2.062</td></tr><tr><td>0.72</td><td>-1.06</td><td>3.822</td><td>2.289</td></tr><tr><td>0.82</td><td>-1.20</td><td>3.892</td><td>2.498</td></tr><tr><td>0.93</td><td>-1.34</td><td>3.961</td><td>2.706</td></tr><tr><td>0.98</td><td>-1.43</td><td>3.994</td><td>2.804</td></tr><tr><td>1.18</td><td>-1.71</td><td>4.114</td><td>3.164</td></tr><tr><td>1.39</td><td>-2.00</td><td>4.224</td><td>3.496</td></tr><tr><td>1.59</td><td>-2.26</td><td>4.324</td><td>3.795</td></tr><tr><td>1.80</td><td>-2.51</td><td>4.417</td><td>4.074</td></tr><tr><td>2.00</td><td>-2.74</td><td>4.504</td><td>4.334</td></tr><tr><td>2.31</td><td>-3.08</td><td>4.620</td><td>4.684</td></tr><tr><td>2.62</td><td>-3.43</td><td>4.726</td><td>5.000</td></tr><tr><td>2.88</td><td>-3.66</td><td>4.804</td><td>5.236</td></tr><tr><td>3.19</td><td>-3.94</td><td>4.893</td><td>5.503</td></tr><tr><td>3.50</td><td>-4.23</td><td>4.974</td><td>5.745</td></tr><tr><td>3.80</td><td>-4.46</td><td>5.047</td><td>5.962</td></tr><tr><td>4.11</td><td>-4.71</td><td>5.114</td><td>6.166</td></tr><tr><td>4.42</td><td>-4.91</td><td>5.173</td><td>6.343</td></tr><tr><td>4.68</td><td>-5.08</td><td>5.223</td><td>6.490</td></tr><tr><td>4.99</td><td>-5.28</td><td>5.277</td><td>6.653</td></tr><tr><td>5.50</td><td>-5.57</td><td>5.354</td><td>6.884</td></tr><tr><td>6.01</td><td>-5.83</td><td>5.420</td><td>7.084</td></tr><tr><td>6.48</td><td>-6.05</td><td>5.474</td><td>7.245</td></tr><tr><td>6.99</td><td>-6.25</td><td>5.522</td><td>7.390</td></tr><tr><td>8.02</td><td>-6.60</td><td>5.603</td><td>7.633</td></tr><tr><td>9.00</td><td>-6.85</td><td>5.662</td><td>7.809</td></tr><tr><td>10.02</td><td>-7.05</td><td>5.707</td><td>7.943</td></tr><tr><td>11.00</td><td>-7.20</td><td>5.733</td><td>8.023</td></tr><tr><td>11.98</td><td>-7.31</td><td>5.748</td><td>8.068</td></tr><tr><td>13.00</td><td>-7.37</td><td>5.759</td><td>8.098</td></tr><tr><td>13.98</td><td>-7.43</td><td>5.761</td><td>8.106</td></tr><tr><td>15.01</td><td>-7.45</td><td>5.753</td><td>8.081</td></tr><tr><td>15.99</td><td>-7.45</td><td>5.741</td><td>8.045</td></tr><tr><td>17.01</td><td>-7.45</td><td>5.732</td><td>8.019</td></tr><tr><td>17.99</td><td>-7.45</td><td>5.716</td><td>7.972</td></tr><tr><td>19.02</td><td>-7.45</td><td>5.696</td><td>7.911</td></tr><tr><td>19.99</td><td>-7.43</td><td>5.678</td><td>7.857</td></tr><tr><td>21.02</td><td>-7.43</td><td>5.654</td><td>7.786</td></tr><tr><td>22.00</td><td>-7.40</td><td>5.629</td><td>7.711</td></tr><tr><td>22.98</td><td>-7.37</td><td>5.605</td><td>7.638</td></tr><tr><td>24.00</td><td>-7.34</td><td>5.577</td><td>7.553</td></tr><tr><td>24.98</td><td>-7.31</td><td>5.547</td><td>7.465</td></tr><tr><td>26.01</td><td>-7.25</td><td>5.520</td><td>7.384</td></tr><tr><td>26.99</td><td>-7.23</td><td>5.496</td><td>7.309</td></tr><tr><td>28.01</td><td>-7.20</td><td>5.464</td><td>7.214</td></tr><tr><td>28.99</td><td>-7.17</td><td>5.440</td><td>7.142</td></tr><tr><td>30.02</td><td>-7.14</td><td>5.411</td><td>7.056</td></tr><tr><td>30.99</td><td>-7.08</td><td>5.376</td><td>6.950</td></tr><tr><td>32.00</td><td>-7.05</td><td>5.351</td><td>6.876</td></tr></tbody></table> Falla por deformación. No se aprecia el plano de falla, pero sí un gran abultamiento producto del nivel de deformación al cual se llegó durante del corte. La probeta de la fotografía fue sometida a una nueva consolidación una vez finalizado el corte y la fotografía fue tomada en estado seco para evitar pérdidas de humedad. Se considera corrección por el uso de membrana.								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm ²]	q [kgf/cm ²]	0.00	0.00	3.059	0.000	0.05	-0.03	3.126	0.200	0.10	-0.09	3.235	0.527	0.15	-0.17	3.312	0.760	0.21	-0.26	3.376	0.951	0.26	-0.34	3.433	1.123	0.31	-0.43	3.486	1.281	0.36	-0.51	3.534	1.425	0.41	-0.57	3.581	1.565	0.46	-0.66	3.624	1.695	0.51	-0.74	3.666	1.821	0.62	-0.91	3.746	2.062	0.72	-1.06	3.822	2.289	0.82	-1.20	3.892	2.498	0.93	-1.34	3.961	2.706	0.98	-1.43	3.994	2.804	1.18	-1.71	4.114	3.164	1.39	-2.00	4.224	3.496	1.59	-2.26	4.324	3.795	1.80	-2.51	4.417	4.074	2.00	-2.74	4.504	4.334	2.31	-3.08	4.620	4.684	2.62	-3.43	4.726	5.000	2.88	-3.66	4.804	5.236	3.19	-3.94	4.893	5.503	3.50	-4.23	4.974	5.745	3.80	-4.46	5.047	5.962	4.11	-4.71	5.114	6.166	4.42	-4.91	5.173	6.343	4.68	-5.08	5.223	6.490	4.99	-5.28	5.277	6.653	5.50	-5.57	5.354	6.884	6.01	-5.83	5.420	7.084	6.48	-6.05	5.474	7.245	6.99	-6.25	5.522	7.390	8.02	-6.60	5.603	7.633	9.00	-6.85	5.662	7.809	10.02	-7.05	5.707	7.943	11.00	-7.20	5.733	8.023	11.98	-7.31	5.748	8.068	13.00	-7.37	5.759	8.098	13.98	-7.43	5.761	8.106	15.01	-7.45	5.753	8.081	15.99	-7.45	5.741	8.045	17.01	-7.45	5.732	8.019	17.99	-7.45	5.716	7.972	19.02	-7.45	5.696	7.911	19.99	-7.43	5.678	7.857	21.02	-7.43	5.654	7.786	22.00	-7.40	5.629	7.711	22.98	-7.37	5.605	7.638	24.00	-7.34	5.577	7.553	24.98	-7.31	5.547	7.465	26.01	-7.25	5.520	7.384	26.99	-7.23	5.496	7.309	28.01	-7.20	5.464	7.214	28.99	-7.17	5.440	7.142	30.02	-7.14	5.411	7.056	30.99	-7.08	5.376	6.950	32.00	-7.05	5.351	6.876
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm ²]	q [kgf/cm ²]																																																																																																																																																																																																																																																								
0.00	0.00	3.059	0.000																																																																																																																																																																																																																																																								
0.05	-0.03	3.126	0.200																																																																																																																																																																																																																																																								
0.10	-0.09	3.235	0.527																																																																																																																																																																																																																																																								
0.15	-0.17	3.312	0.760																																																																																																																																																																																																																																																								
0.21	-0.26	3.376	0.951																																																																																																																																																																																																																																																								
0.26	-0.34	3.433	1.123																																																																																																																																																																																																																																																								
0.31	-0.43	3.486	1.281																																																																																																																																																																																																																																																								
0.36	-0.51	3.534	1.425																																																																																																																																																																																																																																																								
0.41	-0.57	3.581	1.565																																																																																																																																																																																																																																																								
0.46	-0.66	3.624	1.695																																																																																																																																																																																																																																																								
0.51	-0.74	3.666	1.821																																																																																																																																																																																																																																																								
0.62	-0.91	3.746	2.062																																																																																																																																																																																																																																																								
0.72	-1.06	3.822	2.289																																																																																																																																																																																																																																																								
0.82	-1.20	3.892	2.498																																																																																																																																																																																																																																																								
0.93	-1.34	3.961	2.706																																																																																																																																																																																																																																																								
0.98	-1.43	3.994	2.804																																																																																																																																																																																																																																																								
1.18	-1.71	4.114	3.164																																																																																																																																																																																																																																																								
1.39	-2.00	4.224	3.496																																																																																																																																																																																																																																																								
1.59	-2.26	4.324	3.795																																																																																																																																																																																																																																																								
1.80	-2.51	4.417	4.074																																																																																																																																																																																																																																																								
2.00	-2.74	4.504	4.334																																																																																																																																																																																																																																																								
2.31	-3.08	4.620	4.684																																																																																																																																																																																																																																																								
2.62	-3.43	4.726	5.000																																																																																																																																																																																																																																																								
2.88	-3.66	4.804	5.236																																																																																																																																																																																																																																																								
3.19	-3.94	4.893	5.503																																																																																																																																																																																																																																																								
3.50	-4.23	4.974	5.745																																																																																																																																																																																																																																																								
3.80	-4.46	5.047	5.962																																																																																																																																																																																																																																																								
4.11	-4.71	5.114	6.166																																																																																																																																																																																																																																																								
4.42	-4.91	5.173	6.343																																																																																																																																																																																																																																																								
4.68	-5.08	5.223	6.490																																																																																																																																																																																																																																																								
4.99	-5.28	5.277	6.653																																																																																																																																																																																																																																																								
5.50	-5.57	5.354	6.884																																																																																																																																																																																																																																																								
6.01	-5.83	5.420	7.084																																																																																																																																																																																																																																																								
6.48	-6.05	5.474	7.245																																																																																																																																																																																																																																																								
6.99	-6.25	5.522	7.390																																																																																																																																																																																																																																																								
8.02	-6.60	5.603	7.633																																																																																																																																																																																																																																																								
9.00	-6.85	5.662	7.809																																																																																																																																																																																																																																																								
10.02	-7.05	5.707	7.943																																																																																																																																																																																																																																																								
11.00	-7.20	5.733	8.023																																																																																																																																																																																																																																																								
11.98	-7.31	5.748	8.068																																																																																																																																																																																																																																																								
13.00	-7.37	5.759	8.098																																																																																																																																																																																																																																																								
13.98	-7.43	5.761	8.106																																																																																																																																																																																																																																																								
15.01	-7.45	5.753	8.081																																																																																																																																																																																																																																																								
15.99	-7.45	5.741	8.045																																																																																																																																																																																																																																																								
17.01	-7.45	5.732	8.019																																																																																																																																																																																																																																																								
17.99	-7.45	5.716	7.972																																																																																																																																																																																																																																																								
19.02	-7.45	5.696	7.911																																																																																																																																																																																																																																																								
19.99	-7.43	5.678	7.857																																																																																																																																																																																																																																																								
21.02	-7.43	5.654	7.786																																																																																																																																																																																																																																																								
22.00	-7.40	5.629	7.711																																																																																																																																																																																																																																																								
22.98	-7.37	5.605	7.638																																																																																																																																																																																																																																																								
24.00	-7.34	5.577	7.553																																																																																																																																																																																																																																																								
24.98	-7.31	5.547	7.465																																																																																																																																																																																																																																																								
26.01	-7.25	5.520	7.384																																																																																																																																																																																																																																																								
26.99	-7.23	5.496	7.309																																																																																																																																																																																																																																																								
28.01	-7.20	5.464	7.214																																																																																																																																																																																																																																																								
28.99	-7.17	5.440	7.142																																																																																																																																																																																																																																																								
30.02	-7.14	5.411	7.056																																																																																																																																																																																																																																																								
30.99	-7.08	5.376	6.950																																																																																																																																																																																																																																																								
32.00	-7.05	5.351	6.876																																																																																																																																																																																																																																																								
REG-FE-65		Rev 1		Fecha: 01/02/2016																																																																																																																																																																																																																																																							

Tabla F-10: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (1/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
						Pag:	1 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Fecha realización:	09-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Proyecto:	Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
SPT Nº:	-	Horizonte:		Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Probeta Nº:	1	Tipo de Probeta:	Remoldeada	Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Descripción Visual:				LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura promedio probeta	[cm]	10,05	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,071																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Masa húmeda probeta	[g]	405,55	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,891																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad promedio probeta	[%]	9,5	Relación de vacíos		0,487																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
				Saturación	[%]	54,92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,99	Área probeta	[cm²]	19,57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Altura probeta	[cm]	9,98	Volumen probeta	[cm³]	195,32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,215																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Humedad probeta	[%]	17,5	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,886																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
				Relación de vacíos		0,491																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Finales	Humedad probeta	[%]	19,1	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,178																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Relación de vacíos	-	0,538	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,829																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,99	Deformación axial en la falla	[%]	3,18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	6,052																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,325	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	1,020																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	1,020	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	7,071																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<table><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>1,020</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>1,078</td><td>0,175</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,09</td><td>1,117</td><td>0,293</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,17</td><td>1,154</td><td>0,402</td></tr><tr><td>0,21</td><td>-0,23</td><td>1,187</td><td>0,501</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,31</td><td>1,220</td><td>0,600</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,40</td><td>1,251</td><td>0,695</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,46</td><td>1,286</td><td>0,798</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,54</td><td>1,320</td><td>0,902</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,57</td><td>1,355</td><td>1,006</td></tr><tr><td>0,51</td><td>-0,66</td><td>1,391</td><td>1,114</td></tr><tr><td>0,62</td><td>-0,77</td><td>1,465</td><td>1,336</td></tr><tr><td>0,72</td><td>-0,86</td><td>1,546</td><td>1,580</td></tr><tr><td>0,82</td><td>-0,97</td><td>1,633</td><td>1,839</td></tr><tr><td>0,92</td><td>-1,03</td><td>1,725</td><td>2,115</td></tr><tr><td>1,03</td><td>-1,09</td><td>1,822</td><td>2,406</td></tr><tr><td>1,18</td><td>-1,14</td><td>1,974</td><td>2,864</td></tr><tr><td>1,38</td><td>-1,20</td><td>2,190</td><td>3,511</td></tr><tr><td>1,59</td><td>-1,17</td><td>2,395</td><td>4,127</td></tr><tr><td>1,79</td><td>-1,06</td><td>2,582</td><td>4,686</td></tr><tr><td>2,00</td><td>-0,89</td><td>2,732</td><td>5,137</td></tr><tr><td>2,31</td><td>-0,54</td><td>2,892</td><td>5,617</td></tr><tr><td>2,62</td><td>-0,11</td><td>2,986</td><td>5,900</td></tr><tr><td>2,92</td><td>0,34</td><td>3,030</td><td>6,032</td></tr><tr><td>3,18</td><td>0,77</td><td>3,037</td><td>6,052</td></tr><tr><td>3,49</td><td>1,29</td><td>3,016</td><td>5,988</td></tr><tr><td>3,79</td><td>1,80</td><td>2,978</td><td>5,876</td></tr><tr><td>4,10</td><td>2,28</td><td>2,937</td><td>5,752</td></tr><tr><td>4,41</td><td>2,77</td><td>2,893</td><td>5,620</td></tr><tr><td>4,72</td><td>3,23</td><td>2,842</td><td>5,468</td></tr><tr><td>5,03</td><td>3,66</td><td>2,785</td><td>5,296</td></tr><tr><td>5,49</td><td>4,17</td><td>2,672</td><td>4,957</td></tr><tr><td>6,00</td><td>4,63</td><td>2,522</td><td>4,508</td></tr><tr><td>6,51</td><td>4,91</td><td>2,409</td><td>4,168</td></tr><tr><td>7,03</td><td>5,11</td><td>2,322</td><td>3,907</td></tr><tr><td>8,00</td><td>5,34</td><td>2,234</td><td>3,642</td></tr><tr><td>8,97</td><td>5,51</td><td>2,193</td><td>3,521</td></tr><tr><td>10,00</td><td>5,65</td><td>2,163</td><td>3,429</td></tr><tr><td>10,97</td><td>5,80</td><td>2,144</td><td>3,374</td></tr><tr><td>12,00</td><td>5,91</td><td>2,127</td><td>3,321</td></tr><tr><td>13,03</td><td>6,05</td><td>2,128</td><td>3,324</td></tr><tr><td>13,90</td><td>6,17</td><td>2,134</td><td>3,344</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td></tr></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	1,020	0,000	0,05	-0,03	1,078	0,175	0,10	-0,09	1,117	0,293	0,15	-0,17	1,154	0,402	0,21	-0,23	1,187	0,501	0,26	-0,31	1,220	0,600	0,31	-0,40	1,251	0,695	0,36	-0,46	1,286	0,798	0,41	-0,54	1,320	0,902	0,46	-0,57	1,355	1,006	0,51	-0,66	1,391	1,114	0,62	-0,77	1,465	1,336	0,72	-0,86	1,546	1,580	0,82	-0,97	1,633	1,839	0,92	-1,03	1,725	2,115	1,03	-1,09	1,822	2,406	1,18	-1,14	1,974	2,864	1,38	-1,20	2,190	3,511	1,59	-1,17	2,395	4,127	1,79	-1,06	2,582	4,686	2,00	-0,89	2,732	5,137	2,31	-0,54	2,892	5,617	2,62	-0,11	2,986	5,900	2,92	0,34	3,030	6,032	3,18	0,77	3,037	6,052	3,49	1,29	3,016	5,988	3,79	1,80	2,978	5,876	4,10	2,28	2,937	5,752	4,41	2,77	2,893	5,620	4,72	3,23	2,842	5,468	5,03	3,66	2,785	5,296	5,49	4,17	2,672	4,957	6,00	4,63	2,522	4,508	6,51	4,91	2,409	4,168	7,03	5,11	2,322	3,907	8,00	5,34	2,234	3,642	8,97	5,51	2,193	3,521	10,00	5,65	2,163	3,429	10,97	5,80	2,144	3,374	12,00	5,91	2,127	3,321	13,03	6,05	2,128	3,324	13,90	6,17	2,134	3,344																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,00	0,00	1,020	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,05	-0,03	1,078	0,175																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,10	-0,09	1,117	0,293																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,15	-0,17	1,154	0,402																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,21	-0,23	1,187	0,501																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,26	-0,31	1,220	0,600																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,31	-0,40	1,251	0,695																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,36	-0,46	1,286	0,798																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,41	-0,54	1,320	0,902																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,46	-0,57	1,355	1,006																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,51	-0,66	1,391	1,114																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,62	-0,77	1,465	1,336																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,72	-0,86	1,546	1,580																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,82	-0,97	1,633	1,839																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,92	-1,03	1,725	2,115																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,03	-1,09	1,822	2,406																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,18	-1,14	1,974	2,864																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,38	-1,20	2,190	3,511																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,59	-1,17	2,395	4,127																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1,79	-1,06	2,582	4,686																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,00	-0,89	2,732	5,137																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,31	-0,54	2,892	5,617																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,62	-0,11	2,986	5,900																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2,92	0,34	3,030	6,032																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,18	0,77	3,037	6,052																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,49	1,29	3,016	5,988																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3,79	1,80	2,978	5,876																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,10	2,28	2,937	5,752																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,41	2,77	2,893	5,620																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4,72	3,23	2,842	5,468																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,03	3,66	2,785	5,296																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5,49	4,17	2,672	4,957																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,00	4,63	2,522	4,508																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6,51	4,91	2,409	4,168																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
7,03	5,11	2,322	3,907																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8,00	5,34	2,234	3,642																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8,97	5,51	2,193	3,521																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
10,00	5,65	2,163	3,429																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
10,97	5,80	2,144	3,374																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
12,00	5,91	2,127	3,321																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
13,03	6,05	2,128	3,324																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
13,90	6,17	2,134	3,344																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Tabla F-11: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (2/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
						Pag:	2 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Fecha realización:		10-12-2015																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
SPT Nº:	-	Horizonte:				Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Probeta Nº:	2	Tipo de Probeta:	Remoldeada			Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Laboratorista:	Rodolfo Rojas M.					Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Descripción Visual:						LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
						LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
						IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	196,07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Alura promedio probeta	[cm]	10,07	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,068																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Masa húmeda probeta	[g]	405,47	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,888																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Humedad promedio probeta	[%]	9,5	Relación de vacíos		0,489																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
				Saturación	[%]	54,81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	5,04	Área probeta	[cm²]	19,93																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Alura probeta	[cm]	10,01	Volumen probeta	[cm³]	199,47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,182																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Humedad probeta	[%]	19,0	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,834																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
				Relación de vacíos	-	0,533																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Finales	Humedad probeta	[%]	19,7	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,165																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Relación de vacíos	-	0,555	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,808																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	3,78																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	8,366																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,325	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	2,039																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	2,039	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	10,405																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>2,039</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,06</td><td>2,168</td><td>0,386</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,11</td><td>2,250</td><td>0,632</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,17</td><td>2,324</td><td>0,855</td></tr><tr><td>0,20</td><td>-0,26</td><td>2,393</td><td>1,059</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,31</td><td>2,461</td><td>1,264</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,37</td><td>2,525</td><td>1,458</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,46</td><td>2,592</td><td>1,658</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,51</td><td>2,660</td><td>1,862</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,57</td><td>2,726</td><td>2,061</td></tr><tr><td>0,51</td><td>-0,63</td><td>2,793</td><td>2,260</td></tr><tr><td>0,61</td><td>-0,71</td><td>2,925</td><td>2,657</td></tr><tr><td>0,72</td><td>-0,80</td><td>3,059</td><td>3,059</td></tr><tr><td>0,82</td><td>-0,89</td><td>3,197</td><td>3,474</td></tr><tr><td>0,92</td><td>-0,94</td><td>3,335</td><td>3,888</td></tr><tr><td>1,02</td><td>-1,00</td><td>3,472</td><td>4,297</td></tr><tr><td>1,18</td><td>-1,09</td><td>3,667</td><td>4,883</td></tr><tr><td>1,38</td><td>-1,11</td><td>3,905</td><td>5,598</td></tr><tr><td>1,58</td><td>-1,14</td><td>4,112</td><td>6,217</td></tr><tr><td>1,79</td><td>-1,14</td><td>4,283</td><td>6,732</td></tr><tr><td>1,99</td><td>-1,09</td><td>4,423</td><td>7,151</td></tr><tr><td>2,30</td><td>-1,00</td><td>4,583</td><td>7,632</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-0,86</td><td>4,693</td><td>7,961</td></tr><tr><td>2,91</td><td>-0,66</td><td>4,760</td><td>8,162</td></tr><tr><td>3,22</td><td>-0,46</td><td>4,804</td><td>8,294</td></tr><tr><td>3,48</td><td>-0,29</td><td>4,823</td><td>8,350</td></tr><tr><td>3,78</td><td>-0,06</td><td>4,828</td><td>8,366</td></tr><tr><td>4,09</td><td>0,17</td><td>4,801</td><td>8,284</td></tr><tr><td>4,40</td><td>0,40</td><td>4,774</td><td>8,203</td></tr><tr><td>4,70</td><td>0,63</td><td>4,741</td><td>8,104</td></tr><tr><td>5,01</td><td>0,86</td><td>4,702</td><td>7,988</td></tr><tr><td>5,52</td><td>1,20</td><td>4,622</td><td>7,746</td></tr><tr><td>5,98</td><td>1,46</td><td>4,544</td><td>7,515</td></tr><tr><td>6,49</td><td>1,74</td><td>4,455</td><td>7,246</td></tr><tr><td>7,01</td><td>1,94</td><td>4,357</td><td>6,953</td></tr><tr><td>7,98</td><td>2,26</td><td>4,207</td><td>6,502</td></tr><tr><td>9,00</td><td>2,46</td><td>4,093</td><td>6,160</td></tr><tr><td>10,02</td><td>2,63</td><td>4,009</td><td>5,908</td></tr><tr><td>10,99</td><td>2,71</td><td>3,960</td><td>5,760</td></tr><tr><td>12,01</td><td>2,80</td><td>3,946</td><td>5,720</td></tr><tr><td>12,68</td><td>2,83</td><td>3,977</td><td>5,814</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><</tr></tbody></table>							Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	2,039	0,000	0,05	-0,06	2,168	0,386	0,10	-0,11	2,250	0,632	0,15	-0,17	2,324	0,855	0,20	-0,26	2,393	1,059	0,26	-0,31	2,461	1,264	0,31	-0,37	2,525	1,458	0,36	-0,46	2,592	1,658	0,41	-0,51	2,660	1,862	0,46	-0,57	2,726	2,061	0,51	-0,63	2,793	2,260	0,61	-0,71	2,925	2,657	0,72	-0,80	3,059	3,059	0,82	-0,89	3,197	3,474	0,92	-0,94	3,335	3,888	1,02	-1,00	3,472	4,297	1,18	-1,09	3,667	4,883	1,38	-1,11	3,905	5,598	1,58	-1,14	4,112	6,217	1,79	-1,14	4,283	6,732	1,99	-1,09	4,423	7,151	2,30	-1,00	4,583	7,632	2,61	-0,86	4,693	7,961	2,91	-0,66	4,760	8,162	3,22	-0,46	4,804	8,294	3,48	-0,29	4,823	8,350	3,78	-0,06	4,828	8,366	4,09	0,17	4,801	8,284	4,40	0,40	4,774	8,203	4,70	0,63	4,741	8,104	5,01	0,86	4,702	7,988	5,52	1,20	4,622	7,746	5,98	1,46	4,544	7,515	6,49	1,74	4,455	7,246	7,01	1,94	4,357	6,953	7,98	2,26	4,207	6,502	9,00	2,46	4,093	6,160	10,02	2,63	4,009	5,908	10,99	2,71	3,960	5,760	12,01	2,80	3,946	5,720	12,68	2,83	3,977	5,814																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,00	0,00	2,039	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,05	-0,06	2,168	0,386																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,10	-0,11	2,250	0,632																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,15	-0,17	2,324	0,855																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,20	-0,26	2,393	1,059																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,26	-0,31	2,461	1,264																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,31	-0,37	2,525	1,458																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,36	-0,46	2,592	1,658																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,41	-0,51	2,660	1,862																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,46	-0,57	2,726	2,061																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,51	-0,63	2,793	2,260																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,61	-0,71	2,925	2,657																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,72	-0,80	3,059	3,059																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,82	-0,89	3,197	3,474																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
0,92	-0,94	3,335	3,888																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,02	-1,00	3,472	4,297																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,18	-1,09	3,667	4,883																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,38	-1,11	3,905	5,598																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,58	-1,14	4,112	6,217																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,79	-1,14	4,283	6,732																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1,99	-1,09	4,423	7,151																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2,30	-1,00	4,583	7,632																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2,61	-0,86	4,693	7,961																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2,91	-0,66	4,760	8,162																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3,22	-0,46	4,804	8,294																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3,48	-0,29	4,823	8,350																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3,78	-0,06	4,828	8,366																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
4,09	0,17	4,801	8,284																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
4,40	0,40	4,774	8,203																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
4,70	0,63	4,741	8,104																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
5,01	0,86	4,702	7,988																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
5,52	1,20	4,622	7,746																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
5,98	1,46	4,544	7,515																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
6,49	1,74	4,455	7,246																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
7,01	1,94	4,357	6,953																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
7,98	2,26	4,207	6,502																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
9,00	2,46	4,093	6,160																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
10,02	2,63	4,009	5,908																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
10,99	2,71	3,960	5,760																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
12,01	2,80	3,946	5,720																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
12,68	2,83	3,977	5,814																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														

Tabla F-12: Ficha de ensayo de compresión triaxial CID – DR = 97 [%] – $\rho_s = 1,900 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ – Arena Limosa (3/3).

Compresión Triaxial Consolidado Isotrópicamente - Drenado (CID), según ASTM D 7181-11						Nº OT:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
						Pag:	3 de 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Fecha realización:		04-01-2016																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Proyecto:		Memoria USM LEMCO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
SPT Nº:	-	Horizonte:			Profundidad [m]:	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Probeta Nº:	3	Tipo de Probeta:	Remoldeada		Tipo de suelo:	Arena Limosa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Laboratorista:		Rodolfo Rojas M.			Clasificación USCS:	SM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Descripción Visual:		-			LL	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
					LP	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
					IP	NP																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Iniciales	Gravedad específica de sólidos	[-]	2,812	Área probeta	[cm²]	19,48																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Diámetro promedio probeta	[cm]	4,98	Volumen probeta	[cm³]	195,85																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Altura promedio probeta	[cm]	10,06	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,072																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Masa húmeda probeta	[g]	405,73	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,889																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Humedad promedio probeta	[%]	9,7	Relación de vacíos		0,488																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
				Saturación	[%]	55,56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Después de la consolidación	Diámetro probeta	[cm]	4,97	Área probeta	[cm²]	19,38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Altura probeta	[cm]	10,00	Volumen probeta	[cm³]	193,82																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Saturación	[%]	100,0	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,228																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Humedad probeta	[%]	16,9	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,905																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
				Relación de vacíos		0,476																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Finales	Humedad probeta	[%]	18,5	Densidad húmeda probeta	[g/cm³]	2,192																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Relación de vacíos	-	0,520	Densidad seca probeta	[g/cm³]	1,850																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Otros	Parámetro B de presión de poros	-	0,98	Deformación axial en la falla	[%]	3,79																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Velocidad de deformación	[%/min]	0,080	Esfuerzo desviatorio en la falla	[kgf/cm²]	11,815																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Contrapresión total	[kgf/cm²]	2,060	Esfuerzo principal menor en la falla	[kgf/cm²]	3,059																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Esfuerzo efectivo de consolidación	[kgf/cm²]	3,059	Esfuerzo principal mayor en la falla	[kgf/cm²]	14,874																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
<table><thead><tr><th>Def. Axial [%]</th><th>Δ Volumétrica [cc]</th><th>p' [kgf/cm²]</th><th>q [kgf/cm²]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>3,059</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,05</td><td>-0,03</td><td>3,188</td><td>0,387</td></tr><tr><td>0,10</td><td>-0,11</td><td>3,304</td><td>0,736</td></tr><tr><td>0,15</td><td>-0,17</td><td>3,411</td><td>1,056</td></tr><tr><td>0,20</td><td>-0,26</td><td>3,516</td><td>1,371</td></tr><tr><td>0,26</td><td>-0,34</td><td>3,618</td><td>1,677</td></tr><tr><td>0,31</td><td>-0,40</td><td>3,725</td><td>1,996</td></tr><tr><td>0,36</td><td>-0,46</td><td>3,826</td><td>2,302</td></tr><tr><td>0,41</td><td>-0,51</td><td>3,930</td><td>2,611</td></tr><tr><td>0,46</td><td>-0,57</td><td>4,034</td><td>2,926</td></tr><tr><td>0,51</td><td>-0,63</td><td>4,141</td><td>3,245</td></tr><tr><td>0,61</td><td>-0,74</td><td>4,358</td><td>3,897</td></tr><tr><td>0,72</td><td>-0,83</td><td>4,569</td><td>4,529</td></tr><tr><td>0,82</td><td>-0,89</td><td>4,785</td><td>5,178</td></tr><tr><td>0,92</td><td>-0,97</td><td>4,998</td><td>5,818</td></tr><tr><td>1,02</td><td>-1,03</td><td>5,205</td><td>6,436</td></tr><tr><td>1,18</td><td>-1,09</td><td>5,500</td><td>7,322</td></tr><tr><td>1,38</td><td>-1,11</td><td>5,846</td><td>8,360</td></tr><tr><td>1,59</td><td>-1,11</td><td>6,132</td><td>9,218</td></tr><tr><td>1,79</td><td>-1,09</td><td>6,362</td><td>9,910</td></tr><tr><td>2,00</td><td>-1,03</td><td>6,535</td><td>10,428</td></tr><tr><td>2,30</td><td>-0,91</td><td>6,725</td><td>10,998</td></tr><tr><td>2,61</td><td>-0,74</td><td>6,850</td><td>11,374</td></tr><tr><td>2,92</td><td>-0,57</td><td>6,931</td><td>11,615</td></tr><tr><td>3,22</td><td>-0,40</td><td>6,975</td><td>11,748</td></tr><tr><td>3,48</td><td>-0,23</td><td>6,993</td><td>11,803</td></tr><tr><td>3,79</td><td>0,00</td><td>6,997</td><td>11,815</td></tr><tr><td>4,09</td><td>0,20</td><td>6,993</td><td>11,801</td></tr><tr><td>4,40</td><td>0,43</td><td>6,975</td><td>11,748</td></tr><tr><td>4,71</td><td>0,66</td><td>6,951</td><td>11,677</td></tr><tr><td>5,02</td><td>0,86</td><td>6,924</td><td>11,594</td></tr><tr><td>5,48</td><td>1,17</td><td>6,876</td><td>11,451</td></tr><tr><td>5,99</td><td>1,51</td><td>6,812</td><td>11,259</td></tr><tr><td>6,50</td><td>1,80</td><td>6,747</td><td>11,065</td></tr><tr><td>7,01</td><td>2,11</td><td>6,684</td><td>10,875</td></tr><tr><td>7,98</td><td>2,63</td><td>6,570</td><td>10,534</td></tr><tr><td>9,01</td><td>3,11</td><td>6,460</td><td>10,203</td></tr><tr><td>9,98</td><td>3,51</td><td>6,377</td><td>9,955</td></tr><tr><td>11,00</td><td>3,88</td><td>6,299</td><td>9,719</td></tr><tr><td>11,98</td><td>4,20</td><td>6,234</td><td>9,524</td></tr><tr><td>13,00</td><td>4,48</td><td>6,161</td><td>9,306</td></tr><tr><td>14,02</td><td>4,74</td><td>6,104</td><td>9,136</td></tr><tr><td>15,00</td><td>4,94</td><td>6,058</td><td>8,996</td></tr><tr><td>16,02</td><td>5,14</td><td>6,000</td><td>8,823</td></tr><tr><td>16,99</td><td>5,34</td><td>5,944</td><td>8,654</td></tr><tr><td>18,02</td><td>5,51</td><td>5,893</td><td>8,502</td></tr><tr><td>18,99</td><td>5,68</td><td>5,888</td><td>8,487</td></tr><tr><td>19,85</td><td>5,83</td><td>5,857</td><td>8,395</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td></tr></tbody></table>								Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]	0,00	0,00	3,059	0,000	0,05	-0,03	3,188	0,387	0,10	-0,11	3,304	0,736	0,15	-0,17	3,411	1,056	0,20	-0,26	3,516	1,371	0,26	-0,34	3,618	1,677	0,31	-0,40	3,725	1,996	0,36	-0,46	3,826	2,302	0,41	-0,51	3,930	2,611	0,46	-0,57	4,034	2,926	0,51	-0,63	4,141	3,245	0,61	-0,74	4,358	3,897	0,72	-0,83	4,569	4,529	0,82	-0,89	4,785	5,178	0,92	-0,97	4,998	5,818	1,02	-1,03	5,205	6,436	1,18	-1,09	5,500	7,322	1,38	-1,11	5,846	8,360	1,59	-1,11	6,132	9,218	1,79	-1,09	6,362	9,910	2,00	-1,03	6,535	10,428	2,30	-0,91	6,725	10,998	2,61	-0,74	6,850	11,374	2,92	-0,57	6,931	11,615	3,22	-0,40	6,975	11,748	3,48	-0,23	6,993	11,803	3,79	0,00	6,997	11,815	4,09	0,20	6,993	11,801	4,40	0,43	6,975	11,748	4,71	0,66	6,951	11,677	5,02	0,86	6,924	11,594	5,48	1,17	6,876	11,451	5,99	1,51	6,812	11,259	6,50	1,80	6,747	11,065	7,01	2,11	6,684	10,875	7,98	2,63	6,570	10,534	9,01	3,11	6,460	10,203	9,98	3,51	6,377	9,955	11,00	3,88	6,299	9,719	11,98	4,20	6,234	9,524	13,00	4,48	6,161	9,306	14,02	4,74	6,104	9,136	15,00	4,94	6,058	8,996	16,02	5,14	6,000	8,823	16,99	5,34	5,944	8,654	18,02	5,51	5,893	8,502	18,99	5,68	5,888	8,487	19,85	5,83	5,857	8,395																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Def. Axial [%]	Δ Volumétrica [cc]	p' [kgf/cm²]	q [kgf/cm²]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,00	0,00	3,059	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,05	-0,03	3,188	0,387																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,10	-0,11	3,304	0,736																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,15	-0,17	3,411	1,056																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,20	-0,26	3,516	1,371																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,26	-0,34	3,618	1,677																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,31	-0,40	3,725	1,996																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,36	-0,46	3,826	2,302																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,41	-0,51	3,930	2,611																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,46	-0,57	4,034	2,926																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,51	-0,63	4,141	3,245																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,61	-0,74	4,358	3,897																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,72	-0,83	4,569	4,529																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,82	-0,89	4,785	5,178																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0,92	-0,97	4,998	5,818																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1,02	-1,03	5,205	6,436																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1,18	-1,09	5,500	7,322																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1,38	-1,11	5,846	8,360																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1,59	-1,11	6,132	9,218																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1,79	-1,09	6,362	9,910																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2,00	-1,03	6,535	10,428																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2,30	-0,91	6,725	10,998																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2,61	-0,74	6,850	11,374																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2,92	-0,57	6,931	11,615																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
3,22	-0,40	6,975	11,748																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
3,48	-0,23	6,993	11,803																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
3,79	0,00	6,997	11,815																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
4,09	0,20	6,993	11,801																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
4,40	0,43	6,975	11,748																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
4,71	0,66	6,951	11,677																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
5,02	0,86	6,924	11,594																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
5,48	1,17	6,876	11,451																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
5,99	1,51	6,812	11,259																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
6,50	1,80	6,747	11,065																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
7,01	2,11	6,684	10,875																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
7,98	2,63	6,570	10,534																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
9,01	3,11	6,460	10,203																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
9,98	3,51	6,377	9,955																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
11,00	3,88	6,299	9,719																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
11,98	4,20	6,234	9,524																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
13,00	4,48	6,161	9,306																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
14,02	4,74	6,104	9,136																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
15,00	4,94	6,058	8,996																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
16,02	5,14	6,000	8,823																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
16,99	5,34	5,944	8,654																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
18,02	5,51	5,893	8,502																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
18,99	5,68	5,888	8,487																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
19,85	5,83	5,857	8,395																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

ANEXO G. OPERACIONES CON ESTANQUE DE AGUA DESAIREADA

Llenado de Estanque de Agua Desaireada

- 1) Verificar que en el panel y estanque de agua desaireada estén presentes todas las conexiones necesarias para llevar a cabo estas operaciones.
- 2) Abrir llave de red de agua potable lentamente.
- 3) En el panel, específicamente en la sección “DE-AIRED WATER”, mover válvula a la posición “FILL”.
- 4) Llenar hasta alcanzar una altura de agua conveniente. Luego, cerrar llave de red de agua potable y mover a la posición “OFF” la válvula de la sección “DE-AIRED WATER” del panel.

Desaireado de Agua en Estanque de Agua Desaireada

- 1) Verificar que en el panel y estanque de agua desaireada estén presentes todas las conexiones necesarias para llevar a cabo estas operaciones.
- 2) En el panel, específicamente en la sección “DE-AIRED WATER”, mover válvula a la posición “VACUUM”.
- 3) Encender bomba de vacío.
- 4) Esperar a que el desaireado se complete. Luego, apagar bomba de vacío y mover a la posición “OFF” la válvula de la sección “DE-AIRED WATER” del panel.

Drenado de Agua de Estanque de Agua Desaireada

- 1) Verificar que en el panel y estanque de agua desaireada estén presentes todas las conexiones necesarias para llevar a cabo estas operaciones.
- 2) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, desconectar la línea “BLADDER B”.
- 3) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, desconectar la línea “BASE” y conectar una línea auxiliar. Además, se debe colocar un recipiente que reciba el agua que saldrá por esta línea.
- 4) En esta misma sección del panel, mover válvula “PWP” a la posición “FILL”.
- 5) Para acelerar el drenaje, en la sección “DE-AIRED WATER” del panel, mover válvula a la posición “PRESSURE”. Seguidamente, en la sección “AUXILIARY AIR PRESSURE”, aplicar con el regulador manual una presión sobre el tope del estanque de agua desaireada.

- 6) Esperar a que se drene toda el agua del estanque. Luego, quitar presión auxiliar, mover válvula “PWP” a su posición central y válvula de la sección “DE-AIRED WATER” moverla a “OFF”.
- 7) Reconectar líneas “BLADDER B” y “BASE”.

ANEXO H. OPERACIONES CON BLADDERS

Llenado de Recipiente que Contiene a “BLADDER A”

- 1) Verificar que en el panel y “BLADDER A” estén presentes todas las conexiones necesarias para llevar a cabo estas operaciones.
- 2) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, verificar que esté conectada la línea “BLADDER A” y desconectar la línea “CELL”.
- 3) En el tope del recipiente que contiene al “BLADDER A”, abrir despiche para evacuar el aire interior mientras se está llenando el recipiente.
- 4) Nuevamente en la sección “WATER CONNECTION” del panel, mover válvula “CELL” a la posición “FILL”.
- 5) Esperar a que se llene el recipiente. Luego, mover válvula “CELL” a su posición central y cerrar despiche superior.
- 6) Reconectar línea “CELL”.

Llenado de Recipiente que Contiene a “BLADDER B”

- 1) Verificar que en el panel y “BLADDER B” estén presentes todas las conexiones necesarias para llevar a cabo estas operaciones.
- 2) En el panel, específicamente en la sección “WATER CONNECTION”, verificar que esté conectada la línea “BLADDER B” y desconectar la línea “BASE”.
- 3) En el tope del recipiente que contiene al “BLADDER B”, abrir despiche para evacuar el aire interior mientras se está llenando el recipiente.
- 4) Nuevamente en la sección “WATER CONNECTION” del panel, mover válvula “PWP” a la posición “FILL”.
- 5) Para acelerar el llenado del recipiente, en la sección “DE-AIRED WATER” del panel, mover válvula a la posición “PRESSURE”. Seguidamente, en la sección “AUXILIARY AIR PRESSURE”, aplicar con el regulador manual una presión sobre el tope del estanque de agua desaireada.
- 6) Esperar a que se llene el recipiente. Luego, cerrar válvula “PWP” y despiche superior.
- 7) Quitar presión auxiliar y válvula de la sección “DE-AIRED WATER” moverla a “OFF”.
- 8) Reconectar línea “BASE”.

ANEXO I. OPERACIONES CON APARATO DE MEDICIÓN DE CAMBIO VOLUMÉTRICO

Instalación y Desaireado de Aparato de Medición de Cambio Volumétrico

- 1) Usando una manguera de diámetro 1/8 [in], conectar una línea desde el panel de distribución, “BASE” en la sección “WATER CONNECTION”, con el lado izquierdo (visto desde el frente) del aparato de medición de cambio volumétrico.
- 2) Usando una manguera del mismo diámetro, conectar una línea desde el lado derecho del aparato de medición de cambio volumétrico con la válvula solenoide ubicada en el pilar de la prensa de carga.
- 3) Verificar que estén todas las conexiones necesarias en el aparato de cambio volumétrico y que esté desconectada la línea “BLADDER B” en la sección “WATER CONNECTION” del panel.
- 4) Verificar que haya suficiente suministro en el tanque de agua desaireada, sino seguir procedimiento indicado en el ANEXO B.
- 5) Con la válvula izquierda del aparato de medición de cambio volumétrico (visto desde el frente) situada en la posición “VOLUME CHANGE” y la válvula derecha en la posición “FLOW UP”, llenar lentamente la cámara superior del aparato con agua desaireada. Para que este llenado sea efectivo, en la sección “WATER CONNECTION” del panel, la válvula “PWP” debe estar en la posición “FILL” y además se debe procurar tener abierto el despiche superior del aparato para dejar escapar el aire durante el llenado. Una vez completado el llenado se debe cerrar el despiche en cuestión.
- 6) Para llenar la cámara inferior del aparato, rotarlo en 180° y repetir el proceso anterior con la válvula derecha en la posición “FLOW DOWN” y el otro despiche abierto.
- 7) Una vez llenas ambas cámaras del aparato, lo que sigue es enjuagar el aparato de medición de cambio volumétrico para desairearlo completamente.
- 9) En la sección “DE-AIRED WATER” del panel, mover válvula a la posición “PRESSURE”. Seguidamente, en la sección “AUXILIARY AIR PRESSURE”, aplicar con el regulador manual toda la presión disponible sobre el tope del estanque de agua desaireada.
- 10) Poner un recipiente para recibir el agua que saldrá por la línea libre que conecta con la válvula solenoide.
- 11) En el software “Humboldt”, abrir la válvula solenoide. Dada la disposición de las válvulas en el aparato de medición de cambio volumétrico, se terminará de llenar completamente la cámara inferior del aparato mientras se vacía la superior. Dejar unos 10 [min] el sistema en esta disposición para desairear la cámara inferior y luego invertir el flujo y dejarlo otros 10 [min]. Repetir este proceso varias veces, dejando finalmente la cámara superior del aparato completamente llena y su brazo palanca en la posición más inferior posible.
- 12) Quitar presión auxiliar y válvula de la sección “DE-AIRED WATER” moverla a “OFF”.

- 13) Mover a su posición central ambas válvulas del aparato de medición de cambio volumétrico.
- 14) Cerrar la válvula solenoide en el software “Humboldt” y luego mover la válvula “PWP” de la sección “WATER CONNECTION” del panel a su posición central.
- 15) Reconectar la línea “BLADDER B”.
- 16) Finalmente, sólo queda instalar el LSCT. Para ello, con el brazo palanca del aparato en su posición más inferior, colocar y fijar el LSCT procurando que su vástago esté en su posición más extendida y en contacto con dicho brazo.

ANEXO J. EQUIPO E IMPLEMENTOS

1) Recipiente y poruña:

Utilizados para manipular el material durante la confección de la probeta.



Figura J-1: Recipiente y poruña.

2) Papel film y mica:

El papel film se utiliza para prevenir la pérdida o ganancia de humedad durante el curado del material y confección de la probeta.

La mica se utiliza en suelos sin mucha cohesión para darle firmeza durante la confección.



Figura J-2: Papel film y mica.

3) Balanza y pie de metro:

Utilizados para medir masa y dimensiones de la probeta en distintas etapas del ensayo.



Figura J-3: Balanza y pie de metro.

4) Pisón y combo:

Para apisonar o compactar por capas las probetas remoldeadas.



Figura J-4: Pisón y combo.

5) Molde partido:

Dispositivo esencial para la confección de la probeta.



Figura J-5: Molde partido.

6) Membrana, expansor de membrana y o-rings:

La membrana de látex cumple la función de aislar la probeta del agua de la cámara.

El expansor de membrana se utiliza para poder colocar la membrana alrededor de la probeta.

Los o-rings sellan la membrana contra el cabezal superior e inferior de la probeta.



Figura J-6: Membrana, expansor de membrana y o-rings.

7) Tiras, jaula y discos de papel filtro:

Las tiras o jaula de papel filtro son opcionales, pero son altamente recomendables porque mejoran el drenaje en la probeta.

Los discos de papel filtro son obligatorios, ya que sin ellos se corre el riesgo de colmar los discos porosos.



Figura J-7: Tiras, jaula y discos de papel filtro.

8) Discos porosos:

Los discos porosos posibilitan una distribución uniforme del agua en el tope y base de la probeta respectivamente.



Figura J-8: Discos porosos.

9) “Masking tape” y vaselina sólida:

El “masking tape” se utiliza para pegar las tiras o jaula de papel filtro al cabezal superior e inferior de la probeta.

La vaselina sólida se usa para sellar posibles filtraciones que pueden ocurrir entre la superficie de contacto de membrana-cabezal superior/inferior probeta.



Figura J-9: “Masking tape” y vaselina sólida.

10) Tanque con CO₂ y flujómetro N°1:

Suministro de CO₂ para hacerlo circular a través de la probeta y así facilitar su saturación.

El flujómetro conectado directamente al estanque se utiliza para una regulación menos precisa del caudal de CO₂ que se hace circular a través de la probeta.



Figura J-10: Tanque con CO₂ y flujómetro N°1.

11) Flujómetro N°2:

Utilizado para una regulación más precisa del flujo de CO₂ que circula a través de la probeta.



Figura J-11: Flujómetro N°2.

12) Bomba de vacío:

Para aplicar un vacío por las líneas que van hacia la probeta y/o para desairear el agua del estanque de agua desaireada.



Figura J-12: Bomba de vacío.

13) Bladders:

Utilizados para otorgar presiones y contrapresiones a la probeta, manteniendo aislados agua y aire.



Figura J-13: Bladders.

14) Estanque de agua desaireada:

Suministro para el agua que va por dentro de la probeta.



Figura J-14: Estanque de agua desaireada.

15) Controlador de presión (HM-2450B):

Como su nombre lo dice, sirve para suministrar y controlar la presión y contrapresión respectivamente. Además, a él van conectados el transductor de presión de poros y el LSCT que ocupa el aparato de cambio volumétrico. La presión máxima de entrada es de 1400 [kPa] y la de salida de 1000 [kPa], destacándose además su resolución de presión de 1 [kPa].



Figura J-15: Controlador de presión.

16) Aparato de medición de cambio volumétrico (HM-2315):

Utilizado para medir el cambio volumétrico de la probeta a través del monitoreo del flujo de agua que entra y sale de ella. En su interior posee 2 cámaras de 100 [cm³] cada una y sobre un brazo palanca se sitúa un LSCT (HM-2310.10) que mide el desplazamiento de un pistón interior. Para realizar el control, la válvula de la izquierda debe señalar “VOLUMEN CHANGE”, mientras que la válvula de la derecha debe indicar “FLOW DOWN” O “FLOW UP” según sea la ubicación del brazo palanca. Durante el ensayo el agua es colocada dentro de una de las cámaras mientras la otra se abre y el agua se drena. Como una cámara se está llenando y la otra se está vaciando, el pistón ubicado en el interior del cilindro empieza a moverse, acciona el brazo de palanca moviéndolo hacia arriba o hacia abajo dependiendo de cuál cámara es la que se está llenando. El brazo palanca actúa sobre el medidor LSCT indicando la distancia que el pistón se ha movido. Esta información es convertida a volumen según la calibración guardada en el controlador de presión al cual va conectado el LSCT. Durante el ensayo, si la capacidad de la muestra sobrepasa el volumen en una de las cámaras, puede ser necesario aumentar la capacidad de cambio de volumen. Esto se realiza invirtiendo la dirección del flujo.

Al establecer las dos válvulas en posición Bypass, el agua puede fluir a través del sistema directamente a la muestra ubicada en la cámara triaxial. El volumen no se mide cuando las válvulas están en dicha posición.

La medición del volumen de agua que entra y sale de la probeta tiene una exactitud mejor que 0,05 [ml].

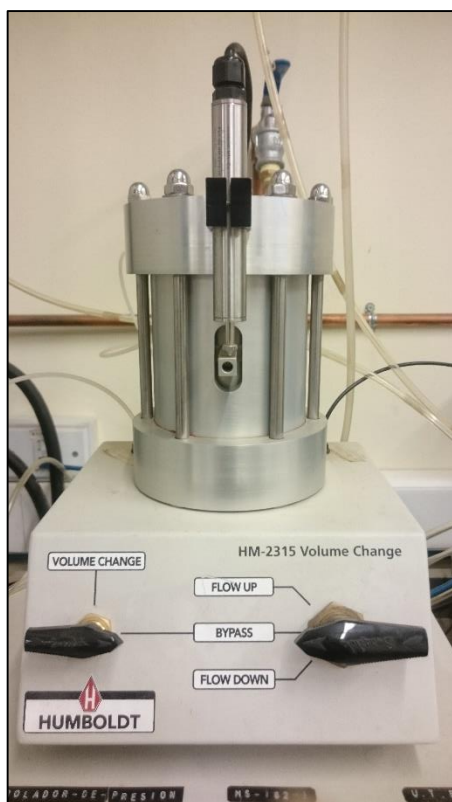


Figura J-16: Aparato de medición de cambio volumétrico.

17) Panel de distribución (HM-4155):

El panel de distribución recibe las conexiones de agua y aire para la ejecución de las distintas etapas de los ensayos y posteriormente los distribuye por medio de mangueras a los distintos aparatos, según corresponda. Por ejemplo, este panel recibe el suministro de aire proveniente desde el compresor y luego se encarga de derivarlo al controlador de presión. El panel, entre muchas otras características, posee un medidor de presión digital que permite el monitoreo de la presión de entrada.



Figura J-17: Panel de distribución.

18) Prensa de carga (HM-3000.3F), cámara triaxial, LSCT (HM-2310.20) y celda de carga tipo-s (HM-2300.020):

La prensa de carga está diseñada para realizar múltiples ensayos como: compresión triaxial UU, CIU y CID, CBR y LBR. Posee 4 canales con adquisición de datos en tiempo real, los cuales son obtenidos de los transductores de carga, deformación, presión de poros y volumen. Esta prensa está conectada al computador mediante un puerto USB, con el fin de ir registrando y descargando todos los datos por medio de “Humboldt Material Testing Software” (HMTS). Los registros se almacenan en archivos Excel, pudiendo ser exportados como Excel habilitado para macros. El software puede registrar como límite superior 1000 lecturas por ensayo.

El modelo y tamaño de la cámara triaxial depende de las dimensiones de la probeta a ensayar. El acrílico transparente de la cámara tiene una presión de trabajo de 1000 [kPa] y está probada hasta con 1700 [kPa].

El LSCT que se posa sobre la cámara es un instrumento utilizado para medir deformación vertical y tiene una alta resolución y un rendimiento superior a un LVDT. Puede medir deformaciones de hasta 50,8 [mm].

La celda de carga tipo-s es bidireccional, puede medir tanto cargas de tensión como compresión, y una capacidad de 10 [kN].

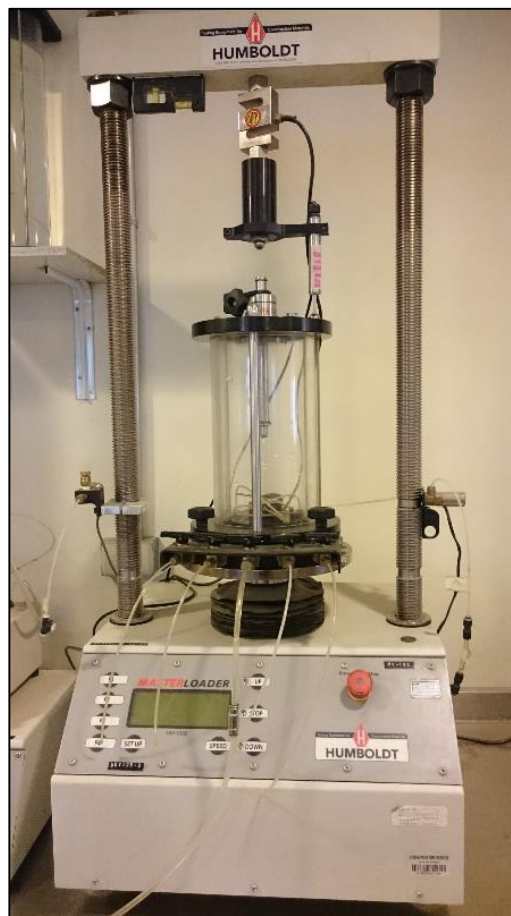


Figura J-18: Prensa de carga, cámara triaxial y celda de carga tipo-s.

19) Dispositivo de medición de presión de poros (HM-4170):

El transductor de presión de poros es de alta precisión, pudiendo medir presiones de hasta 1400 [kPa].

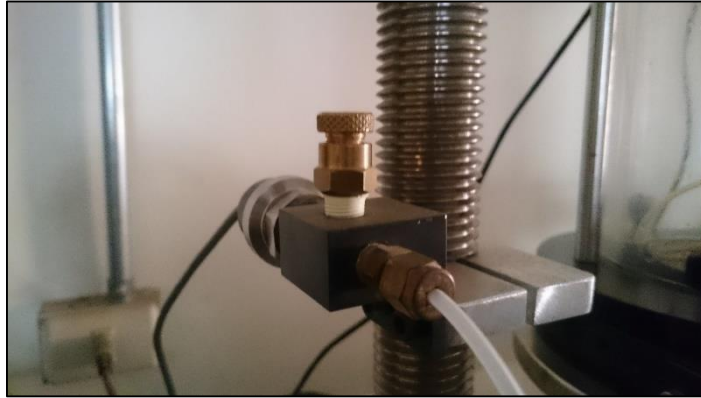


Figura J-19: Dispositivo de medición de presión de poros.

20) Válvula solenoide:

Esta válvula es accionada por una bobina solenoide y sirve para controlar el paso de agua hacia/desde la probeta.



Figura J-20: Válvula solenoide.