



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

MODELADO NUMÉRICO DEL ENSAYO DILATÓMETRO DE MARCHETTI

Memoria de Titulación presentada por
DANTE PATRICIO BERTOLI ESCOBAR

Como requisito parcial para optar título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
MATÍAS SILVA I.

julio de 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

MODELADO NUMÉRICO DEL ENSAYO DILATÓMETRO DE MARCHETTI

Memoria de Titulación presentada por
DANTE PATRICIO BERTOLI ESCOBAR

Como requisito parcial para optar título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
MATÍAS SILVA I.

julio de 2017

RESUMEN

En la actualidad en Chile, la exploración del subsuelo se encuentra dominada por el uso del ensayo SPT y en menor medida del ensayo CPT; sin embargo, su extenso uso no implica necesariamente que sean los ensayos más adecuados. Algunos investigadores incitan a abandonar el uso del ensayo SPT, por ser considerado poco confiable (Robertson, 2012) y por basarse en un índice N, número de golpes/pie, que carece de sentido real y físico (Mayne et al, 2009) cuando N es usado para correlacionar parámetros geotécnicos de resistencia y rigidez del suelo.

Las nuevas y mejores alternativas de equipos de ensayos de penetración en terreno que existen hoy en día para medir los parámetros geotécnicos de interés, poseen una mejor repetibilidad y precisión, el costo de ejecución del ensayo podría ser menor y en algunos casos existe mayor rapidez en la obtención de información con respecto a ensayos convencionales. Considerando estas ventajas, es natural que ensayos de estas características adquieran una mayor participación en la caracterización del subsuelo, por ejemplo, el ensayo DMT.

El dilatómetro plano de Marchetti (DMT) es un ensayo en terreno de carga-deformación (con deformación controlada). Este ensayo consta de una fase de penetración, donde el operador fuerza la introducción vertical de una cuchilla plana en el suelo hasta una profundidad deseada; y otra fase de expansión de la membrana desde la cuchilla plana. La expansión de la membrana dentro del suelo se mide para dos desplazamientos prescritos de ésta, obteniendo las lecturas de presión A y B que luego serán interpretadas en parámetros geotécnicos mediante el uso de correlaciones. Cada ensayo consiste en el incremento de esta penetración vertical, seguido por la expansión de la membrana. Un sondeo con dilatómetro consta de los resultados de todos los ensayos en un mismo sitio de perforación.

Debido a las eventuales ventajas que posee este ensayo de penetración en terreno, es de gran utilidad presentar el alcance de este equipo, los parámetros geotécnicos que puede estimar y las aplicaciones geotécnicas que facilita o permite realizar. Además, para mejorar la comprensión del ensayo se realiza una simulación de la ejecución del ensayo DMT en el software de elementos finitos “Plaxis v8.5 en 2-D”, permitiendo observar la distorsión del suelo y los esfuerzos generados en cada una de las fases del ensayo: inserción de la cuchilla del DMT y expansión de la membrana.

La validación de esta simulación se realiza en base a resultados de ensayos DMT ejecutados dentro de una cámara de calibración, la cual tiene asociada condiciones de borde bien definidas y permite trabajar con muestras de suelos ensayadas previamente en laboratorio, por lo tanto, sus parámetros son conocidos y controlados.

Glosario

A	:	1era lectura de campo utilizando DMT [kPa]
B	:	2nda lectura de campo utilizando DMT [kPa]
C	:	Lectura opcional de campo [kPa]
CC	:	Cámara de calibración
Cluster		Dominio o área cerrada en Plaxis
CPT	:	Ensayo Penetrométrico estático
DMT	:	Ensayo del Dilatómetro de Marchetti
k	:	Permeabilidad [m/s]
NC	:	Suelo Normalmente consolidado
OC	:	Suelo Sobre-consolidado
OCR	:	Razón de sobreconsolidación
PMT	:	Ensayo del Presiómetro
SDMT	:	Ensayo de Dilatómetro de Marchetti con sensores sísmicos
SPT	:	Ensayo de Penetración estándar
U	:	Coeficiente de Uniformidad
ΔA	:	Presión de corrección asociada a la lectura A [kPa]
ΔB	:	Presión de corrección asociada a la lectura B [kPa]
c_h	:	Coeficiente horizontal de consolidación [cm ² /min]
c_u	:	Esfuerzo de corte no drenado [kPa]
D_r	:	Densidad relativa [%]
d_{50}	:	Abertura del tamiz por la cual pasa el 50 % del material
E_D	:	Módulo elástico del dilatómetro [MPa]
E_{oed}	:	Módulo edométrico [MPa]

E	:	Módulo de Young [MPa]
G_0	:	Módulo de corte Máximo [MPa]
I_D	:	Índice del material o índice de densidad
K_D	:	Índice de tensión horizontal
K_0	:	Coeficiente lateral de empuje lateral en reposo
M_{DMT}	:	Módulo edométrico vertical drenado bajo tensión geostática [MPa]
m_v	:	Módulo de compresibilidad volumétrica [1/MPa]
LVDT	:	Transformador diferencial variable linear (sensor de posición)
p_a	:	Presión atmosférica
p_0	:	Presión de campo corregida (1era) [kPa]
p_1	:	Presión de campo corregida (2nda) [kPa]
p_2	:	Presión de campo corregida (opcional) [kPa]
p'_c	:	Presión de preconsolidación [kPa]
q_D	:	Esfuerzo de falla asociado a la penetración de una paleta [kPa]
q_c	:	Esfuerzo de falla asociado a la penetración de una punta cónica [kPa]
R_M	:	Factor de corrección del módulo de rigidez DMT
S_{1-DMT}	:	Asentamiento lineal, unidimensional calculado utilizando los resultados del ensayo DMT [m]
U_D	:	Índice que evalúa si un suelo es permeable o no
u_0	:	Presión de poros existente antes de insertar la paleta DMT [kPa]
Δu	:	Exceso de presión de poros [kPa]
V_s	:	Velocidad de ondas de corte sísmicas [m/s]
Z_m	:	Lectura de la celda de presión cuando es ventilada a presión atmosférica [kPa]
ρ	:	Densidad o peso específico del estrato de suelo [kg/m ³]

σ'_h	:	Esfuerzo efectivo horizontal [kPa]
σ'_{v0}	:	Esfuerzo efectivo vertical antes de insertar la paleta DMT [kPa]
σ'_{m0}	:	Esfuerzo efectivo promedio [kPa]
ϕ	:	Ángulo de fricción [°]
ϕ_{ax}	:	Ángulo de fricción en condiciones triaxiales [°]
ϕ_{ps}	:	Ángulo de fricción en condiciones de deformaciones planas [°]
ν	:	Coeficiente de Poisson
γ_s	:	Peso específico de suelo [kN/m ³]

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Historia.....	2
1.3. Objetivos del Estudio	2
1.4. Metodología	3
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1. Introducción	4
2.2. Descripción del equipo DMT	4
2.3. Características del ensayo DMT	7
2.4. Procedimiento	8
2.4.1. Ensayo de disipación.....	9
2.5. Correcciones de las presiones	10
2.6. Comparación con otros ensayos geotécnicos	11
2.7. Resultados del ensayo	14
2.7.1. Parámetros intermedios.....	15
2.7.2. Resultados haciendo uso de las correlaciones.....	17
2.7.2.1. Parámetros geotécnicos obtenidos independientemente del tipo de suelo	18
2.7.2.2. Parámetros geotécnicos dependientes del tipo de suelo	21
2.7.2.3. Parámetros geotécnicos obtenidos exclusivamente en arcilla	26
2.7.2.3.1. Parámetros geotécnicos obtenidos exclusivamente en arena	28
CAPÍTULO 3. ELEMENTOS FINITOS	35
3.1. Introducción	35
3.1.1. Plaxis Input.....	35
3.1.1.1. Modelo Geométrico.....	35
3.1.1.2. Tipos de Elementos	36
3.1.1.3. Generación de la Malla	37
3.1.1.4. Modelos Constitutivos de los Materiales	38
3.1.2. Plaxis Calculations	42
3.1.3. Plaxis Output.....	43

3.1.4.	Plaxis Curves.....	43
CAPÍTULO 4.	CASO DE ESTUDIO BASE.....	44
4.1.	Ensayos de laboratorio en Cámara de Calibración.....	44
4.2.	Modelo numérico	48
CAPÍTULO 5.	MODELO NUMÉRICO PROPUESTO.....	51
5.1.	Introducción	51
5.2.	Planteamiento del Problema.....	51
5.2.1.	Parámetros del suelo en estudio	51
5.2.2.	Definición del modelo	52
5.3.	Simulación.....	53
5.3.1.	Consideraciones	56
5.3.2.	Modelado de la inserción de la cuchilla	58
5.3.3.	Modelado de la expansión de la membrana	60
5.3.4.	Calculo del esfuerzo promedio de contacto normal a lo largo de la membrana.....	60
5.3.5.	Manipulación de la información obtenida.....	62
5.3.6.	Influencia de los componentes de la simulación en la Lectura B.....	64
5.3.6.1.	Variación del contorno de la paleta	66
5.3.6.2.	Variación del espesor de la membrana	67
5.3.6.3.	Variación de la rigidez	70
5.3.6.4.	Variación del peso específico.....	71
5.3.6.5.	Variación del coeficiente de Poisson.....	72
5.3.6.6.	Variación de la resistencia de la interfaz (Rinter)	72
5.3.6.7.	Variación en las dimensiones de la paleta del DMT	73
5.3.6.8.	Variación en el radio de la Cámara de Calibración	75
5.4.	Influencia de los componentes de la paleta en la lectura A.....	76
5.5.	Validación del modelo	80
5.5.1.	Definición del modelo constitutivo	81
5.5.2.	Valores adoptados	81
5.5.2.1.	Conjunto de datos muestra densa a 50 [kPa].....	82
5.5.2.2.	Conjunto de datos dominio paleta DMT	82
5.5.2.3.	Conjunto de datos contorno de la paleta	83

5.5.2.4.	Conjunto de datos membrana	84
5.5.3.	Dimensiones consideradas	84
5.5.4.	Resultados	84
5.5.4.1.	Muestra densa a 50 [kPa]	84
5.5.4.2.	Muestra suelta a 50 [kPa]	85
5.5.4.3.	Muestras sometidas a 100 [kPa]	85
CAPÍTULO 6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
6.1.	Análisis de sensibilidad	88
6.2.	Método Estacionario	90
6.3.	Interpretación de los resultados	91
6.3.1.	Muestra Densa 50 [kPa]	92
6.3.2.	Muestra Suelta 50 [kPa]	92
6.3.3.	Muestra Densa 100 [kPa]	93
6.3.4.	Muestra Suelta 100 [kPa]	94
6.3.5.	Comparación de la interpretación de resultados con los resultados de ensayos CID	95
CAPÍTULO 7.	CONCLUSIONES	96
CAPÍTULO 8.	REFERENCIAS	100
ANEXO A.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO	104
ANEXO B.	COMPRESIÓN INSTRUMENTAL	105
ANEXO C.	APLICACIONES A PROBLEMAS DE INGENIERÍA	106
ANEXO D.	RESULTADOS PARA DISTINTOS GRADOS DE REFINADO Y ÁREAS DE DOMINIO	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Disposición general del equipo DMT (ISSMGE TC-16, 2001).....	4
Figura 2-2: Dimensiones de la paleta DMT (US DOT, 1992).	5
Figura 2-3: Detalle de la unidad de control superficie (Gil Mejia, 2004).	5
Figura 2-4: Equipo de inserción estática CPT (penetrómetro) y equipo de perforación (ISSMGE TC-16, 2001).	7
Figura 2-5: Distorsiones causadas por ensayo CPT y DMT respectivamente (Baligh y Scott, 1975).8	
Figura 2-6: Posiciones de la membrana libre, A y B (ISSMGE TC-16, 2001).....	10
Figura 2-7: Esquema de las conexiones durante la corrección de la presión (ISSMGE TC-16, 2001).	11
Figura 2-8: Decaimiento del módulo de corte con el nivel de deformaciones y posible rango de deformaciones para el módulo de diferentes ensayos en terreno (Mayne, 2001).....	13
Figura 2-9: Ejemplo cualitativo sobre la clasificación del índice ID (Marchetti, 1999).	16
Figura 2-10: Ejemplo de una comparación entre M determinado por DMT y otro determinado por un odómetro con muestras de alta calidad, Noruega (Lacase, 1986).	19
Figura 2-11: Gráfico para estimar el tipo de suelo y el peso específico γ , normalizado con respecto el peso específico del agua γ_w (Marchetti & Crapps, 1981).	20
Figura 2-12: Correlación entre KD y OCR para suelos cohesivos de varios sitios geográficos, (Kamei e Iwasaki).	22
Figura 2-13: Correlación $OCR = f(MDMT/Q_c)$ para las capas arenosas de la laguna Venice, (Monaco 2014).	23
Figura 2-14: Comparación de los valores de (K0) obtenidos mediante DMT y otros ensayos en dos depósitos arcillosos de investigación (Burghignoli et al, 1991).	23
Figura 2-15: Relación K0 – KD – ϕ , (Schmertmann y Crapps, 16 marzo 1983).	24
Figura 2-16: Gráfico para evaluar K0 = $f(KD, qc\sigma_v')$, (Marchetti 1985).	25
Figura 2-17: K0 obtenido mediante DMT y SBPT en un depósito de arena en Pavia (Jamiolkowski, 1995).	26
Figura 2-18:a) Relación entre KD y $cu\sigma_v'$ (Powell & Uglow 1988). b) Comparación de cu determinado por el ensayo DMT con otros ensayos (Burghignoli et al, 1991).	27
Figura 2-19: Ejemplo de obtención de ch utilizando DMT-A en un suelo arcilloso en Funcino.	28
Figura 2-20: Gráfico $qc - K0 - \phi$ equivalente a la teoría de Durgunoglu & Mitchell, (Marchetti 1985).	29
Figura 2-21: Ángulo de fricción en arena ϕ obtenidos por ensayos de compresión triaxial comparados con ϕ obtenido por ec (2-27), (Mayne 2015).....	30

Figura 2-22: Correlación KD – Dr para arenas NC no cementadas.....	32
Figura 2-23: Uso de la lectura C para distinguir entre una capa permeable y otra no permeable (Schmertmann, 1988).....	34
Figura 3-1:Ejemplo de un problema de: a)deformación plana b)axisimétrico (Manual de referencia Plaxis v8, 2002).....	36
Figura 3-2:Posición de los nodos y puntos de tensión en elementos de suelo (Manual de referencia Plaxis v8, 2002).....	36
Figura 3-3: a) Modelado de un ensayo triaxial y b) Resultado típico de un ensayo triaxial para una arena densa (Vermeer et. al., 1984).....	38
Figura 3-4: Idea básica del Modelo de Moh-Coulomb (Manual de referencia Plaxis v8, 2002)	39
Figura 3-5: Estado de tensiones en falla usando a) circulo de Mohr y b) elemento del suelo en falla, Manual de referencia Plaxis v8, 2002.	39
Figura 3-6: Superficie de fluencia de Mohr Coulomb en el espacio de esfuerzos principales ($c'=0$), Plaxis v8 Material Models Manual, 2002.	40
Figura 3-7: Representación del contorno total de fluencia del modelo Hardening Soil en el espacio de esfuerzos principales para un suelo sin cohesión, Plaxis v8 Material Models Manual, 2002.....	41
Figura 4-1: Sistema Cámara de Calibración-DMT (Lawter Jr. & Borden 1990).....	44
Figura 4-2: Resultados DMT obtenidos dentro de la CC para σ' confinamiento de 100 [Kpa] (Balachowski, 2006).	45
Figura 4-3: Rigidez v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: lineal (Balachowski, 2006). 46	
Figura 4-4:Ángulo de fricción v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: lineal (Balachowski,2006).	47
Figura 4-5:Ángulo de dilatación v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: logarítmica (Balachowski, 2006).	47
Figura 4-6: Deflexión del centro de la membrana: 1) viga simplemente apoyada en condición de deformaciones planas 2) placa circular (Balachowski, 2006).....	48
Figura 4-7: Distribución del esfuerzo de contacto normal sobre la mitad de la membrana (Balachowski, 2006).	49
Figura 5-1: Diagrama general de la simulación realizada en esta memoria.....	53
Figura 5-2: Esquema de deformación del suelo considerando la cuchilla dispuesta horizontalmente para modelo tipo de a) deformaciones planas b) axisimétrico.	57
Figura 5-3: Esquema de deformación del suelo considerando la cuchilla dispuesta verticalmente para modelo tipo de a) deformaciones planas b) axisimétrico.	57
Figura 5-4: Modelo 2-D del sistema paleta DMT-CC: a) Sección transversal representativa del problema y b) acercamiento a la paleta DMT.	58
Figura 5-5: Ejemplo de la malla deformada cuando la paleta es insertada en el suelo.	58

Figura 5-6: Curvas asintóticas de esfuerzo correspondientes a puntos de tensión bajo la paleta.....	59
Figura 5-7: Curvas asintóticas de esfuerzo correspondientes a puntos de tensión próximos a la membrana.....	59
Figura 5-8: Ejemplo de la malla deformada cuando la membrana es expandida (imagen ampliada).	60
Figura 5-9: Definición del área de dominio con la cual se obtendrá el esfuerzo promedio.	61
Figura 5-10: Distribución de esfuerzo de contacto normal asociado a la expansión de la membrana para una muestra granular densa confinada a 50 [kPa].	61
Figura 5-11: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de la coordenada X, que define las áreas de dominios consideradas.	63
Figura 5-12: Curvas de distribución de presión para distintos grados de refinamiento.	64
Figura 5-13: Comparación entre distribuciones de esfuerzos extraídas directamente de Plaxis y distribuciones suavizadas.	66
Figura 5-14: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores del espesor del contorno de la paleta DMT.	67
Figura 5-15: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos espesores de membrana considerados.	68
Figura 5-16: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de rigideces considerados.	70
Figura 5-17: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de pesos específicos considerados.	71
Figura 5-18: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos Coeficientes de Poisson.....	72
Figura 5-19: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de Rinter considerados ..	73
Figura 5-20: Definición de las dimensiones de la paleta (Finno, 1993).....	74
Figura 5-21: Curvas de distribución de esfuerzos para las dos formas de paletas consideradas.....	74
Figura 5-22: Comparación de curvas de distribución de esfuerzos a lo largo de la membrana para distintos radios de la CC y para dos casos de refinamiento.	75
Figura 5-23: Campo U_x para una paleta definida sólo por elementos placa de borde (modo 1).	76
Figura 5-24: Campo U_x para una paleta definida por elementos placa de borde y membrana de 200 [mm] (modo 2).	77
Figura 5-25: Campo U_x para una paleta definida por elementos placa de borde, membrana de 200 [mm] e interfaz suelo-estructura (modo 3).....	77
Figura 5-26: Curvas de esfuerzos y desplazamiento para la inserción de la paleta con membrana e interfaz.....	78
Figura 5-27: Campo U_x de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interfaz para una inserción vertical de 1 [cm].	78

Figura 5-28: Campo U_x para la sección transversal completa.	79
Figura 5-29: Campo U_y de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interaz para una inserción vertical de 1 [cm].	79
Figura 5-30: Campo U de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interaz para una inserción vertical de 1 [cm].	80
Figura 5-31: Lecturas A y B para una muestra suelta a 100 [kPa] obtenidas en laboratorio o simulación.	86
Figura 6-1: Comparación entre el modelo de Balachowski y el realizado en esta memoria, para la muestra Densa a 50 [kPa] para el caso a) Rigidez constante y b) Ángulo de Fricción constante.	89
Figura 6-2: Comparación entre el modelo de Balachowski y el realizado en esta memoria, para la muestra Suelta a 50 [kPa] para el caso a) Rigidez constante y b) Ángulo de Fricción constante.	89
Figura 6-3: Análisis de sensibilidad porcentual para la muestra Densa, donde a) Lectura A y b) Lectura B.	90
Figura 6-4: Análisis de sensibilidad porcentual para la muestra Suelta, donde a) Lectura A y b) Lectura B.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Clasificación del suelo a partir de ID (Marchetti, 1980).....	16
Tabla 2-2: Parámetros obtenidos gracias al ensayo DMT.....	17
Tabla 2-3: Coeficientes empíricos ecuación Schmertmann (2-28) para el ensayo DMT.....	32
Tabla 2-4: Coeficientes empíricos ecuación de Lacelllota (2-29) para el ensayo DMT.	32
Tabla 2-5: Coeficientes empíricos para las ecuaciones (2-30) y (2-31).....	33
Tabla 4-1: Tipos de condiciones de borde de la cámara de calibración.	45
Tabla 4-2: Lecturas A y B para la muestra suelta y densa confinada a 50 [kPa].	45
Tabla 4-3: Lecturas aproximadas para la muestra suelta y densa confinada a 100 [kPa].	46
Tabla 4-4: Parámetros del suelo para un presión de confinamiento de 50 [kPa].	46
Tabla 4-5: Parámetros de resistencia y rigidez para una arena suelta y otra densa.	47
Tabla 4-6: Esfuerzo promedio de contacto normal sobre la membrana calculado para arena densa a 50 [kPa] de presión de confinamiento.....	50
Tabla 4-7: Esfuerzo promedio de contacto normal sobre la membrana calculado para arena suelta a 50 [kPa] de presión de confinamiento.....	50
Tabla 5-1: Rango de valores para el coeficiente de Poisson en suelos granulares (Braja M. Das, 2008)	52
Tabla 5-2: Influencia del radio de la CC y del área del dominio de suelo en el calculo del esfuerzo promedio.	62
Tabla 5-3: Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y una área de dominio asociada a $X=0,0085$ [m] para una muestra densa confinada a 50 [kPa].....	63
Tabla 5-4: Calculo del esfuerzo de contacto normal promedio en la membrana.	65
Tabla 5-5: Variación del espesor del contorno de la paleta DMT.....	66
Tabla 5-6: Variación del espesor de la membrana.	67
Tabla 5-7: Deflexión de la membrana para distintos espesores de la membrana (amplificado).	69
Tabla 5-8: Variación de la rigidez del dominio de la paleta DMT.....	70
Tabla 5-9: Variación del peso específico.	71
Tabla 5-10: Variación del coeficiente de Poisson.	72
Tabla 5-11: Variación del valor de Rinter	72
Tabla 5-12: Variación en el esfuerzo promedio al considerar distintos tipos de paletas DMT.....	74
Tabla 5-13: Variación del radio de la cámara de calibración CC.....	75
Tabla 5-14: Parámetros que definen el modelo de Mohr-Coulomb.	81

Tabla 5-15: Definición del conjunto de datos de la muestra de arena densa confinada a 50 [kPa]. .	82
Tabla 5-16: Definición del conjunto de datos que definen el dominio de la paleta DMT.	83
Tabla 5-17: Definición del conjunto de datos que define los contornos de la paleta para : a) caso estacionario y b) caso continuo.	84
Tabla 5-18: Definición del conjunto de datos para la membrana de 15 [mm] de espesor.	84
Tabla 5-19: Resultados para la muestra densa sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa].	84
Tabla 5-20: Definición del conjunto de datos de la muestra de arena suelta confinada a 50 [kPa]. .	85
Tabla 5-21: Resultados para la muestra suelta sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa].	85
Tabla 5-22: : Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y áreas de dominio para una muestra suelta confinada a 50 [kPa].	85
Tabla 5-23: Definición del dominio de suelo para una muestra suelta confinada a 100 [kPa].	86
Tabla 5-24: Comparación de los resultados obtenidos en laboratorio con los obtenidos en la simulación.	86
Tabla 6-1: Analisis de sensibilidad para muestra densa confinada a 50 [kPa].	88
Tabla 6-2: Analisis de sensibilidad para muestra suelta confinada a 50 [kPa].	88
Tabla 6-3: Variación porcentual de E , ϕ y Ψ para la muestra densa confinada a 50 [kPa].	89
Tabla 6-4: Variación porcentual de E , ϕ y Ψ para la muestra suelta confinada a 50 [kPa].	90
Tabla 6-5: Comparación de resultados para el método estacionario.	91
Tabla 6-6: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Densa 50 [kPa].	92
Tabla 6-7: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Suelta 50 [kPa].	92
Tabla 6-8: Interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio para muestra Densa 100 [kPa].	93
Tabla 6-9: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Suelta 100 [kPa].	94
Tabla 6-10: Resumen de la interpretación de datos para los parámetros de rigidez y resistencia.	95

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

Chile posee una gran actividad sísmica en casi toda su extensión, donde es posible registrar movimientos telúricos de distinta magnitud, prácticamente, dentro de todo el año en distintas zonas del país. Debido a esta naturaleza sísmica y a los objetivos de minimizar las pérdidas materiales y evitar pérdidas humanas se han desarrollado normas que regulan el diseño de estructuras, fijando límites de desempeño mínimos. En sus inicios, estas normas estaban enfocadas principalmente en el diseño de los elementos estructurales bajo cargas sísmicas, sin otorgarle demasiada importancia al suelo soportante; no obstante, en sus versiones posteriores (NCh433.Of96 y Decreto Supremo DS61 de 2011) la caracterización del suelo paso a ser un requerimiento fundamental en el diseño de una estructura.

En la actualidad en Chile, la exploración del subsuelo se encuentra dominada por el uso del ensayo SPT (del inglés, Standard Penetration Test) y en menor medida del ensayo CPT (del inglés, Cone Penetration Test); sin embargo, su extenso uso no implica necesariamente que sean los ensayos más adecuados. Algunos investigadores incitan a abandonar el uso del ensayo SPT, por ser considerado poco confiable (Robertson, 2012) y por basarse en un índice N, número de golpes/pie, que carece de sentido real y físico (Mayne et al, 2009) cuando N es usado para correlacionar parámetros geotécnicos de resistencia y rigidez del suelo.

Las nuevas y mejores alternativas de equipos de ensayos de penetración en terreno que existen hoy en día para medir los parámetros geotécnicos de interés poseen una mejor repetibilidad y precisión, el costo de ejecución del ensayo podría ser menor y en algunos casos existe mayor rapidez en la obtención de información con respecto a ensayos convencionales. Considerando estas ventajas, es natural que ensayos de estas características adquieran una mayor participación en la caracterización del subsuelo, por ejemplo, el ensayo DMT (Dilatómetro plano de Marchetti). Al incorporarle sensores sísmicos se le conoce como SDMT y éstos se utilizan para medir las velocidades de ondas de cortes (v_s).

El ensayo DMT tiene gran importancia a nivel internacional, siendo empleado en casi todos los países industrializados, ya que el equipo es confiable, adaptable y robusto. Por otro lado, este ensayo aún no posee gran presencia en el territorio nacional, sin embargo, se sabe que la empresa Empro Ltda. es reconocida como un distribuidor oficial del equipo en Santiago y que el laboratorio de geomateriales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (LGM-UCSC) posee el equipo, el cual ha sido estudiado y difundido por el profesor Felipe Villalobos (2013).

Gracias a la gran cantidad de información del suelo que es posible obtener con el equipo DMT o SDMT, a las aplicaciones geotécnicas que permite realizar y al considerar las ventajas que posee con respecto a ensayos de penetración convencionales, se podría decir que este ensayo no tan utilizado en el país podría llegar a convertirse en una alternativa interesante para futuros estudios geotécnicos. En consecuencia, en esta memoria se presenta el equipo, procedimientos y aplicaciones del ensayo DMT, además, se propone un modelado numérico de la ejecución del ensayo DMT dentro de una cámara de calibración, la cual posee condiciones de bordes bien definidas y permite cierto control sobre la muestra a ensayar. El modelado numérico de esta memoria se apoya y valida en el

trabajo de Balachowski (2006), el cual aporta con mediciones de laboratorio y su propia simulación del ensayo DMT dentro de una cámara de calibración. Finalmente, la simulación desarrollada en esta memoria podría dar origen a los primeros pasos para lograr una ejecución virtual de un ensayo DMT en terreno, apoyándose quizás en la información obtenida de los ensayos SPT o CPT, o con los resultados de ensayos geofísicos sumados a la inspección de calicatas o sondajes para poder representar el terreno donde se ejecutará este ensayo virtual.

1.2. Historia

El DMT fue desarrollado en Italia por el profesor Silvano Marchetti de la universidad de L'Aquila en 1980, éste fue concebido con la idea de obtener un módulo operacional confiable para realizar un análisis del problema asociado a pilotes cargados lateralmente; con posterioridad la interpretación de los resultados de este ensayo se extendió, pudiendo proporcionar medidas en terreno de la rigidez, esfuerzo y el historial de tensiones del suelo.

En la actualidad existen alrededor de 50 países que utilizan este ensayo y su uso se está expandiendo en el resto del mundo, por lo tanto, debido al creciente interés asociado al ensayo DMT comenzaron a gestarse intentos para establecer las bases para las buenas prácticas y para obtener un entendimiento sistemático. El equipo y procedimiento es descrito en detalle en el informe preparado por el ISSMGE en el comité TC16 (2001). Luego fue necesario estandarizar su procedimiento e interpretación, con el fin de obtener resultados reproducibles en cualquier sitio, de modo que, el ensayo se estandarizó a través de la norma ASTM D6635 (2001, 2007) y el Eurocode7 (1997, 2007). Federal Highway Administration (FHWA) produjo un manual práctico destinado a incentivar el uso del ensayo en Estados Unidos. Este interés dio lugar a que se realizarán conferencias y seminarios en diversas partes del mundo.; el DMT fue apareciendo como palabra clave, asociada a investigaciones del área, por ejemplo, en trabajos realizados por: Lacasse y Lunne (1986), Robertson (1987), Powell y Uglow (1988), Marchetti y Totani (1989), Kamey y Iwasaki (1995), Mayne (1999), entre otros.

1.3. Objetivos del Estudio

El modelado numérico desarrollado en esta memoria sólo pretende obtener los resultados adquiridos por el equipo DMT en un ciclo del ensayo, puntualmente, las lecturas de presiones A y B. Estos resultados serán estudiados y comparados con valores medidos en laboratorio con el fin de evaluar su validez, por lo tanto, se proponen los siguientes objetivos:

- Presentar el equipo, alcance, procedimientos y aplicaciones del ensayo del dilatómetro plano de Marchetti (DMT).
- Presentar las últimas correlaciones y la comprensión de éstas, basándose en los más recientes documentos oficiales. Estas correlaciones son las que permiten obtener los parámetros que definen el comportamiento del suelo.
- Reproducir la respuesta del suelo granular cuando se realiza un ensayo DMT dentro de una cámara de calibración mediante una simulación numérica realizada en Plaxis.
- Validar la simulación del ensayo DMT realizada en Plaxis, comparando estos resultados con los resultados obtenidos del ensayo DMT ejecutado dentro de una cámara de calibración (Balachowski, 2006).

- Realizar un análisis de sensibilidad para determinar la importancia en la exactitud de cada variable que representa las condiciones del terreno o muestra que se utiliza en la simulación del ensayo.

No se encuentra dentro del alcance de esta memoria: la obtención de velocidades de onda de corte v_s , obtenidas gracias al ensayo SDMT, ni la lectura C que se obtiene al desinflar lentamente la membrana.

1.4. Metodología

Para responder a los objetivos generales y específicos propuestos anteriormente se ha estructurado el desarrollo de esta memoria considerando los siguientes capítulos mencionados a continuación:

- **CAPÍTULO 2, Revisión de la Literatura:** Se presenta la información más reciente, extraída de textos oficiales y autores destacados, relacionada con el ensayo DMT. Los temas que se tocarán son: el equipo, procedimiento, parámetros geotécnicos obtenidos. Las aplicaciones asociadas al ensayo se presentan en el Anexo C.
- **CAPÍTULO 3, Elementos Finitos:** Describe el software con el cual se realizará el modelado numérico, además, se describen las distintas opciones, subprogramas y modelos constitutivos contenidos en Plaxis 2-D.
- **CAPÍTULO 4, Caso de estudio Base:** Se presenta el trabajo de Balachowski, el cual contiene ensayos de laboratorio en cámara calibración y un modelo numérico.
- **CAPÍTULO 5, Modelo Numérico Propuesto:** Muestra el desarrollo del modelo numérico propuesto del ensayo DMT, el cual permite llevar a cabo la simulación de la ejecución del ensayo teniendo en cuenta las fases de inserción y expansión. Además, se evalúa la influencia en los resultados de los componentes y dimensiones considerando la sección representativa del problema en el modelo geométrico. Por último, se valida el modelo utilizando la información contenida en el CAPÍTULO 4, con la cual es posible realizar una comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio, en conjunto con los resultados de la simulación hecha por Balachowski con los resultados obtenidos de la simulación presentada en esta memoria
- **CAPÍTULO 6, Análisis de Resultados:** Una vez validados los resultados de la simulación, éstos se analizan por medio de un análisis de sensibilidad, además, se estudia la influencia de los componentes de la paleta en la lectura A; se realiza una comparación entre el método continuo con el método estacionario (sin considerar la distorsión del suelo); y por último, se llevará a cabo una interpretación de los datos utilizando las correlaciones señaladas en el CAPÍTULO 2.
- **CAPÍTULO 7, Conclusiones.**

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la información más reciente, extraída de textos oficiales y autores destacados, relacionada con el ensayo DMT. Los temas que se tocarán son: el equipo, procedimiento, parámetros geotécnicos obtenidos y sus aplicaciones.

Este ensayo es apropiado para una gran variedad de suelos, tales como: suelos extremadamente blandos, suelos duros y rocas blandas. El DMT resulta adecuado para arcillas, limos y arenas; cuyas partículas son pequeñas comparadas con el diámetro de la membrana (60 [mm]). No se recomienda para grava y roca, sin embargo, la paleta es lo suficientemente robusta para atravesar capas de gravas de un espesor alrededor de 0,5 [m]. Las arcillas se pueden ensayar entre valores de esfuerzo de corte no drenado (C_u) de 2 a 4 [KPa] hasta 1000 [KPa]; el intervalo de variación del módulo de rigidez, vertical drenado unidimensional bajo tensión geostática σ'_{v0} (M_{DMT}), se encuentra dentro del rango de 0,4 a 400 [MPa]. Las lecturas del ensayo son muy precisas incluso en suelos de consistencia casi líquida.

2.2. Descripción del equipo DMT

El DMT está compuesto por una paleta de acero inoxidable, que posee una delgada membrana circular expandible de acero montada a ras en una de las superficies de sus caras. La paleta está conectada mediante una manguera electro-neumática, que corre a lo largo de las barras de hincado, a una caja de control en la superficie. La unidad de control está equipada con manómetros, una señal audiovisual, una válvula de regulación de la presión del gas (proporcionado por un tanque) y válvulas de descarga. En la Figura 2-1 es posible apreciar los componentes del equipo señalados anteriormente.

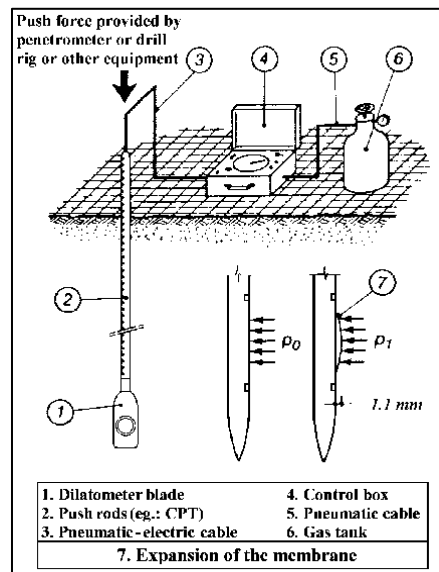


Figura 2-1: Disposición general del equipo DMT (ISSMGE TC-16, 2001).

A continuación, se realiza una breve descripción de los componentes, de acuerdo a la enumeración propuesta en la Figura 2-1. La cuchilla de acero inoxidable (1) es robusta, pudiendo soportar un empuje de hasta 250 [kN]; la cuchilla se encuentra conectada a la unidad de control mediante una manguera electro-neumática (3), que corre a lo largo de las barras de hincado (2), capaz de proporcionar gas y electricidad. Las dimensiones de la cuchilla se aprecian en la Figura 2-2. La membrana circular expandible de acero inoxidable (7) se encuentra montada a ras en una de las caras de la paleta, cuyas dimensiones son: 60 [mm] de diámetro y su espesor normal corresponde a 0,2 [mm], pudiendo ser de hasta 0,25 [mm] si se piensa que el suelo podría dañar la membrana.

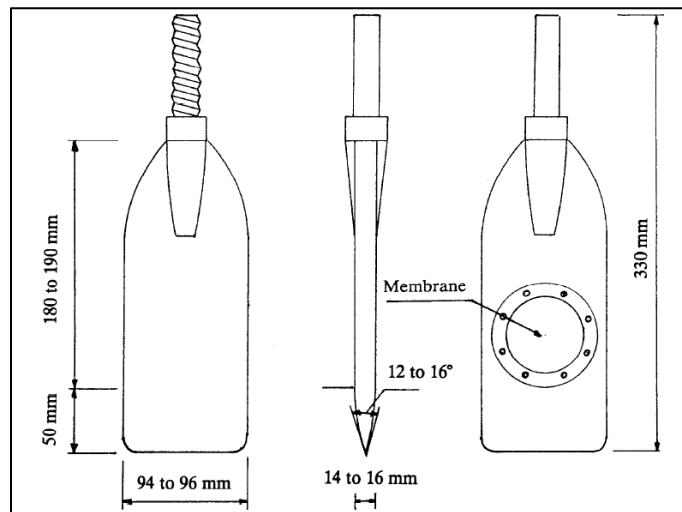


Figura 2-2: Dimensiones de la paleta DMT (US DOT, 1992).

La unidad de control (4) se encuentra en superficie. En la Figura 2-3 se presentan sus componentes, los cuales son: dos manómetros, válvula para controlar la presión del gas, dos válvulas de descarga (rápida y lenta), un galvanómetro y la señal audiovisual que indica cuando registrar las presiones A, B y C.

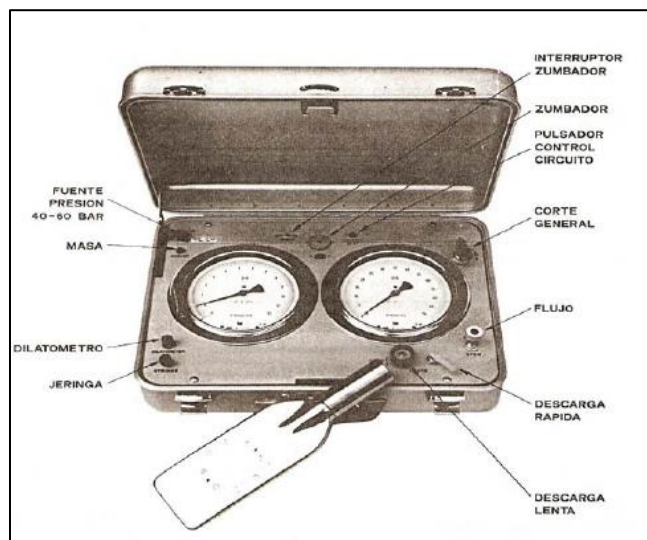


Figura 2-3: Detalle de la unidad de control superficie (Gil Mejia, 2004).

Los dos manómetros conectados en paralelo tienen rangos de escalas diferentes, existiendo uno bajo que va desde 0 hasta 1 [MPa], que deja de funcionar cuando ya se ha superado su límite superior, dándole paso al otro manómetro que posee un rango desde 1 [MPa] hasta 6 [MPa]. Esto permite utilizar el ensayo en una amplia gama de suelos y lograr una gran precisión en los resultados. De acuerdo con el Eurocode7 (1997) las presiones deben ser medidas con una resolución de 10 [kPa] y tener una reproducibilidad de al menos 2,5 [kPa] para presiones menores que 500 [kPa]. Las válvulas de control permiten regular el flujo de gas hacia la paleta del DMT. La válvula principal realiza un corte general entre la fuente de gas y el sistema unidad de control- paleta DMT. La válvula de flujo es usada para controlar la velocidad del fluido durante el ensayo. La válvula de descarga rápida permite al sistema alcanzar rápidamente la presión atmosférica y la válvula de descarga lenta permite una despresurización lenta para realizar el registro de la presión C.

La paleta se puede introducir en el terreno usando equipos de sondaje convencionales. La velocidad de penetración puede ser entre 1 a 3 [cm/seg] según el Eurocode7 (1997). El equipamiento adecuado para insertar verticalmente la paleta en el suelo puede ser el equipo que se utiliza en el ensayo del piezocono CPT, el cual ejerce un empuje cuasi-estático; o con un equipo de perforación necesario para traspasar suelos impenetrables o capas de rocas situadas por encima de la capa o capas a ensayar; la paleta también puede ser introducida utilizando un equipo de penetración dinámica/percusión, es decir, con equipos de perforación usados en ensayos SPT convencionales. La penetración dinámica altera y disminuye la precisión de las correlaciones, por lo tanto, es posible afirmar que el método de inserción sí afecta a los resultados.

Si el suelo es penetrable, el equipo más efectivo para introducir el dilatómetro es el penetrómetro estático del ensayo CPT, dado que ofrece continuidad entre una prueba y la siguiente, reduciendo los tiempos asociados a la ejecución del ensayo. Además, cuando el ensayo se realiza desde la superficie, el suelo ofrece soporte lateral a las barras de hincado, lo cual no se consigue cuando el ensayo se realiza dentro de un pozo perforado. Para este último caso, cuando el ensayo se realiza dentro de una perforación, los resultados iniciales obtenidos en la zona perturbada bajo el fondo de la perforación (3 a 5 diámetros del fondo del pozo), deben ser tratados con precaución; además, el diámetro de la perforación deber ser el menor posible y si es necesario se deberá encamisar para minimizar el riesgo de pandeo (100 a 200 [mm]). En el caso de la presencia de obstrucciones, un equipo de perforación convencional puede ser la mejor solución, ya que se utilizará para superar la barrera. Estos equipos ofrecen una mínima reacción condicionada por su peso, lo que permite una penetración estática limitada de unos cuantos metros por debajo del nivel del pozo, en definitiva, pueden ser usados sólo en suelos blandos o para pequeñas profundidades de exploración; en otros casos, el empleo de este equipo de penetración podría ser fuente de problemas. En la Figura 2-4 se presenta un esquema de ambos equipos de perforación recomendados.

Las barras de hincado (2) son usadas para transmitir el empuje ejercido por el equipo de perforación hacia la paleta del DMT. Aunque cualquier tipo de barras pueden ser utilizadas en este ensayo, generalmente, se usan aquellas empleadas en el ensayo CPT. Es posible utilizar un agente reductor de fricción, pero los resultados de éste son moderados, debido a que las cavidades dejadas, por el sistema paleta-barras de hincado, suelen tener bastantes irregularidades que aumentan la fricción. Además, en vista de que son el elemento más débil dentro del equipo de DMT, ha surgido la necesidad de crear barras con mayores espesores, ya que las cargas y largos de pandeo exigen una mayor rigidez en estos elementos.

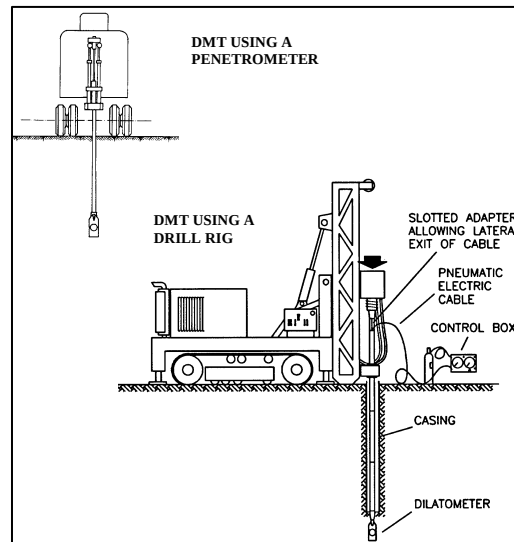


Figura 2-4: Equipo de inserción estática CPT (penetrómetro) y equipo de perforación (ISSMGE TC-16, 2001).

Algunos investigadores recomiendan registrar la magnitud del empuje requerido, para hincar la paleta dentro del suelo, como un procedimiento de rutina dentro del ensayo DMT (Schmertmann 1988, ASTM 1986, ASTM Draft 2001). El objetivo específico de esta medición es obtener la resistencia a la penetración de la paleta (q_d), este valor permite estimar el coeficiente lateral de empuje en reposo (K_0) y el ángulo de fricción (ϕ) en arenas, de acuerdo al método formulado por Schmertmann (1983). Medir q_d directamente es impracticable, una forma de medirlo es derivarlo de la fuerza de empuje, la cual se registra gracias a una celda de carga. La ubicación idónea para ubicar esta celda de carga sería inmediatamente por encima de la paleta del DMT, evitando el roce existente entre las barras y el suelo, pero esta ubicación de la celda es impracticable y sólo se utiliza para propósitos de investigación (Fretti Lopresti & Salgado, 1992), de ahí que, la celda de carga se ubica generalmente en la superficie. Como alternativas, prácticos métodos son indicados en ASTM (1986), las cuales corresponden a medir el empuje en la superficie de la tierra y restar la fricción parásita suelo-barras por encima de la cuchilla; otra alternativa, es medir el impulso necesario para la extracción y restarlo con el empuje requerido; una tercera alternativa, consiste en utilizar los valores del esfuerzo de falla asociado a la penetración de una punta cónica (q_c), de datos de ensayos CPT adyacentes, y asumir que $q_d \approx q_c$; y la última alternativa, consiste en convertir la cuenta de golpes dinámicos al esfuerzo de falla equivalente, usando correlaciones ya verificadas para un tipo de suelo.

2.3. Características del ensayo DMT

El DMT es un ensayo de carga lateral, inflado de la membrana, capaz de proporcionar información sobre la rigidez del suelo, información que no se puede obtener con otros ensayos de penetración, los cuales esencialmente miden las características de ruptura del suelo, obteniendo sólo información sobre la resistencia de falla del suelo. El DMT es un ensayo de penetración, por esta razón, tiene la ventaja de no requerir un sondaje previo. Las distorsiones causadas por la sonda del DMT son apreciablemente menores que la alteración ocasionada por puntas cónicas; esto se aprecia en la Figura 2-5, la cual muestra las distorsiones causadas por la penetración de una sonda cónica y una con forma de cuña en un suelo cohesivo (Baligh y Scott, 1975).

El equipo DMT es portátil, fácil de usar, excepcionalmente independiente del operador y sus resultados poseen una alta repetibilidad. El DMT ha probado ser de más bajo costo, menor tiempo de ejecución y mejor repetibilidad que algunos ensayos convencionales. Además, tiene la capacidad de proporcionar un índice de la historia de tensiones, el cual no se utiliza directamente en el diseño; sin embargo, conocer el historial tensional del suelo permite una mejor predicción del comportamiento dominante en el suelo.

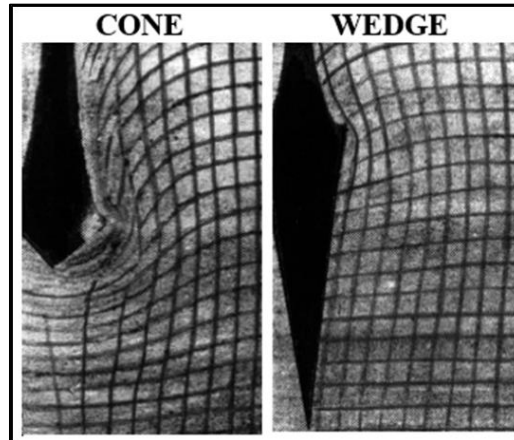


Figura 2-5: Distorsiones causadas por ensayo CPT y DMT respectivamente (Baligh y Scott, 1975).

2.4. Procedimiento

El dilatómetro es hincado verticalmente dentro del suelo, generalmente a una velocidad de hincado de 10 o 30 [mm/seg], deteniendo el avance de la cuchilla cada 20 [cm]. En cada parada se infla la membrana desde la unidad de control, con el objetivo de registrar lecturas de presión de acuerdo a dos desplazamientos prescritos. Posteriormente, se continúa hincando la cuchilla hasta la siguiente profundidad deseada y se vuelven a registrar las lecturas de presiones para esa nueva profundidad, repitiendo este procedimiento hasta adquirir la información necesaria para caracterizar un perfil del suelo. Tales lecturas de presiones se describen a continuación:

- **Lectura A:** Presión requerida para comenzar a expandir o levantar la membrana.
- **Lectura B:** Presión requerida para mover el centro de la membrana a una distancia de 1,1 [mm] en contra del suelo.
- **Lectura C (opcional):** Presión tomada al desinflar lentamente la membrana, después de haber registrado la presión B. La razón fundamental de esta medida es que en la arena esta lectura es aproximadamente igual a la presión de agua u_0 .

Las presiones A y B deben ser alcanzadas lentamente. El tiempo de espera entre la etapa de inserción y la etapa de inflado son unos pocos segundos. La velocidad de inflado debe asegurar registrar la lectura A dentro de los primeros 20 [s] una vez alcanzada la profundidad deseada y la velocidad de inflado en la lectura B debe asegurar tomar este registro dentro de los siguientes 20 [s] una vez registrada la lectura A. Los intervalos de tiempos anteriores corresponden a presiones muy bajas para suelos blandos, estos valores bajos son necesarios para obtener resultados precisos. El tiempo de 20 [s] entre la lectura A y B no debe reducirse, debido a que en este tiempo la membrana y suelo están en movimiento. Durante el ensayo se puede chequear si la velocidad es adecuada,

cerrando la válvula de flujo y observando cómo reaccionan las celdas de presión en la unidad de control, si la caída de presión es mayor al 2% al cerrar la válvula, significa que la velocidad es muy rápida y deberá ser reducida.

2.4.1. Ensayo de disipación

En suelos con baja permeabilidad al introducir el dilatómetro existe un aumento en la presión de poros, disipándose en un período mucho mayor al tiempo de ejecución normal de un ensayo DMT. En estos suelos es posible estimar los parámetros de flujo, gracias a los ensayos de disipación, los cuales consisten en detener la paleta DMT a una profundidad dada y luego monitorear el decaimiento del esfuerzo total horizontal (σ_h) en el tiempo, por lo tanto, este coeficiente de consolidación es obtenido a partir de la velocidad de decaimiento.

Los métodos de disipación se realizan, normalmente, durante la ejecución de un sondaje DMT. Se detiene el hincado de la paleta a una profundidad deseada, en donde se quieran obtener los parámetros de flujo, luego que el ensayo de disipación finalice se reanuda normalmente el procedimiento del ensayo. Los ensayos de disipación consumen gran cantidad de tiempo, por esta razón, sólo se realizan cuando es requerida la información de los parámetros de flujo; por ejemplo: en un suelo con muy poca permeabilidad, un ensayo de disipación puede durar 24 [hr] o más; en suelos más permeables, como un suelo limoso, el ensayo de disipación puede durar horas o minutos; y en suelos permeables estos ensayos no son posibles de ejecutar, ya que la disipación ocurre antes del primer minuto o tiempo de ejecución del ensayo. Asociados al ensayo DMT existen tres tipos métodos de disipación:

- Método DMT-A (Marchetti & Totani 1989 y ASTM Draft 2001).
- Método DMT-A2 (ASTM Draft 2001).
- Método DMT-C (Robertson et al. 1988).

El método DMT-A consiste en parar la paleta a una profundidad dada, después tomar a distintos intervalos de tiempo la lectura de A. Sólo se toma la lectura A, sin llegar nunca a la expansión asociada a la lectura B, ósea que, el operador abre la válvula de descarga rápida al momento de registrar la lectura A, (a este método se le dice también “A y desinflado”). Dado que este ensayo no registra la presión B en ningún momento, una vez detenida la paleta, este método no aporta información para completar el perfil geotécnico. Este método es el recomendado por el ISSMGE TC16 (2001).

El método DMT-C consiste en realizar en diferentes intervalos de tiempo un ciclo de lecturas A-B-C y graficar el decaimiento de las lecturas C tomadas al final de ciclo, esto se basa en la suposición de que p_2 , lectura C corregida, es aproximadamente igual a la presión de poros (u) que presiona la membrana. Entonces el método trata a la curva p_2 vs tiempo, como el decaimiento de la curva u ; por lo tanto, una vez que se complete la disipación el exceso de presión, u debería ser igual a u_0 . Esta suposición se ha encontrado válida para arcillas blandas, pero no lo es para arcillas sobreconsolidadas OC, por lo tanto, el método DMT-C debería ser usado con precaución. Schmertmann (1991) encontró una mejor aproximación para el decaimiento de u , el método DMT-A2, el cual es una evolución del método DMT-C y se aplica de la siguiente manera: primero se realiza un ciclo completo de A-B-C (sólo un ciclo), luego solo se toman lecturas A en diferentes intervalos de tiempos; el procedimiento es muy similar al del método DMT-A, con la diferencia que en el primer

ciclo se registra A-B-C. Cabe destacar que los métodos de medición: DMT-C y DMT-A2, sí registran la lectura B en el primer ciclo de registros, lo que corresponde al procedimiento normal del ensayo, luego se continúa monitoreando la caída de σ_h en el tiempo, por lo tanto, el primer registro sí sirve para caracterizar el perfil geotécnico.

2.5. Correcciones de las presiones

De acuerdo a lo sugerido por Marchetti y Crapps (1981) es necesario corregir las lecturas de presiones, debido a la rigidez de la membrana y otros factores. Este paso es fundamental para obtener valores más precisos en la interpretación de la información. Las presiones ΔA y ΔB son usadas para corregir a las presiones A y B. Se debe tener en cuenta que, bajo una presión atmosférica, la membrana se encuentra en una posición intermedia, entre la posición A y la posición B, ya que la membrana tiene una suave curvatura natural convexa, como se aprecia en la Figura 2-6.

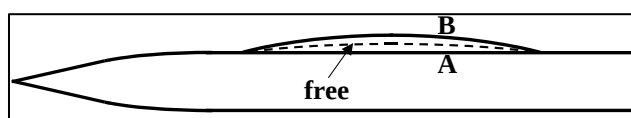


Figura 2-6: Posiciones de la membrana libre, A y B (ISSMGE TC-16, 2001).

- ΔA : Presión externa que debe ser aplicada a la membrana cuando ésta se encuentra expuesta al aire libre, de manera de garantizar que exista contacto perfecto entre la membrana y el sensor.
- ΔB : Presión interna que debe ser aplicada a la membrana cuando ésta se encuentra expuesta al aire libre, de manera de garantizar un desplazamiento del centro de la membrana de 1,1 [mm] con respecto al sensor.

Las presiones ΔA y ΔB pueden ser medidas mediante un procedimiento simple, en el cual se usa una jeringa para generar vacío o presión, manteniendo cerrada la válvula principal para evitar el ingreso de gas al sistema. Este procedimiento debe ser llevado a cabo antes y después de realizar un sondaje con el equipo DMT, en ambas oportunidades se miden estas presiones de corrección hasta llegar a un valor de convergencia. En la Figura 2-7 muestra la unidad de control cuando es dispuesta para obtener las presiones de corrección.

El Eurocode 7 (1997) exige que: ΔA debe estar dentro del rango de 5 a 30 [kPa] y ΔB debe estar dentro de 5 a 80 [kPa]. Cualquier membrana que no cumpla con estas exigencias debe ser reemplazada; además, una vez terminado el sondaje se volverán a registrar los valores de ΔA y ΔB , para luego verificar que no exista un cambio mayor en ΔA y ΔB de 25 [kPa] con respecto a los registros iniciales; en caso contrario, se deben considerar inválidos todos los resultados obtenidos en ese sondaje DMT y se deberá cambiar la membrana para proceder a realizar nuevamente el ensayo.

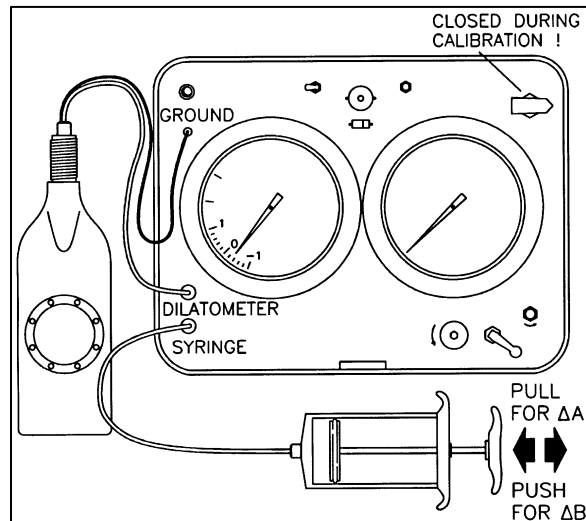


Figura 2-7: Esquema de las conexiones durante la corrección de la presión (ISSMGE TC-16, 2001).

Los valores de ΔA y ΔB , además, sirven para indicar cuando la membrana debe ser reemplazada. Una membrana antigua no necesita ser reemplazada, siempre y cuando los valores de ΔA y ΔB se encuentren dentro de los límites de tolerancia; incluso es preferible una membrana antigua a una nueva, ya que poseen valores más estables y más bajos. Los típicos valores de ΔA y ΔB son, $\Delta A=15$ [kPa] y $\Delta B=40$ [kPa].

Importancia de la precisión en la corrección

Una imprecisión en la determinación de los valores de ΔA y ΔB es considerada la única fuente de error instrumental en el ensayo DMT. Dado que los valores de ΔA y ΔB son utilizados para corregir todas las lecturas de A y B de un sondaje, cualquier imprecisión en ΔA y ΔB se transmitirá a toda la información. La importancia de ΔA y ΔB en suelos blandos radica en el hecho de que, en casos extremos como arcillas líquidas o arenas licuables, A y B son números pequeños, sólo un poco mayores que los valores de ΔA y ΔB ; y dado que la corrección involucra diferencias entre números similares, la precisión de ΔA y ΔB es importante en este caso.

Los valores de ΔA y ΔB deben ser medidos antes y después de realizar un sondaje DMT, su promedio es posteriormente usado para corregir todas las lecturas. Si la variación es pequeña el promedio representa a ΔA y ΔB razonablemente bien en toda su profundidad; si la variación fuera bastante, considerando el límite de 25 [kPa], el promedio sería inadecuado en algunas profundidades. En suelos de rigidez media los valores de ΔA y ΔB , representan un pequeño porcentaje de los valores totales de A y B, en consecuencia, el error es despreciable.

2.6. Comparación con otros ensayos geotécnicos

En ciertas ocasiones el ingeniero no dedica tiempo de su trabajo en medir las propiedades de deformación del suelo, en su lugar, estima esas propiedades usando toscas o brutas correlaciones con un posible error de 200%. Estas medidas pueden ser adecuadas si las condiciones del suelo son muy favorables y las cargas de las columnas son relativamente livianas; pero en un caso diferente el ingeniero a menudo recomendará un criterio de diseño bastante conservador, que podría considerar profundidades de fundación realmente innecesarias. Para evitar lo anterior, el ingeniero necesita

contar con información más precisa del suelo, con el fin de poder realizar predicciones certeras de asentamientos en fundaciones superficiales. Ensayos como el de compresión uniaxial, el ensayo edométrico y ensayos de penetración en terreno tales como: penetración estándar (SPT), ensayo penetrométrico estático (CPT), presiómetro (PMT) y el dilatómetro (DMT). Son utilizados para este fin, los cuales entregan un valor del módulo de rigidez del suelo que permite calcular asentamientos superficiales. Cabe mencionar que estos ensayos poseen un cierto riesgo de que ocurran asentamientos no deseables.

- 1) *Ensayo Edométrico*: Ensayo de consolidación, el cual es realizado en un edómetro en el laboratorio, entrega valores precisos de las propiedades de deformación. Sin embargo, generalmente es realizado a intervalos de profundidad de a 3 [m] o intervalos mayores; otro problema de este ensayo, es que demora bastante tiempo en realizarse, además, el proceso de muestreo y manipulación puede disminuir la certeza de los resultados notablemente.
- 2) *Ensayo de penetración estándar (SPT)*: Ensayo que mide el número de golpes de martillo (N) que se necesitan para que la muestra penetre 0,3 [m] dentro del suelo. El ensayo se realiza a intervalos de profundidad de 1,5 [m] en varias perforaciones dentro de una zona, con el fin de reunir suficiente información para realizar análisis probabilísticos. Existen distintos tipos de martillos, los cuales se diferencian en la cantidad de energía que estos entregan a la muestra al momento de golpearla; esto podría ser un inconveniente, ya que en ocasiones no se registra el tipo de martillo utilizado ni se toma en cuenta la cantidad de energía perdida producto del roce entre martillo y las barras, lo que significa una menor precisión de las correlaciones entre N-Módulo de rigidez. Por otra parte, este ensayo somete al suelo a un nivel de esfuerzo que provoca deformaciones que llevan al suelo a la falla; sin embargo, se sabe que las cargas estructurales comunes deforman los suelos dentro de niveles intermedios, por lo tanto, para obtener mediante este ensayo un módulo de deformación que sea útil en el diseño de estructuras, es necesario extrapolar la relación de esfuerzo-deformación de falla hasta un nivel intermedio de esfuerzo-deformación, lo cual es otra fuente de error asociado al cálculo del módulo de rigidez. La penetración dinámica de la muestra en suelos cohesivos es especialmente sensible, la cual tiene el efecto de remoldear el suelo; en suelos residuales, el ensayo SPT destruye la estructura de roca presente. En ambos casos las correlaciones a partir de un valor de N para un módulo de rigidez son muy pobres o inválidas.
- 3) *Ensayo penetrométrico estático*: Ensayo que mide la resistencia a la penetración de la punta cónica (q_c), a través de celdas calibradas de deformación, “strain gauges”. Este ensayo entrega información repetible a intervalos de profundidad entre 0,01 a 0,05 [m]. Al igual que el ensayo SPT deforma el suelo hasta la falla, no obstante, al ser un ensayo cuasi-estático tiene evidentemente una mayor precisión, pero aún se debe extrapolar la relación esfuerzo-deformación hasta un nivel intermedio de deformación para obtener el módulo de rigidez. El módulo tangente se calcula de acuerdo:

$$M = \alpha q_c$$

El valor a usar para el coeficiente adimensional α depende de la historia de tensiones y del tipo de suelo. Para suelos cohesivos α puede estar entre 1 a 8, en arenas normalmente-consolidadas entre 3 a 11 y en arenas sobre-consolidadas entre 5 a 30. El desconocimiento

sobre qué valor de α usar disminuye la precisión de la predicción en los asentamientos superficiales.

4) *Presiómetro*: Este ensayo deforma al suelo dentro de niveles intermedios de deformación, utilizando cargas estáticas, por esta razón, este ensayo entrega predicciones relativamente buenas, las cuales son establecidas en base a métodos empíricos. Es un ensayo que demanda gran cantidad de tiempo y se realiza a intervalos de 3 [m] o más. La cantidad y calidad de la información obtenida depende en gran medida de la experiencia del perforador.

5) *Dilatómetro*: Usa deformaciones estáticas para deformar el suelo dentro un rango de deformaciones intermedias. El ensayo entrega un módulo unidimensional tangente M a intervalos de 0,2 [m]. En capas delgadas de suelos compresibles, los ensayos son realizados a intervalos de profundidad de 0,1 [m] para obtener una mejor definición. La duración promedio de cada ensayo es aproximadamente 1 [min]. El ensayo ayuda a reducir las incertezas en el diseño gracias a que entrega perfiles de módulos de deformación repetibles y precisos.

El ensayo DMT utiliza cargas estáticas para ejercer en el suelo deformaciones de nivel intermedio, para luego encontrar un módulo de rigidez asociado a este nivel (al igual que el ensayo PMT). Existen otros ensayos, en donde se deforma el suelo hasta la falla y luego se obtiene un módulo de rigidez para un rango intermedio de deformaciones (CPT y SPT), existiendo un error asociado debido a la extrapolación de la información. El módulo de rigidez obtenido gracias a este ensayo no depende del valor de un coeficiente, cuya selección posee cierta naturaleza subjetiva, como en el caso del ensayo CPT. La Figura 2-8 muestra los distintos niveles de deformaciones que alcanza el suelo en cada uno de los tipos de ensayos mencionados anteriormente. Además, el ensayo DMT se puede realizar a intervalos de profundidad entre: 0,1 a 0,2 [m], según el nivel deseado que se quiera obtener en la definición de la compresibilidad del suelo, y su tiempo de ejecución es significativamente menor al de otros ensayos (edómetro y PMT). Por otra parte, no es necesario que el ensayo sea realizado por un operador experimentado, como en el caso del ensayo PMT, ya que el procedimiento del ensayo es bastante sencillo (revisar ANEXO A).

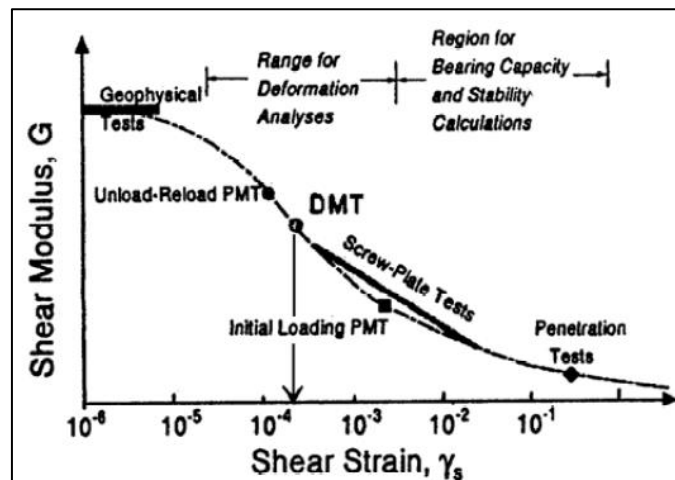


Figura 2-8: Decaimiento del módulo de corte con el nivel de deformaciones y posible rango de deformaciones para el módulo de diferentes ensayos en terreno (Mayne, 2001).

Failmezger & Bullock (2011) recomiendan utilizar la información obtenida con el ensayo DMT para medir directamente el módulo de deformación, además, afirman que este ensayo posee un menor riesgo de falla asociado al cálculo de asentamientos superficiales que los ensayos antes mencionados. No recomiendan el uso del ensayo SPT para la predicción de asentamientos, debido a su inherente variabilidad y a la correlación que relaciona el valor de N con el módulo de deformación. En general, se prefiere utilizar ensayos de penetración en terreno, ya que estos entregan más información, de manera más rápida y a un menor costo.

2.7. Resultados del ensayo

Los resultados obtenidos del ensayo DMT consisten en las lecturas de presión A y B. Las correlaciones que relacionan las lecturas de presión con los parámetros geotécnicos, han sido obtenidas gracias a una gran base de datos de parámetros de alta calidad, obtenidos en suelos verificados y controlados. Estas correlaciones están respaldadas por las experiencias de varios investigadores, en las cuales se ha comprobado la precisión de los parámetros obtenidos con respecto a sus valores reales (revisar los “history cases” que se encuentran en las direcciones web recomendadas en bibliografía y referencias). La interpretación de estas relaciones ha evolucionado desde las correlaciones originales de Marchetti (1980), dando paso a la creación de 3 parámetros intermedios: índice del material (I_D), índice de tensión horizontal (K_D) y el módulo de dilatómetro (E_D). A partir de estos tres índices se han propuesto correlaciones, que entregan información sobre los parámetros geotécnicos comunes del suelo, tales como: i) el peso específico del suelo (γ_s), ii) coeficiente de empuje lateral en reposo (K_0), iii) razón de sobreconsolidación (OCR), iv) módulo edométrico vertical drenado bajo tensión geoestática (M), v) esfuerzo de corte no drenado (c_u) y vi) ángulo de fricción (ϕ').

Debido a la naturaleza empírica de la interpretación de las lecturas de presiones obtenidas, existen correlaciones que son en parte específicas de un sitio en particular, por lo tanto, es posible esperar cierta dispersión entre la predicción y realidad; sin embargo, a pesar de su simplicidad, este ensayo ha probado ser bastante preciso, confiable y por medio de éste se obtienen resultados altamente reproducibles.

Correcciones a las lecturas A y B

Las lecturas de terreno A y B son corregidas considerando: los efectos de la rigidez de la membrana; el valor indicado en las celdas de presión cuando no se encuentra presurizado el equipo (presión atmosférica); y la altura de la antena sobre el sensor, que es parte del sistema interruptor de la señal audiovisual, de la paleta DMT (revisar **ANEXO B** para conocer en mayor detalle el sistema interruptor del equipo). Teniendo en cuenta estos efectos es posible determinar las presiones corregidas del ensayo DMT, mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$p_0 = 1,05(A - Z_m + \Delta A) - 0,05(B - Z_m - \Delta B) \quad (2-1)$$

$$p_1 = (B - Z_m - \Delta B) \quad (2-2)$$

Siendo

p_0 : Presión corregida asociada a la lectura A [kPa].

p_1 : Presión corregida asociada a la lectura B [kPa].

Z_m : Lectura de la celda de presión cuando el equipo se encuentra a presión atmosférica [kPa].

Las presiones corregidas p_0 y p_1 son utilizadas preferentemente en lugar de las presiones A y B obtenidas directamente por el equipo, para el uso de correlaciones e interpretación de los datos: que entregan los parámetros geotécnicos del suelo. La presión p_0 está inherentemente relacionada con el esfuerzo horizontal efectivo, también está relacionada con la presión de preconsolidación y la historia de tensiones; por otro lado, la diferencia entre p_0 y p_1 da las bases para la evaluación de la compresibilidad del suelo.

2.7.1. Parámetros intermedios

La interpretación del ensayo DMT está basada principalmente en correlaciones empíricas relacionadas con tres parámetros intermedios: índice del material (I_D), índice de tensión horizontal (K_D) y el módulo del dilatómetro (E_D). Los que son calculados utilizando las presiones corregidas p_1 y p_0 . Estos parámetros intermedios son derivados de las lecturas de campo A y B, por lo tanto, sólo dos de ellos corresponden a variables independientes, sin embargo, los tres parámetros intermedios I_D , K_D y E_D fueron introducidos, porque cada uno de ellos tiene un significado físico y utilidad ingenieril independiente.

- **Índice del material I_D**

Es un indicador del tipo de suelo; no obstante, se debe tener presente, que al utilizar este parámetro la clasificación del suelo no proviene de un análisis granulométrico, sino que refleja el comportamiento mecánico del suelo, así que, en cierto modo correspondería a un índice de rigidez. Por ejemplo, si una arcilla por una razón determinada se comportara de una forma más rígida que la mayoría de las arcillas, desde el punto de vista del valor de I_D será clasificada como un limo, si bien esta caracterización es incorrecta desde un enfoque granulométrico, puede ser relevante desde un punto de vista mecánico.

Es indicador es determinado mediante la siguiente expresión, que relaciona:

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (2-3)$$

u_0 : Presión de poros hidrostática [kPa].

Los valores de I_D oscilan desde 0,1 a 10 y su valor permanece constante para una capa homogénea de suelo. A continuación, se presenta la Tabla 2-1 con la cual se clasifica el tipo de suelo por medio de los valores de I_D .

Tabla 2-1: Clasificación del suelo a partir de I_D (Marchetti, 1980).

Tipo de Suelo	I_D
Turba/ Arcillas sensibles	<0,1
Arcilla	0,1-0,35
Arcilla limosa	0,35-0,60
Limo arcilloso	0,60-0,90
Limo	0,90-1,20
Limo arenoso	1,20-1,80
Arena limosa	1,80-3,3
Arena	>3,30

La Figura 2-9 corresponde a un gráfico cualitativo de presión v/s profundidad, el cual presenta la distribución de presiones p_0 y p_1 para dos tipos diferentes de suelos homogéneos: a) arcilla y b) arena. Clasificados utilizando I_D , donde es posible notar la diferencia de pendientes de las curvas de presión de acuerdo al tipo de suelo.

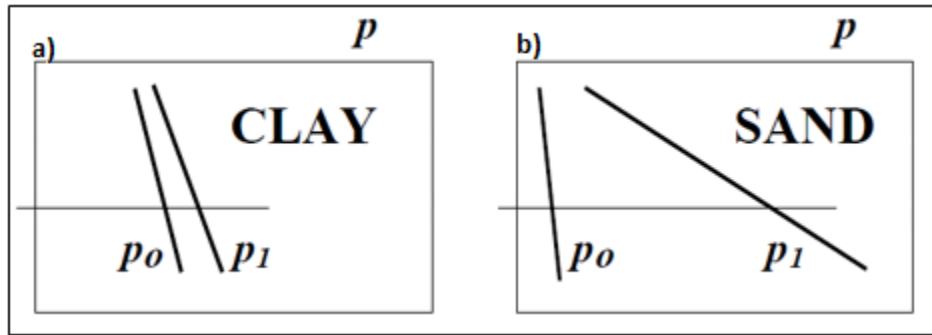


Figura 2-9: Ejemplo cualitativo sobre la clasificación del índice I_D (Marchetti, 1999).

- **Índice de tensión horizontal K_D**

Este índice corresponde a la base para la interpretación de varios parámetros del suelo y es fundamental para los resultados del ensayo. Puede ser considerado como el coeficiente de empuje lateral en reposo (K_0) amplificado por la penetración de la cuchilla. Es posible notar que el perfil de K_D posee una forma similar al perfil OCR, por lo tanto, es útil para entender la historia tensional en un depósito, teniendo en cuenta que para arcillas normalmente consolidadas sin cementar el valor de $K_D \approx 2$, es decir, que cuando $OCR=1$ el valor de K_D es aproximadamente igual a $K_D \approx 2$; por otro lado, cuando $K_D > 2$ indica preconsolidación, dando una idea en la variación existente de la historia de tensiones en el suelo con la profundidad. El valor de K_D se calcula mediante:

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (2-4)$$

σ'_{v0} : Esfuerzo vertical efectivo en el terreno.

Para fines prácticos se considera una arcilla normalmente consolidada (NC) cuando los valores de K_D oscilan entre 1,8 y 2,3.

- **Módulo del dilatómetro E_D**

El Módulo del dilatómetro E_D representa la relación esfuerzo-deformación, existente al expansionar la membrana del dilatómetro dentro del suelo. Se obtiene por medio de la teoría de

elasticidad, la geometría de la membrana y el desplazamiento de 1,1 [mm]. Para la obtención de este módulo se plantean ciertas hipótesis:

- El espacio alrededor del dilatómetro está formado por dos semi-espacios elásticos, en contacto a lo largo del plano de simetría de la cuchilla.
- Se estima un desplazamiento nulo fuera del área de carga.

Este desplazamiento se calcula mediante:

$$s_0 = \frac{2D(p_1 - p_0)}{\pi} \frac{(1 - \nu^2)}{E} \quad (2-5)$$

Siendo

E: El módulo de Young del suelo.

ν : Razón de Poisson del suelo.

D: Diámetro de la membrana= 60 [mm].

s_0 : Deflexión en el centro de la membrana, asociada a la lectura B se tiene $s_0=1,1$ [mm].

Al despejar E en la ecuación (2-5)(2-6) se tiene:

$$E_D = \frac{E}{1 - \nu^2} = 34,7(p_1 - p_0) \quad (2-6)$$

Este parámetro no debe utilizarse como un módulo de deformación, fundamentalmente, por la falta de información de la historia tensional; sólo debe ser utilizado en combinación con K_D e I_D , y no debe ser confundido con el módulo de Young.

(*) Se debe tener presente que los valores que definen las condiciones iniciales del terreno, como la presión de poros (u_0) y el esfuerzo vertical efectivo (σ'_{v0}), deben ser estimados considerando la situación anterior a la penetración de la paleta del dilatómetro.

2.7.2. Resultados haciendo uso de las correlaciones

Los parámetros intermedios del DMT son utilizados en los cálculos de parámetros geotécnicos clásicos de resistencia, deformabilidad e historia tensional. A continuación, se presenta la Tabla 2-2 que presenta los parámetros obtenidos gracias al ensayo DMT.

Tabla 2-2: Parámetros obtenidos gracias al ensayo DMT.

Parámetro	Aplica	Obtención tipo	Depende de	Fuente	Comentario
M_{DMT}	Arcilla/Arena	Empírica	$f(I_D, K_D, E_D)$	Marchetti 1980	
C_u	Arcilla	Empírica	$f(K_D, \sigma_v)$	Marchetti 1980	
C_h	Arcilla	Empírica	$f(A)$ o $f(C)$	Depende del método	Dependiendo del método de disipación
D_r	Arena	Empírica		Reyna & Chameau 1991	
K_0	Arcilla	Empírica	$f(K_D)$	Marchetti 1980	
K_0	Arena	Semi-Empírica	$f(K_D, \phi)$	Schmertmann 1983	3 métodos señalados en 2.7.2.2
OCR	Arcilla	Empírica	$f(K_D)$	Marchetti 1980	
OCR	Arena	Empírica	$f(M_{DMT}, q_c)$	Monaco et al. 2014	
ϕ	Arena	Teórica	$f(A, \sigma'_v, u_0, q_D)$	Schmertmann 1983	2 métodos señalados en 2.7.2.3.1
γ	Arcilla/Arena	Empírica	$f(I_D, E_D)$	Marchetti & Crapps 1981	
u_0	Arena	Empírica	$f(C)$	Campanella et al 1985	

2.7.2.1. Parámetros geotécnicos obtenidos independientemente del tipo de suelo

En esta sección se presentan las correlaciones que no hacen diferencia del tipo de suelo y que sólo dependen de los parámetros intermedios.

Módulo de rigidez

Muchos intentos se hicieron para correlacionar los parámetros intermedios del ensayo DMT y resultados obtenidos con el SDMT con la rigidez del suelo, obteniendo ciertos módulos de rigideces tales como: el módulo edométrico vertical drenado bajo tensión geostática σ'_{v0} , Módulo de Young y el Módulo de corte a pequeñas deformaciones.

- **Módulo edométrico vertical drenado bajo tensión geodésica (M)**

El módulo M determinado a partir del DMT, conocido como M_{DMT} , corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento σ'_{v0} del suelo, en el momento de ejecutar el ensayo, esto quiere decir que representa sólo un punto de la curva edométrica ε -p, este punto se encuentra asociado al esfuerzo geostático σ'_{v0} ; y este módulo es igual a uno determinado en el odómetro, el cual se obtiene por la siguiente relación:

$$E_{oed} = 1/m_v \quad (2-7)$$

Siendo

E_{oed} : Módulo edométrico [MPa].

m_v : Módulo de compresibilidad volumétrica [1/MPa].

La posibilidad de estimar el módulo confinado tanto en suelos cohesivos como en suelos granulares, es una de las principales aportaciones del ensayo DMT. El trabajo original de Marchetti (1980), se basó en la posibilidad de correlacionar este módulo confinado con el Módulo del dilatómetro E_D , tal como se muestra a continuación:

$$M_{DMT} = R_M E_D \quad (2-8)$$

Donde R_M es un coeficiente cuyos valores oscilan entre 1 y 3, y se encuentra en función de I_D y K_D . Las ecuaciones que entregan el valor de R_M son:

Si	$I_D \leq 0,6$	$R_M = 0,14 + 2,36 \log K_D$
	$I_D \geq 3$	$R_M = 0,5 + 2 \log K_D$
	$0,6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2,5 - R_{M,0}) \log K_D$
		$R_{M,0} = 0,14 + 0,15(I_D - 0,6)$
	$K_D > 10$	$R_M = 0,32 + 2,18 \log K_D$
Siempre que	$R_M < 0,85$	se utiliza $R_M = 0,85$

Dada la naturaleza de los parámetros correlacionados, es importante destacar que se está relacionando un módulo vertical drenado confinado (M_{DMT}) con otro que es un módulo horizontal no drenado, en el caso de arcillas, producto de la expansión horizontal de la membrana (E_D), por lo tanto, se espera que exista cierta dispersión en R_M .

Por otro lado, se sabe que la rigidez del suelo es influenciada en gran parte por la historia de tensiones en el suelo y del esfuerzo horizontal, E_D carece de esa información y no es posible apreciar esa dependencia, no obstante, M_{DMT} es un módulo que corrige esas carencias, al reflejar en cierto grado estos efectos a través del índice K_D presente en R_M .

La magnitud del M_{DMT} se encuentra dentro de un rango de valores de 0,4 a 400 [MPa]. El M_{DMT} debe ser usado del mismo modo en el que se utilizaría si éste fuera obtenido por otros ensayos, para luego ser empleado en alguno de los métodos existentes para evaluar asentamientos. La Figura 2-10 presenta una comparación a distintas profundidades entre los módulos de M_{DMT} y E_{oed} para un suelo arcilloso homogéneo, al revisar esta figura se puede apreciar una buena correlación entre ambos.

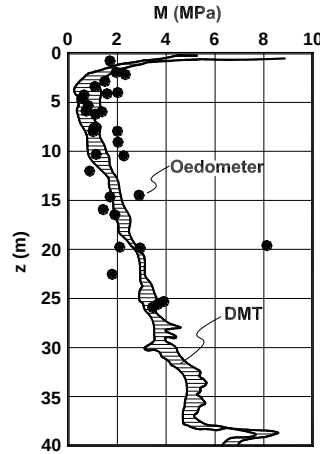


Figura 2-10: Ejemplo de una comparación entre M determinado por DMT y otro determinado por un odómetro con muestras de alta calidad, Noruega (Lacase, 1986).

- **Módulo de Young (E)**

El módulo de Young del esqueleto del suelo puede ser derivado directamente de M_{DMT} usando la teoría de la elasticidad:

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} M_{DMT} \quad (2-9)$$

Considerando el coeficiente de Poisson $\nu=0.25$, se tiene un $E' \approx 0.8M_{DMT}$. Otra aproximación, basada en la investigación de una gran cantidad de ensayos realizados en una cámara calibración ha producido buenas aproximaciones para sílice puro y arena (Jamiołkowski et al. 1988), donde el módulo de Young es definido en un nivel de 0.1% de deformación.

$$\frac{E'}{E_D} = 1,5 \pm 0,25 \text{ NC.} \quad (2-10)$$

$$\frac{E'}{E_D} = 3,66 \pm 0,8 \text{ OC.} \quad (2-11)$$

- **Máximo módulo de corte (G_0)**

Los investigadores Tanaka y Tanaka (1988) encontraron una relación en sitios de arcillas normalmente consolidadas, donde $K_D \approx 2$, la cual corresponde a $G_0/E_D \approx 7,5$, además, encontraron una relación para sitios de arena, donde observaron que G_0/E_D disminuye en cuanto K_D aumenta. En resumen, ellos notaron que G_0/E_D disminuye desde $G_0/E_D \approx 7,5$ para K_D (1,5-2) a $G_0/E_D \approx 2$ para $K_D > 5$ en suelos granulares.

Otro método para calcular esta rigidez para pequeñas deformaciones consiste en utilizar las estimaciones de las velocidades de las ondas de corte (v_s), obtenidas gracias al ensayo SDMT, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (2-12)$$

ρ : densidad del estrato

Peso específico (γ_s)

Marchetti y Crapps (1981) desarrollaron un ábaco para determinar el peso específico del suelo a partir de los parámetros intermedios I_D y E_D . Muchos investigadores han presentados ábacos modificados más cercanos a sus propias condiciones locales, no obstante, el ábaco original posee una buena precisión. El objetivo de la Figura 2-11 no es obtener valores precisos de γ_s , sino que es una herramienta para construir un perfil aproximado de σ'_{v0} , necesario en la obtención de resultados. En este gráfico se obtiene el peso específico (γ_s) al entrar con el par (I_D , E_D), también es posible notar que las líneas verticales clasifican al suelo de acuerdo a la Tabla 2-1 presentada anteriormente.

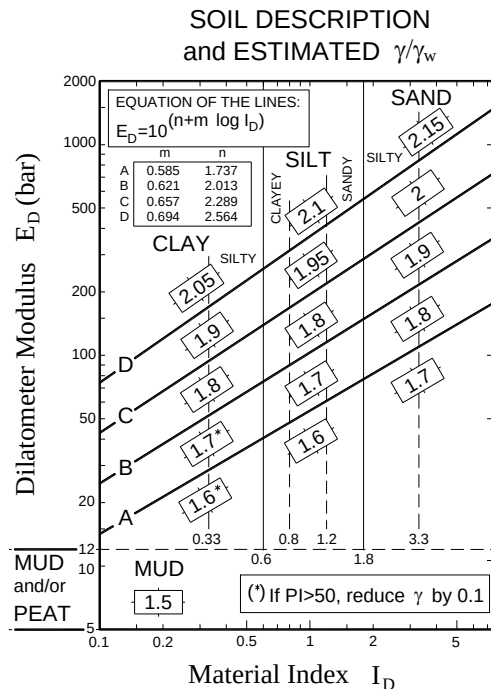


Figura 2-11: Gráfico para estimar el tipo de suelo y el peso específico γ , normalizado con respecto al peso específico del agua γ_w (Marchetti & Crapps, 1981).

2.7.2.2. Parámetros geotécnicos dependientes del tipo de suelo

Estos parámetros sí pueden ser calculados para arcillas y arenas, pero el método de cálculo es diferente dependiendo del tipo de suelo que se trate. Los parámetros que se encuentran en esta categoría son: coeficiente de empuje lateral en reposo (K_0) y la razón de sobreconsolidación (OCR).

Razón de sobreconsolidación (OCR)

La identificación de arcillas normalmente consolidadas viene del estudio de superficies de deslizamiento, gracias a este estudio se logra vincular que el valor de $K_D \approx 2$ se encuentra asociado una banda de deslizamiento de una superficie de arcilla, la cual no posee signos de envejecimiento ni de estructuración ni cementación, tal como se presentan las arcillas normalmente consolidadas (NC). Este hecho es consistente con la evidencia experimental, que dice que $K_D \approx 2$ equivale a $OCR=1$ (Totani et al. 1997). En todas las capas donde el deslizamiento fue confirmado por inclinómetros el valor de K_D fue aproximadamente 2.

El parecido entre los perfiles K_D y OCR en arcillas, ha sido confirmado por varias comparaciones realizadas o experiencias de investigadores (Jamiolkowski et al. 1988, Powell & Uglow 1988), pudiendo llegar a una expresión para arcillas normalmente consolidadas sin cementar:

$$OCR = (0,5K_D)^{1,56} \quad (2-13)$$

La correlación OCR- K_D es una buena base para conseguir una primera aproximación del perfil OCR o, por lo menos, entrega información preliminar sobre la forma de su perfil. Es por esto que, el perfil K_D es útil para tener una idea de la historia de tensiones, ya que ayuda a diferenciar a arcillas NC de arcillas OC, además, permite identificar cortezas disecadas superficiales o enterradas. Un pequeño cambio en los coeficientes de esta ecuación podría ser necesario para ajustarse mejor a las condiciones locales.

La inspección del perfil K_D revela la cementación fácilmente en el caso de arcillas NC, ya que cuando se tienen valores de $K_D \approx 3$ a 4 que permanecen constantes con la profundidad se indica cementación; además, es posible reconocer un depósito de arcilla NC, debido a que el valor de K_D no disminuye con la profundidad, como sí sucede en el caso de arcillas OC. Aunque se sabe que la cementación en arcillas OC muestra un decaimiento en el valor de K_D con la profundidad, esto no se aprecia fácilmente, ya que la correlación OCR- K_D sobrestima valores de OCR en este tipo de arcillas. Marchetti (2001) dice que la ecuación (2-13) no puede ser aplicada a arcillas con estructuras cementadas, incluyendo también a arcillas con envejecimiento y estructuración, debido a que estos efectos producen un aumento en el valor de K_D , mientras que el hincado de la cuchilla produce una destructuración del suelo que disminuye el valor de K_D , por lo tanto, la magnitud de estos efectos depende del agente cementante, por esta razón, no es posible encontrar una correlación $K_D - OCR$ estándar para un suelo cementado. Debido a este motivo, los datos de arcillas cementadas debieran ser separados de aquellas que no lo son, ya que no es posible crear una correlación única o promedio para ambas arcillas. En la Figura 2-12 se muestran dos ecuaciones para obtener OCR a partir del valor de K_D , la propuesta originalmente por Marchetti (1980) y la otra propuesta por Kamei & Iwasaki (1995), ambas son comparadas con mediciones de OCR en suelos cohesivos para distintos sitios geográficos.

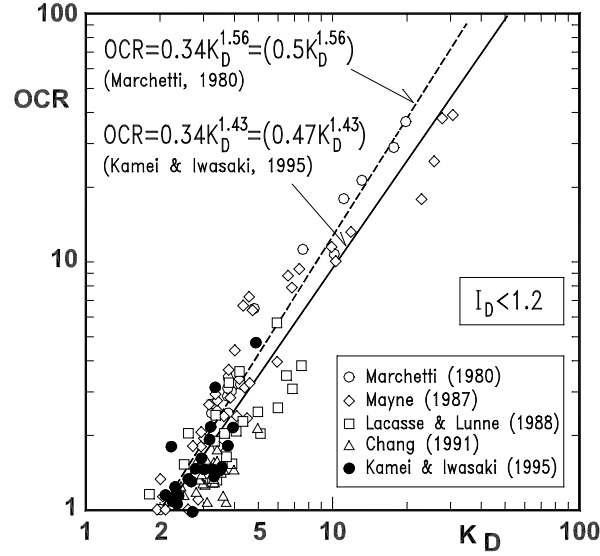


Figura 2-12: Correlación entre K_D y OCR para suelos cohesivos de varios sitios geográficos, (Kamei e Iwasaki).

Obtener perfiles OCR en arenas basándose en el parámetro K_D es mucho más complicado que en arcillas, ya que éste a menudo está vinculado a casos complejos de historias de cargas, desecación, cementación y otros efectos. Por otro lado, el perfil de OCR en arcillas puede ser determinado utilizando odómetros; pero en arenas no es posible, debido a la alteración inherente que existe al tomar muestras. Una forma de obtener una aproximación de OCR en arenas es utilizando más información, ya que el parámetro K_D no es capaz de entregar una buena estimación por sí sólo, por lo tanto, se usan los resultados de un ensayo CPT para caracterizar mejor este tipo de suelo:

$$\alpha = \frac{M_{DMT}}{q_c} \quad (2-14)$$

q_c : Esfuerzo de falla asociado a la penetración de una punta cónica [MPa].

El coeficiente α es adimensional y los valores que se obtienen en arenas-limo normalmente consolidadas (NC) oscilan entre 5 a 10 y para arenas-limo sobreconsolidados (OC) oscilan entre 12 a 24, es por ello, que este coeficiente puede ser considerado como una guía semi-cuantitativa de OCR. La veracidad de este coeficiente se comprobó gracias a investigaciones realizadas en terrenos de arena suelta, utilizando los resultados de ensayos DMT y CPT, antes y después de haber compactado el lugar (Jendeby 1992); además, en cámaras de calibración (Baldi et al. 1988), ensayos de plato de cargas; y terraplenes instrumentados (Jamiolkowski 1995). Este coeficiente de guía luego sirvió para establecer estimaciones de OCR, haciendo uso de correlaciones continuas, asociando los resultados de un estudio experimental en el sitio de investigación de Treporti-Venezia (Monaco et al. 2014), en donde se construyó un terraplén y luego fue removido 4 años después, permitiendo calcular valores de OCR a distintas profundidades por medio de otros métodos existentes. Posteriormente usando los valores de M_{DMT} y q_c en las capas de arena fue posible construir un gráfico OCR v/s M_{DMT}/q_c . En la Figura 2-13 se presenta la correlación obtenida en el trabajo de Monaco et al. (2014).

$$OCR = 0,0344(M_{DMT}/q_c)^2 - 0,4174(M_{DMT}/q_c) + 2,2914 \quad (2-15)$$

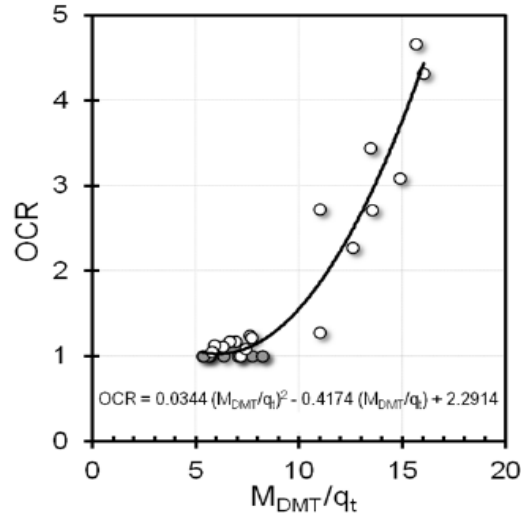


Figura 2-13: Correlación $OCR = f(M_{DMT}/Q_c)$ para las capas arenosas de la laguna Venice, (Monaco 2014).

Coefficiente de empuje lateral en reposo (K_0)

Varios esfuerzos se han llevado a cabo para correlacionar el K_0 con el índice de esfuerzo lateral K_D en arcillas sin cementar, muchos investigadores (e.g. Lacasse & Lunne 1988, Powell & Uglow 1988, Kulhawy & Mayne 1990) llegaron a expresiones similares a la ecuación original planteada por Marchetti (1980):

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{1.5} \right)^{0.47} - 0.6 \quad (2-16)$$

En arcillas cementadas esta relación puede sobrestimar en gran medida el valor de K_0 , ya que el parámetro K_D es muy sensible a la cementación. En general se puede afirmar que los valores de K_0 deducido a partir del dilatómetro, sí satisfacen ciertos requerimientos considerando la dificultad en la obtención mediciones precisas de K_0 , pues bien, en algunas aplicaciones sólo con estas aproximaciones es suficiente. La Figura 2-14 muestra un ejemplo de comparación de K_0 obtenidos por el DMT y por otros métodos, en dos sitios distintos de investigación.

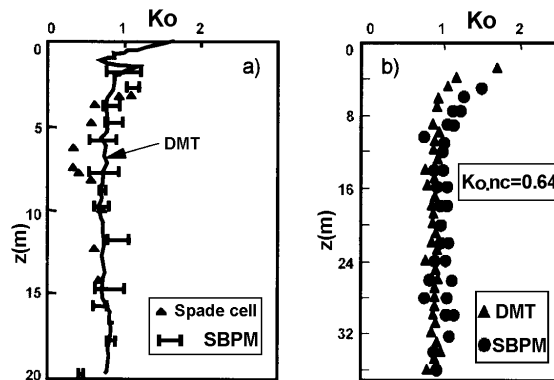


Figura 2-14: Comparación de los valores de (K_0) obtenidos mediante DMT y otros ensayos en dos depósitos arcillosos de investigación (Burghignoli et al, 1991).

La correlación original propuesta por Marchetti (1980) $K_0 - K_D$ entrega información confiable principalmente en arcillas, sin embargo, en depósitos de arena esta correlación no es precisa, quedando en evidencia que para determinar K_0 en arenas una correlación definida únicamente por un parámetro (K_D) no es suficiente, ya que depende también del ángulo de fricción (ϕ) o de la densidad relativa (D_r).

Actualmente existen tres posibles maneras de estimar K_0 en arenas limpias a partir del ensayo DMT:

1. Usando la Figura 2-15
2. Usando las ecuaciones de Baldi (1986)
3. Estimando OCR de la ecuación (2-15) luego utilizando la ecuación de Schmidt.

Al observar la Figura 2-15, es posible notar en el caso de arenas normalmente consolidadas la dependencia de ϕ antes mencionada. Schmertmann (1983) al notar este comportamiento, considero necesaria la creación de una nueva expresión para determinar K_0 en arenas, para esto utilizo resultados obtenidos en una cámara de calibración y propuso la siguiente expresión:

$$K_0 = \frac{40 + 23K_D - 86K_D(1 - \sin\phi_{ax}) + 152(1 - \sin\phi_{ax}) - 717(1 - \sin\phi_{ax})^2}{192 - 717(1 - \sin\phi_{ax})^2} \quad (2-17)$$

ϕ_{ax} : Ángulo de fricción obtenido en condiciones triaxiales.

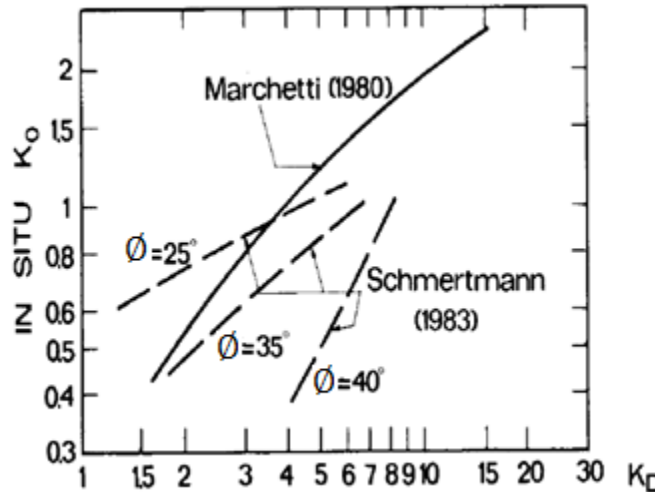


Figura 2-15: Relación $K_0 - K_D - \phi$, (Schmertmann y Crapps, 16 marzo 1983).

Para el empleo de la ecuación (2-17) se necesita conocer el valor de ϕ_{ax} , el cual también es una incógnita, por lo tanto, Schmertmann sugirió utilizar información adicional a K_D , entregado por el DMT, como el parámetro q_c del ensayo CPT o el esfuerzo de falla asociado a la penetración de una paleta plana (q_D). Para introducir esta variable adicional Schmertmann propuso utilizar una segunda ecuación, la ecuación de Durgunoglu y Mitchell (1975), la cual establece una interrelación entre q_c (o q_D) y las dos incógnitas K_0 y ϕ . Entonces se tiene:

$$K_D = f_1(K_0, \emptyset) \text{ Despejando } K_D \text{ en la ecuación (2-17)} \quad (2-18)$$

$$q_c = f_2(K_0, \emptyset) \text{ Durgunoglu y Mitchell} \quad (2-19)$$

Siendo éste un sistema bien condicionado, ya que K_D y q_c dependen ambos de K_0 y $\emptyset$, puesto que q_c se refleja más en el parámetro $\emptyset$ y K_D se refleja más en K_0 . El sistema puede ser resuelto por un procedimiento iterativo, propuesto por Schmertmann (1983). Para ver en mayor detalle este procedimiento iterativo se recomienda revisar en la bibliografía el texto US DOT.

Con el fin simplificar el procedimiento iterativo propuesto por Schmertmann, Marchetti (1985) utilizó ambas ecuaciones propuestas y pudo eliminar la influencia del parámetro $\emptyset$, para crear un gráfico, Figura 2-16, útil para encontrar el valor de K_0 , una vez ya conocidos los valores de K_D y q_c . Este gráfico contiene curvas continuas, obtenidas gracias a ensayos de cámara de calibración. Además, posee una escala adicional para el parámetro q_c/σ'_v , la cual está basada en la información de 25 puntos ($q_c/\sigma'_v, K_D, K_0$) de una arena de río, donde K_0 tiene un valor estimado promedio de 0,55. La Figura 2-16 puede ser utilizada para estimar un rango esperable de K_0 .

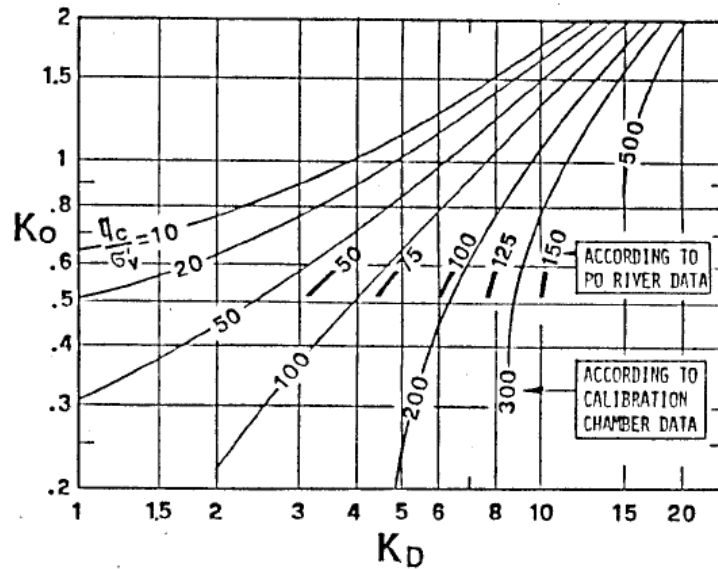


Figura 2-16: Gráfico para evaluar $K_0 = f(K_D, q_c/\sigma'_v)$, (Marchetti 1985).

Luego Baldi (1986) actualizó dicho gráfico incorporándole toda la información obtenida posteriormente en cámaras de calibración (CC), llegando a convertir tal gráfico en simples ecuaciones algebraicas.

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - 0,0017^{q_c/\sigma'_{v0}} \quad (2-20)$$

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - 0,0046^{q_c/\sigma'_{v0}} \quad (2-21)$$

La ecuación (2-20) fue determinada para arenas en terrenos pluviales, mientras que la ecuación (2-21) fue obtenida modificando el ultimo coeficiente para predecir correctamente en arena natural de río ("natural Po river sand"). Actualmente el ISSMGE (TC16 2001) recomienda la utilización de las ecuaciones anteriores, modificando los valores de los últimos coeficientes, de modo

que, se sugiere utilizar un 0,002 para depósitos arenosos recientes y 0,005 para depósitos arenosos antiguos, teniendo esta elección un cierto grado de subjetividad. Posiblemente esta elección podría hacerse basándose en el valor de K_D , asumiendo que en un depósito reciente se tiene $K_D=1-2$ y en un depósito antiguo se tiene $K_D=5-6$, sin embargo, ningún estudio ha verificado aún esta afirmación. La inconveniencia de estos dos métodos señalados anteriormente es que requieren de ensayos DMT y CPT, y una apropiada relación entre K_D y q_c .

Otra forma de estimar K_0 en arenas es estimar OCR a través de (2-15) y luego utilizar la ecuación de Schmidt:

$$K_0 = K_{0,nc} OCR^m \quad \text{con } m = 0,4 \text{ a } 0,5 \quad (2-22)$$

Establecer la exactitud de estos métodos de estimación del valor de K_0 en arenas es difícil, debido a la carencia de valores de referencia, es por esto que, conocer al menos la forma del perfil K_0 resulta útil. La experiencia ha reportado casos satisfactorios en el uso de estas aproximaciones. La incerteza en esta relación es mayor aun en arenas cementadas. La Figura 2-17 muestra un caso satisfactorio de la estimación de K_0 , obtenido por medio de la ecuación (2-20), mostrando una comparación entre los resultados obtenidos por la ecuación (2-20) con los resultados de un SBPT (del inglés, Self- Boring Pressuremeter).

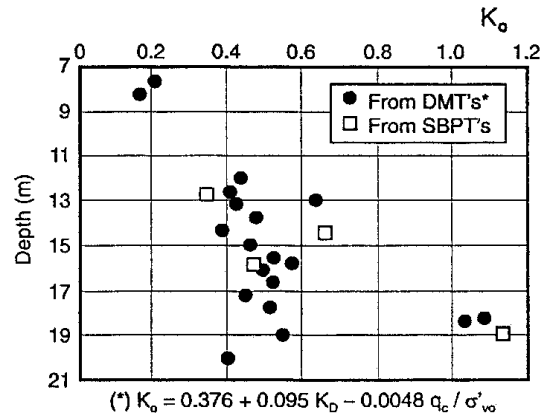


Figura 2-17: K_0 obtenido mediante DMT y SBPT en un depósito de arena en Pavia (Jamiolkowski, 1995).

2.7.2.3. Parámetros geotécnicos obtenidos exclusivamente en arcilla

Los parámetros indicados a continuación, se obtienen sólo para suelos cohesivos, los cuales corresponden a parámetros de esfuerzo y de flujo que definen el suelo.

Esfuerzo de corte no drenado (c_u)

La dependencia del esfuerzo de corte no drenado, normalizado c_u/σ'_{v0} , con OCR es bien conocida, por lo tanto, usando la relación entre K_D y OCR, es posible encontrar una relación entre K_D y c_u/σ'_{v0} . Basado en lo anterior, la correlación original propuesta por Marchetti (1980) es:

$$c_u = 0,22\sigma'_{v0}(0,5K_D)^{1,25} \quad (2-23)$$

Cuya magnitud varía desde $c_u=2-4$ [kPa] a 1000 [kPa], donde 1000 [kPa] corresponde a una roca tipo sedimentaria llamada Marga.

La experiencia ha demostrado que c_u obtenido gracias al ensayo DMT es bastante preciso y útil para el diseño, como se puede apreciar en la Figura 2-18 a), en donde se observa una excelente relación entre la predicción obtenida por medio de la ecuación (2-23) y el valor observado en distintos sitios geográficos. Además, se ha estudiado la comparación entre valores de c_u obtenidos mediante el ensayo DMT con otras técnicas de ensayos, esta comparación se presenta en la Figura 2-18 b).

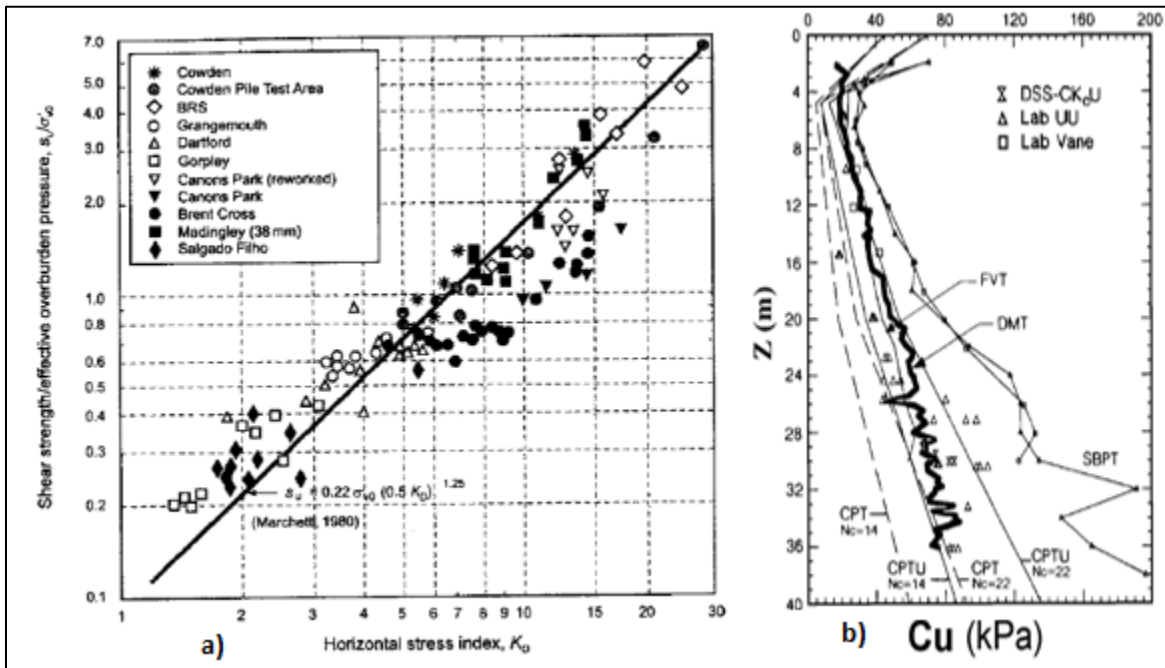


Figura 2-18:a) Relación entre K_D y c_u/σ'_{v0} (Powell & Uglow 1988). b) Comparación de c_u determinado por el ensayo DMT con otros ensayos (Burghignoli et al, 1991).

Coeficiente de consolidación horizontal (c_h)

El coeficiente horizontal de consolidación (c_h) es deducido a partir de la velocidad de decaimiento del valor de la lectura A o C, dependiendo del método de disipación elegido, los cuales fueron descritos anteriormente. El parámetro c_h se obtiene de los ensayos de disipación, para este fin se sugiere usar el método DMT-A (Marchetti y Totani 1989, ASTM Draft 2001), también se acepta el método DMT-A2.

La obtención del coeficiente de consolidación c_h , utilizando el método de disipación DMT-A, se realiza a través de un procedimiento sencillo indicado a continuación:

- Graficar la curva A-log t.
- Identificar el punto de inflexión de la curva y asociarlo al tiempo t_{flex} , revisar ejemplo presentado en la Figura 2-19.
- Obtener c_h , mediante:

$$C_h(OC) \approx \frac{7cm^2}{t_{flex}} \quad (2-24)$$

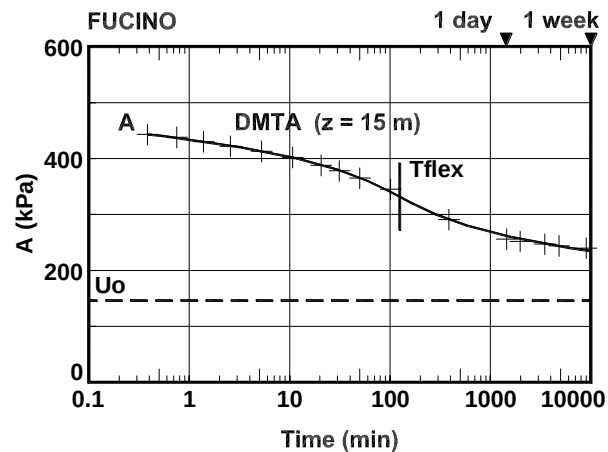


Figura 2-19: Ejemplo de obtención de c_h utilizando DMT-A en un suelo arcilloso en Funcino.

El valor de c_h estimado de la ecuación (2-24), corresponde a un suelo dentro del rango sobreconsolidado (OC). Un valor mucho menor de c_h , debería ser utilizado para estimar asentamientos en un problema que involucre cargas en el rango NC.

La obtención de c_h utilizando el método de disipación DMT-A es muy similar al método del presiómetro, conocido como “holding test”. Para ese ensayo la teoría se encuentra disponible y fue desarrollada por Carter (1979), quien estableció teóricamente la curva de forma S de decaimiento de la presión total de contacto horizontal σ_h vs tiempo, por lo tanto, también definió el factor t_{flex} para el punto de inflexión de la curva. Una teoría similar aún no está disponible para el decaimiento de σ_h vs tiempo asociado a la paleta DMT, debido a que su forma es más difícil de modelar, pero como el fenómeno es el mismo, la teoría debería tener un formato similar y el coeficiente 7 representa la conexión entre c_h y t_{flex} , determinado de manera empírica en calibraciones experimentales. Se debe tener en cuenta lo concluido en investigaciones hechas usando el piezocono (CPT), las cuales muestran que la disipación es gobernada en la mayoría de los casos por c_h más que por coeficiente de consolidación vertical (c_v), por esta razón, el coeficiente c_h es el objetivo en este procedimiento.

2.7.2.3.1. Parámetros geotécnicos obtenidos exclusivamente en arena

En arenas la información obtenida con el DMT puede proporcionar valores del ángulo de fricción (ϕ), densidad relativa (D_r), ciertas aproximaciones de la razón de sobreconsolidación (OCR), del coeficiente de empuje lateral en reposo (K_0) y de la presión de poros (u_0). Para obtener estos parámetros (a excepción de u_0) es necesario realizar además un ensayo de piezocono (CPT), ya que q_c aporta información adicional, indispensable para poder representar la situación del depósito arenoso; en su defecto, se puede registrar el empuje necesario para insertar el dilatómetro, con el fin de obtener el parámetro q_d .

Cabe mencionar que los parámetros K_0 y ϕ se encuentran interrelacionados y para determinar su valor se ha propuesto un método iterativo, el cual depende de dos mediciones independientes K_D y q_c .

Ángulo de fricción

Actualmente existen dos métodos para estimar el ángulo de fricción en arenas a partir del ensayo DMT.

1. Método dependiente de los valores de K_D y q_c

En este método primero se obtiene K_0 de las expresiones (2-20) o (2-21) presentadas anteriormente, las cuales dependen de q_c y K_D , luego se utiliza la teoría de Durgunoglu & Mitchell (1975) para estimar ϕ de K_0 y q_c . La ecuación de Durgunoglu y Mitchell es bastante compleja y fue representada en la Figura 2-20 gracias a Marchetti (1985), por medio de un gráfico simplificado equivalente que facilita bastante la obtención de ϕ .

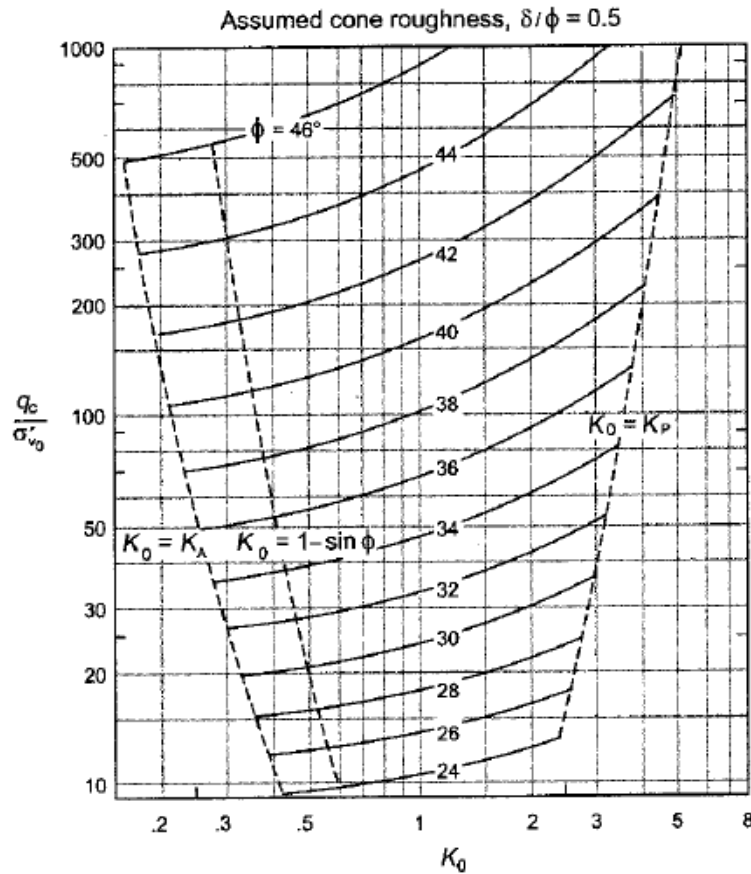


Figura 2-20: Gráfico $q_c - K_0 - \phi$ equivalente a la teoría de Durgunoglu & Mitchell, (Marchetti 1985).

Se debe mencionar que la ecuación de Durgunoglu & Mitchell entrega el valor de ϕ en condiciones de deformaciones planas (ϕ_{ps}), pero la ecuación (2-17) trabaja con ϕ en condiciones triaxiales (ϕ_{ax}).

$$\phi_{ax} = [\phi_{ps} - (\phi_{ps} - 32)/3] \quad (2-25)$$

$$\phi_{ps} \leq 32 \rightarrow \phi_{ax} = 32 \quad (2-26)$$

En sitios donde existe poca información geotécnica disponible, se utilizan los valores de referencia K_a y K_p , y la ecuación $K_0 = 1 - \sin\phi'$ para ayudar en el proceso de elección de ángulos de fricción representativos, ya que el valor de K_0 no es fácil de obtener.

2. Método dependiente sólo de K_D

Este método fue propuesto por Marchetti (1997), en el cual se hizo uso de las relaciones existentes entre q_c y K_D para proponer una expresión que estima directamente ϕ' de K_D :

$$\phi'_{DMT} = 28^\circ + 14,6 \log K_D - 2,1 \log^2 K_D \quad (2-27)$$

Esta ecuación está destinada para ser utilizada en arenas limpias, es decir, con un contenido de finos menor al 5%, además, cabe señalar que esta ecuación no es un intento por conseguir una aproximación precisa, sino más bien un límite inferior que subestima el ángulo de fricción entre 2° y 4° . Mayne (2015) presentó un estudio de confiabilidad de la ecuación (2-27), para esto el autor propuso un procedimiento de validación sistemática, en el cual los ángulos de fricción máximos ϕ' fueron obtenidos utilizando muestras imperturbadas de arenas limpias, adquiridas gracias a métodos especiales de perforación en terreno, principalmente, tecnología de congelación unidimensional o pistones muestreadores especiales. La Figura 2-21 muestra que la información triaxial, conservadoramente, calza con los valores ϕ' obtenidos por medio de la ecuación (2-27). Esta ecuación (2-27) tiene la ventaja de no tener asociada ninguna elección subjetiva y su valor es obtenido directamente mediante los resultados del ensayo DMT.

Esta ecuación supone que el valor de la cohesión es igual a $c'=0$, esto significará una sobreestimación de ϕ' , ya que la contribución de resistencia debido a c' será interpretada como aquella debido a ϕ' .

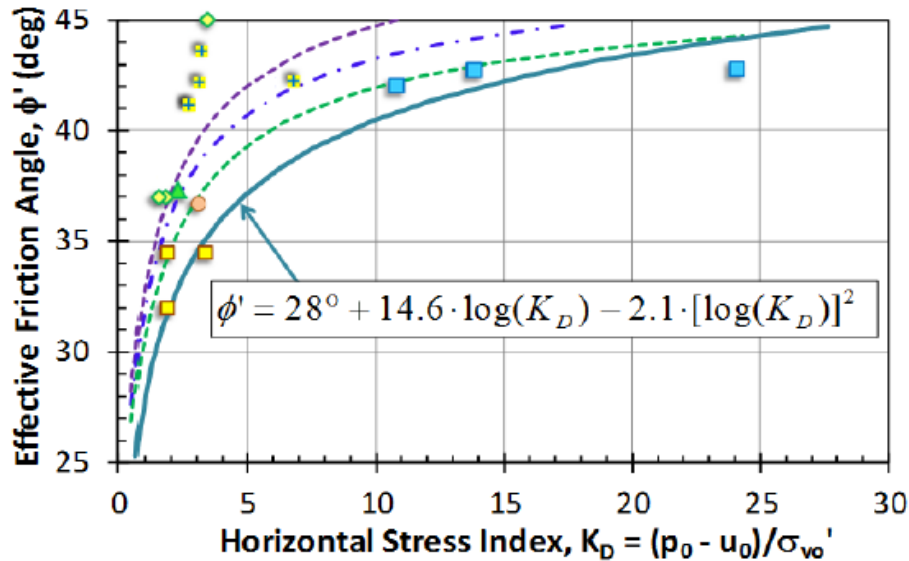


Figura 2-21: Ángulo de fricción en arena ϕ obtenidos por ensayos de compresión triaxial comparados con ϕ obtenido por ec (2-27), (Mayne 2015).

Densidad relativa (D_r)

Las correlaciones que determinan D_r a partir de q_D , se obtienen a gracias al trabajo pionero de Schmertmann (1976), el cual estudio la relación existente entre q_c , D_r y σ' dentro de una cámara de calibración (CC) y su rango de aplicación considera arenas normalmente consolidadas (NC) no cementadas, ya sean, finas o medianas. Posteriormente, Jamiolkowski et al. (2003) utilizaron una gran base de datos de ensayos CPT y DMT, realizados dentro de una CC en 3 tipos de arenas de sílice y adoptaron las ecuaciones propuestas por Schmertmann y Lancellota para ajustar esta información experimental.

Schmertmann (1976):

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{q_c/p_a}{C_0(\sigma'/p_a)^{C_1}} \right] \quad (2-28)$$

σ' : Tipo de esfuerzo efectivo considerado, ya sea σ'_{v0} o σ'_{m0} .

C_0, C_1 y C_2 : Coeficientes empíricos adimensionales de la correlación propuesta.

Lancellota (1983):

$$D_r = A_0 + B_0 X \quad (2-29)$$

$$X = \ln \left[\frac{q_c}{(\sigma'_{v0})^\alpha} \right]$$

A_0, B_0 y α : Factores empíricos de la correlación.

q_c y σ'_{v0} en [kPa].

Además, Jamiolkowski et al. (2003) cuantificaron el efecto asociado al tamaño de la CC en los resultados de q_c y q_D ; lograron proponer una estimación de D_r en arenas OC; estas correlaciones fueron determinadas inicialmente para q_c , luego hicieron posible emplear el parámetro q_D , asociado al ensayo DMT, ajustando las constantes empíricas. Debido a que estas correlaciones empíricas, fueron obtenidas mediante los resultados de ensayos de laboratorio de muestras reconstituidas, éstas son aplicables sólo en el caso de depósitos de arena (NC) recientes y sin cementar. La experiencia indica que la resistencia a la penetración es mucho más sensible a los esfuerzos radiales que a esfuerzos axiales, lo anterior sugiere que cualquier correlación entre alguna resistencia a la penetración y D_r debería estar relacionado con el esfuerzo efectivo promedio (σ'_{m0}) o con el esfuerzo efectivo horizontal (σ'_{h0}) en lugar de σ'_{v0} . Por lo tanto, una correlación entre la resistencia a la penetración y la densidad relativa D_r que involucre σ'_{v0} , es aplicable sólo a depósitos de suelo granular (NC), en donde K_0 varía desde 0,4 a 0,5 permaneciendo más o menos constante con la profundidad. Además, con estas correlaciones es posible obtener una estimación de D_r en depósitos de suelos granulares (OC) cuando se utiliza σ'_{m0} en vez de σ'_{v0} . La Tabla 2-3 y la Tabla 2-4, señalan los coeficientes empíricos adimensionales que se utilizan en las ecuaciones (2-28) y (2-29), respectivamente. Particularmente en la ecuación adaptada de Schmertmann se distingue entre coeficientes adimensionales para el uso de σ'_{m0} y para σ'_{v0} , además, del tipo de arena utilizado.

Tabla 2-3: Coeficientes empíricos ecuación Schmertmann (2-28) para el ensayo DMT.

	$\sigma'=\sigma_v0$		$\sigma'=\sigma_m0$	
	TS	TS+TOS+HS	TS	TS+TOS+HS
C0	19,14	20,64	26,99	26,62
C1	0,62	0,52	0,6	0,49
C2	3,61	3,71	3,75	3,8
R	0,88	0,88	0,91	0,89
SD	0,11	0,1	0,12	0,11
N	57	69	110	136

Tabla 2-4: Coeficientes empíricos ecuación de Lacelllota (2-29) para el ensayo DMT.

CC test	A0	B0	α	R	SD	N
DMT	-1,082	0,204	0,36	0,92	6,6	100

Siendo

R: Coeficiente de correlación

SD: Desviación estándar

N: Número de ensayos realizados dentro de CC

Las correlaciones propuestas para determinar D_r a partir de K_D , son las que se presentan a continuación:

$$K_D = C_0(\sigma')^{C_1} p_a^{1-C_1} \exp(C_2 D_r) \quad (2-30)$$

$$K_D = A \exp(B D_r) \quad (2-31)$$

Estas correlaciones son útiles sólo para depósitos de arena NC, la correlación (2-30) es la recomendada en este caso, la cual fue modificada por Reyna y Chameau (1991); la correlación (2-31), es más tosca, ya que no considera el nivel de esfuerzo antes de la penetración. La Tabla 2-5 presenta los coeficientes empíricos adimensionales que se utilizan en las ecuaciones (2-29) y (2-30). En la Figura 2-22 se observa la correlación (2-30) recomendada, la cual se apoyó en información obtenida por Tanaka y Tanaka (1998) en Ohgishima y Kemigawa, en donde las muestras de alta calidad fueron tomadas por un método de congelamiento.

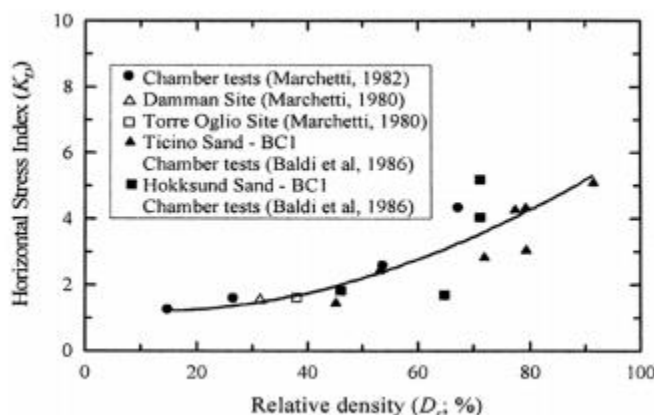


Figura 2-22: Correlación K_D – D_r para arenas NC no cementadas

Tabla 2-5: Coeficientes empíricos para las ecuaciones (2-30) y (2-31)

Ec 2-30	TS	TS+TOS+HS	Ec 2-31	TS	TS+TOS+HS
C0	5,30E-03	6,60E-03	A	0,53	0,57
C1	-0,18	-0,25	B	2,42	2,56
C2	2,6	2,29	R	0,71	0,71
R	0,78	0,76	SD	13	13
SD	12	12	N	73	136
N	58	73			

Presión de equilibrio de poros (u_0)

Dado que los resultados del DMT dependen del esfuerzo vertical efectivo y de la presión de poros antes de la inserción de la paleta del DMT, estas presiones resultan ser indispensables. El DMT, aunque no posea un sensor de la presión de equilibrio de poros, sí puede entregar una estimación de esta presión en suelos permeables granulares ($B \geq 2,5A$), en la condición previa a la penetración de la paleta del DMT. Esta aproximación viene dada por la lectura C (Campanella et. al 1985), la cual se justifica en el hecho que, durante la inflación la membrana desplaza la arena lejos de la paleta del DMT y luego en el desinflado es poca la tendencia de la arena de volver a su posición inicial, al contrario, ésta permanece alejada de la membrana, sin aplicarle presión efectiva a la membrana ($\sigma'_h = 0$), por lo tanto, al desinflarse la única presión existente en la membrana es $\sigma_h = u_0$. Este fenómeno ya es bien conocido, gracias a investigaciones realizadas en el ensayo del presiómetro. En el caso de arcillas, esta metodología presenta el inconveniente que, durante el desinflado de la membrana, la arcilla tiende a regresar a su posición original, existiendo contacto entre la arcilla y la membrana, es decir, aplicando esfuerzo efectivo ($\sigma'_h \neq 0$). Entonces, esto quiere decir que, $u > u_0$ debido a la penetración de la paleta, por lo tanto $C > u_0$.

En arenas u_0 es estimada como p_2 , donde:

$$p_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (2-32)$$

Notar que en arena los valores de C son bajos, usualmente, menores a 100 o 200 [kPa], lo cual es equivalente a 10 o 20 [m.c.a]. Las Lecturas C normalmente tienen cierta dispersión, es por eso, que se prefiere usar p_2 para conocer la tendencia de la presión del agua. Si el interés se limita a conocer un perfil de u_0 vs profundidad, entonces las lecturas C son tomadas cada 1 o 2 [m].

Índice U_p

En ciertos problemas de ingeniería la identificación de capas permeables y no permeables es una tarea importante, en particular, esta tarea es posible realizarla mediante el método mencionado en la sección anterior, presión de equilibrio de poros, el cual se encuentra basado en la lectura C. Debido a que se sabe que en capas permeables se tiene que $p_2 \approx u_0$ y que en capas que no son lo suficientemente permeables se tiene que $p_2 > u_0$, ya que no es posible completar una disipación total del exceso de presión, $\Delta u = 0$, dentro de 1,15 [min] una vez realizada la inserción de la paleta, por lo tanto, cierto exceso de presión existirá al tiempo de registrar la lectura C (base para la obtención de p_2).

En resumen $p_2 = u_0$ indica una capa permeable de suelo ($\Delta u = 0$ dentro de 1,15 [min]), mientras que $p_2 > u_0$ indica una capa no permeable de suelo ($\Delta u \neq 0$ dentro de 1,15 [min]). La

Figura 2-23 muestra un ejemplo sobre el comportamiento de la lectura C para distintos tipos de suelos, clasificados con respecto a su valor I_D asociado.

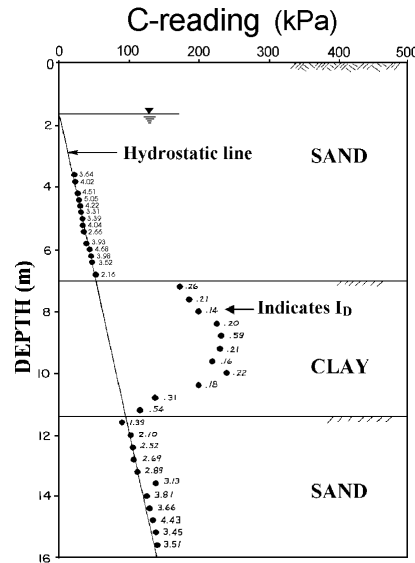


Figura 2-23: Uso de la lectura C para distinguir entre una capa permeable y otra no permeable (Schmertmann, 1988).

Basado en lo anterior se establece el índice U_D , el cual fue definido como:

$$U_D = (p_2 - u_0)/(p_0 - u_0) \quad (2-33)$$

Se dice que las capas permeables tienen $U_D = 0$ y que las capas impermeables tienen $U_D = 0,7$, en consecuencia, las capas con permeabilidades intermedias se mueven dentro del rango de U_D]0-0,7[. Notar que este índice sólo diferencia a un suelo permeable de otro que no lo es, no se puede esperar que éste ofrezca una completa escala de permeabilidades, de hecho, sobre cierto valor de k el U_D indicará permeable y bajo cierto valor de k el índice U_D clasificará al suelo como no permeable.

Se debe tener en cuenta que los valores de u en el suelo que rodea la paleta del DMT durante el ensayo, son constantes en ambos casos. En suelos permeables $u = u_0$ y en suelos impermeables, donde no existe disipación de presión en el tiempo que demora el ensayo, la presión u se mantiene constante. En suelos limosos para los cuales 1,15 [min] no es suficiente para disipar completamente el exceso de presión, (Δu), ocasionado por la inserción de la paleta DMT, pero sí permite cierta disipación. Considerando este caso, puede ocurrir que la información obtenida resulte engañosa para un operador sin mucha experiencia, ya que en estos suelos el valor de la lectura B tomado 15 o 20 segundos, después de haber tomado la lectura A, es bajo debido a la disipación existente en ese período, significando que la diferencia entre B y A también sea baja, afectando también a los valores de los resultados de I_D , E_D y M_{DMT} . Para estar seguros de que estos valores bajos de I_D y M_{DMT} correspondan a suelos con permeabilidades intermedias, y no a arcillas muy compresibles y de baja permeabilidad, donde es normal apreciar valores bajos de I_D y M_{DMT} , se calcula el índice U_D para saber si estos valores bajos corresponden a suelos de permeabilidades intermedias. Si se confirma que se trata de una capa de suelo con permeabilidad intermedia, todos los valores dependientes de A-B deben ser ignorados.

CAPÍTULO 3. ELEMENTOS FINITOS

3.1. Introducción

Plaxis es un programa de elementos finitos bidimensionales, diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad en problemas geotécnicos. El software comenzó su desarrollo en la Universidad Técnica de Delft en 1987, con el objetivo de desarrollar un código de elementos finitos de uso sencillo para analizar el comportamiento de los diques y terraplenes construidos sobre los suelos blandos de los ríos de las tierras bajas de los países bajos. Este software permite modelar problemas geotécnicos con condición de deformación plana o con axisimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

El programa PLAXIS cuenta con una interfaz de usuario constituida por cuatro subprogramas que permiten ir definiendo el problema en cuestión. Estos corresponden a:

- Input (Programa de introducción de datos).
- Calculations (Cálculos).
- Output (Visualización de gráficas y tablas de resultados).
- Curves (Visualización de trayectorias de esfuerzos y deformaciones).

3.1.1. Plaxis Input

Este programa contiene todos los dispositivos necesarios para crear y modificar un modelo geométrico, además, permite definir los materiales analizados, la presión de poros, las condiciones de borde, las condiciones de contorno referente al flujo, generar las tensiones iniciales y la correspondiente malla de elementos.

3.1.1.1. Modelo Geométrico

Las secciones transversales representativas de un problema pueden ser dibujadas a partir de dos opciones de tipos de modelos de elementos finitos, las cuales corresponden: al modelo de Deformación plana y al modelo Axisimétrico. La Figura 3-1 muestra un ejemplo de las secciones transversales representativas, considerando un caso simple de carga uniforme distribuida sobre el modelo de suelo para un problema de deformación plana y otro axisimétrico.

El modelo de Deformación plana (Plane strain) se utiliza para el caso de geometrías con sección transversal uniforme, donde se puede asumir que los correspondientes esfuerzos y cargas serán uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal del plano de análisis (dirección z). Los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos, sin embargo, sí se tienen en cuenta los esfuerzos en la dirección z .

El modelo Axisimétrico (Axisymmetric) se utiliza en casos de estructuras de forma circular, con una sección transversal radial uniforme y con aplicación de cargas alrededor del eje central, en donde se permita suponer esfuerzos y deformaciones idénticos en cualquier dirección radial. La coordenada X representa el radio y la coordenada Y corresponde al eje de simetría (no se pueden utilizar coordenadas X negativas).

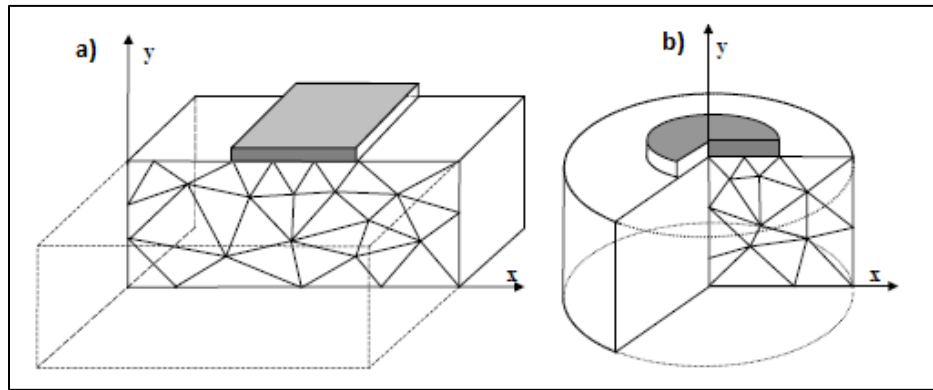


Figura 3-1: Ejemplo de un problema de: a) deformación plana b) axisimétrico (Manual de referencia Plaxis v8, 2002).

3.1.1.2. Tipos de Elementos

Los tipos de elementos a seleccionar para modelar un suelo son del tipo triangular de 6 o 15 nodos. El elemento triangular de 15 nodos entrega una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos y la integración numérica implica doce puntos de Gauss (puntos de evaluación de tensiones). Para el caso del triángulo de 6 nodos el orden de interpolación es de dos y la integración numérica implica tres puntos de Gauss. La Figura 3-2 muestra los nodos y puntos de tensión que poseen cada tipo de elemento triangular.

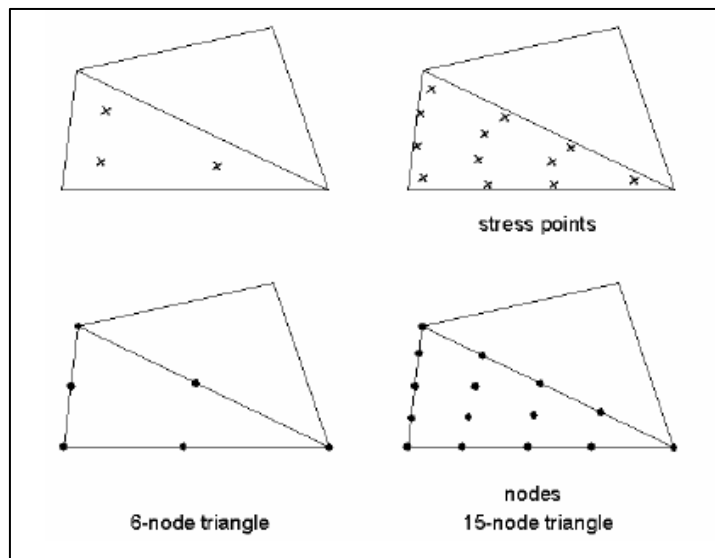


Figura 3-2: Posición de los nodos y puntos de tensión en elementos de suelo (Manual de referencia Plaxis v8, 2002).

El triángulo de 15 nodos es un elemento capaz de proporcionar una gran exactitud, con los cuales es posible conseguir resultados de alta calidad en problemas difíciles, como por ejemplo en cálculos de hundimiento para suelos incompresibles (Manual de Referencia Plaxis v8, 2002). La utilización de triángulos de 15 nodos conduce a un consumo relativamente elevado de memoria y a un rendimiento menor de los cálculos y las operaciones. Por esa razón, se dispone también de elementos más simples, como el triángulo de 6 nodos, que da buenos resultados en los análisis estándar de deformación, a condición de que se utilice un número de elementos suficiente. A pesar de ello, habrá que tener cuidado con los modelos axisimétricos o en aquellas situaciones en las que haya que tener en cuenta una posible rotura, como es el caso de cálculos de capacidad portante o de análisis de seguridad por medio del método de reducción ϕ -c (“ ϕ -c reduction”).

Además, de los elementos triangulares de suelo pueden utilizarse elementos de placa, compatibles con el tipo de elementos suelos para simular el comportamiento de muros, placas y placas curvas; se utilizan elementos de geomalla para simular el comportamiento de geomallas y geotextiles. También, se utilizan elementos de interfaz compatibles para simular la interacción suelo-estructura. Finalmente, el módulo de creación de la geometría permite la introducción de anclajes de extremo fijo y de anclajes de nodo a nodo, estos poseen sus respectivos elementos de malla. Para una mejor comprensión y visualización de cada uno de estos elementos se recomienda revisar el Manual de Referencia Plaxis.

3.1.1.3. Generación de la Malla

El generador de malla necesita de un modelo geométrico compuesto por puntos, líneas y dominios (“cluster”); estos últimos (zonas encerradas por líneas) son automáticamente generados durante la creación del modelo geométrico. Pueden también utilizarse líneas y puntos geométricos para condicionar la posición y la distribución de elementos. Una vez que el modelo geométrico se encuentre completamente definido y las propiedades de los materiales han sido asignadas a todos los dominios y objetos estructurales, la geometría ha de ser dividida en elementos finitos con el fin de llevar a cabo los consiguientes cálculos. Una descomposición del dominio del problema en elementos finitos se denomina malla. El tipo básico de elemento de una malla es el elemento triangular de 15 nodos o el elemento triangular de 6 nodos, además, de estos elementos de suelo triangulares hay elementos especiales para las diferentes estructuras disponibles. En el caso de Plaxis se dispone de un generador de malla totalmente automático, este generador es una versión especial del generador de mallas Triangle desarrollado por Sepra (Segal G., 2000). La generación de la malla se basa en un robusto procedimiento de triangulación, el cual da como resultado mallas ‘no estructuradas’, estas mallas pueden parecer desordenadas, pero su rendimiento numérico es por lo general mejor que el de las mallas regulares (estructuradas).

3.1.1.4. Modelos Constitutivos de los Materiales

Para la simulación y caracterización de suelos, Plaxis pone a disposición los siguientes modelos constitutivos:

- Lineal elástico:** Modelo que utiliza la relación esfuerzo-deformación lineal elástica isótropa de Hooke. Los parámetros requeridos que definen el modelo: son el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Dentro de sus limitaciones, se recomienda utilizar en capas rígidas de suelo (no recomendado para representar el comportamiento inelástico del suelo).
- Mohr-Coulomb (M.C.):** Este corresponde a un modelo elastoplástico perfecto, que es utilizado como primera aproximación, ya que incluye un limitado número de características del comportamiento real del suelo. Éste no presenta endurecimiento ni tampoco considera la dependencia de la rigidez con respecto al nivel de esfuerzos y a la trayectoria de esfuerzos, además, tampoco es posible considerar una rigidez anisotrópica; pero sí es posible considerar el aumento de la rigidez con la profundidad. Los parámetros requeridos para definirlo son: el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), la cohesión (c), el ángulo de fricción (ϕ) y el ángulo de dilatación (ψ). Para visualizar el tipo de aproximación que realiza este modelo, en la Figura 3-3 se muestra la simulación de un ensayo triaxial mediante el modelo de Mohr-Coulomb junto a un resultado típico de un ensayo triaxial para una arena densa.

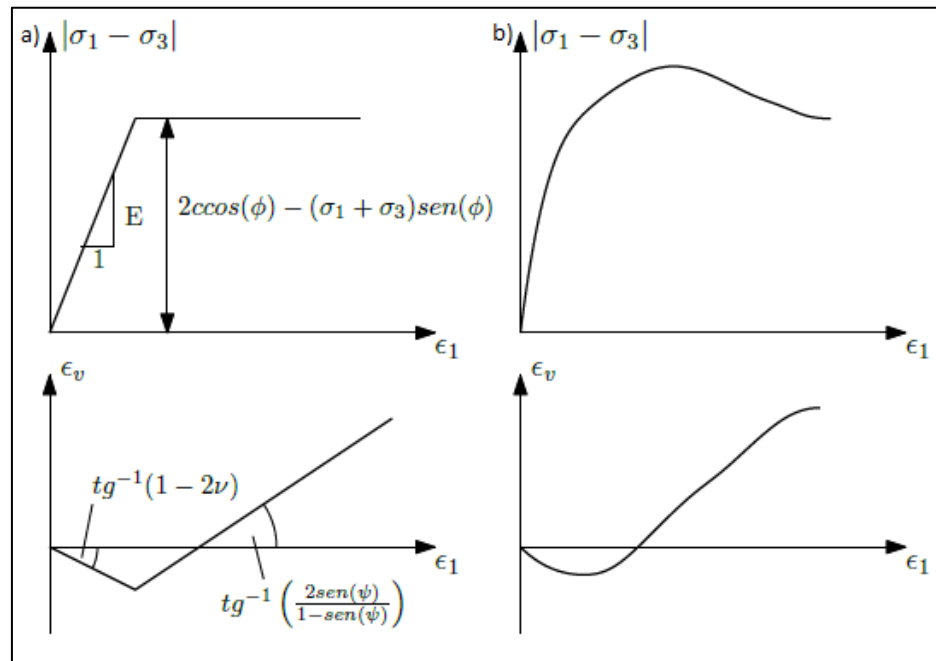


Figura 3-3: a) Modelado de un ensayo triaxial y b) Resultado típico de un ensayo triaxial para una arena densa (Vermeer et. al., 1984).

La zona de deformación elástica para el caso unidimensional queda representada por la Figura 3-4, el modelo describe un comportamiento elastoplástico perfecto (sin endurecimiento).

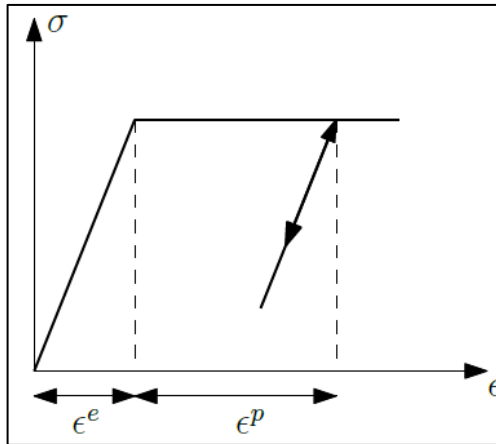


Figura 3-4: Idea básica del Modelo de Mohr-Coulomb (Manual de referencia Plaxis v8, 2002)

Por otro lado, la transición desde el comportamiento elástico al comportamiento plástico es determinada por la función de fluencia (f), que en el caso del modelo de Mohr-Coulomb es una extensión del criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual es usualmente graficado junto a círculos de Mohr para evaluar la proximidad del estado tensional del suelo a la línea de falla de Coulomb.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3-1)$$

En la

Figura 3-5 se presenta la condición de tensión en falla, es decir, cuando el círculo de Mohr intercepta a la línea de falla, también llamada envolvente de falla, para un caso general de un suelo con cohesión y ángulo de fricción en función de las tensiones principales efectivas.

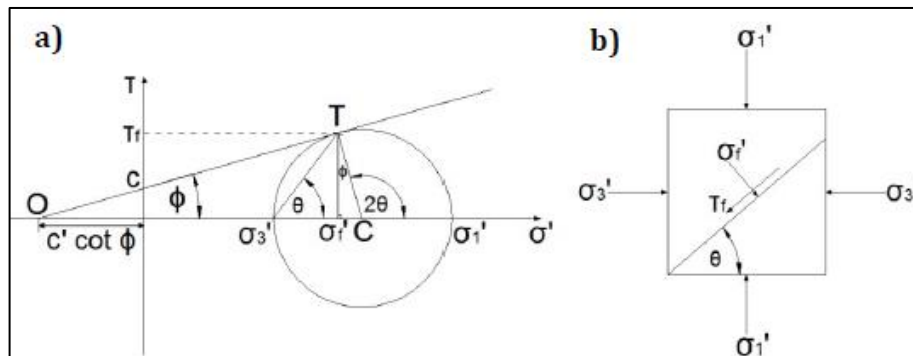


Figura 3-5: Estado de tensiones en falla usando a) círculo de Mohr y b) elemento del suelo en falla, Manual de referencia Plaxis v8, 2002.

Por lo tanto, la masa de suelo entrará en fluencia en un determinado punto cuando la tensión de corte τ movilizada en dicho punto sea igual a la resistencia de corte τ_f . Esta función puede ser expresada como:

$$f(\sigma) = \tau - \sigma \cdot \tan(\phi) - c = 0 \quad (3-2)$$

También puede escribirse en términos de las tensiones principales máxima σ_{max} y mínima σ_{min} como:

$$f(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) + \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min})\text{sen}(\phi) - c \cdot \cos(\phi) = 0 \quad (3-3)$$

Generando 6 casos a partir de las direcciones principales, lo cual se traduce en 6 planos en el espacio de tensiones principales que cuya intercepción conforma una superficie cónica hexagonal de fluencia, la cual es posible apreciar en la Figura 3-6.

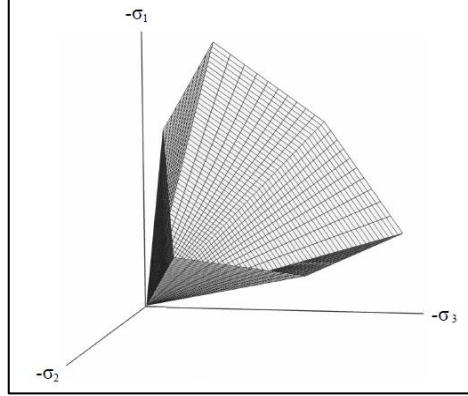


Figura 3-6: Superficie de fluencia de Mohr Coulomb en el espacio de esfuerzos principales ($c'=0$), Plaxis v8 Material Models Manual, 2002.

Teniendo en cuenta la regla de flujo, que explica cómo evolucionan las deformaciones plásticas para cada estado de tensiones, es necesario definir el potencial plástico (g). Para este modelo (g) se define en el espacio de las tensiones principales como:

$$g(\sigma) = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) + (\sigma_{max} + \sigma_{min}) \cdot \text{sen}(\Psi) = 0 \quad (3-4)$$

Al igual que para las funciones de fluencia existen 6 casos para los potenciales plásticos, dependiendo de cómo se ordene la magnitud de las tensiones principales. En consecuencia, la regla de flujo del modelo de Mohr-Coulomb queda definida por el ángulo de dilatancia Ψ , que cumple con $\Psi < \phi$ y se concluye que:

$$\text{sen}(\Psi) = d\epsilon_v^p / d\gamma^p \quad (3-5)$$

Donde:

$d\epsilon_v^p$: Deformaciones unitarias volumétricas plásticas.

$d\gamma^p$: Deformaciones tangenciales plásticas.

- c) **Hardening Soil Model (H.S.M.):** Corresponde a un modelo avanzado del modelo hiperbólico (variante elastoplástico) que es formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento por fricción. Donde se distinguen dos tipos de rigidización o endurecimiento denominados endurecimiento tangencial y endurecimiento por compresión. El primero es usado para modelar las deformaciones plásticas irreversibles asociadas a cargas desviadoras primarias. El segundo pretende reproducir las deformaciones plásticas irreversibles asociadas a la consolidación primaria en

condiciones edométricas y ante cargas isotrópicas. Como modelo de segundo orden es capaz de simular el comportamiento de arenas y gravas, como también de suelos blandos como arcillas y sedimentos. El modelo Hardening Soil supera al modelo hiperbólico en tres aspectos: i) usa la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad; ii) incluye la dilatancia del suelo; iii) introduce una superficie de fluencia no fija que puede expandirse debido a las deformaciones plásticas. En la Figura 3-7 se muestra el contorno total de fluencia del modelo. Este modelo no considera el reblandecimiento del suelo debido a los efectos de dilatancia o de desunión. De hecho, éste es un modelo de endurecimiento isotrópico que no modela cargas de histéresis ni cíclicas, tampoco la movilidad cíclica ni el comportamiento anisotrópico. Para definir un suelo, el modelo requiere de once parámetros los cuales están divididos en parámetros de resistencia del suelo, parámetros básicos de rigidez del suelo y parámetros avanzados.

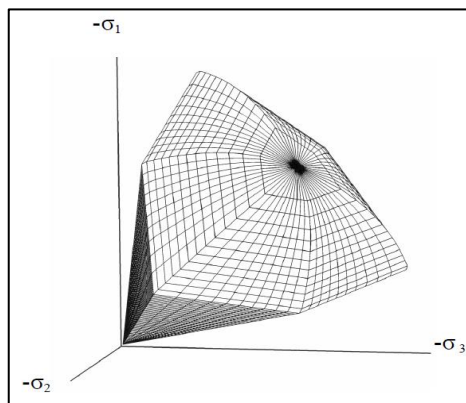


Figura 3-7: Representación del contorno total de fluencia del modelo Hardening Soil en el espacio de esfuerzos principales para un suelo sin cohesión, Plaxis v8 Material Models Manual, 2002.

- d) **HS small:** El modelo HS small es una modificación del modelo Hardening Soil, que tiene en cuenta el aumento de la rigidez del suelo para pequeñas deformaciones. A niveles bajos de deformación, la mayoría de los suelos presentan una mayor rigidez que en los niveles de deformación presentes en problemas de ingeniería, y esta rigidez varía de forma no lineal con la deformación. Este modelo adiciona dos parámetros más al H.S.M. que son el módulo de corte de referencia a pequeñas deformaciones (G_{0ref}) y la deformación de corte correspondiente a una caída del módulo del 30% de su valor inicial ($\gamma_{0.7}$). Cuando se utiliza en aplicaciones dinámicas, el modelo HS small también se incluye el amortiguamiento de histéresis.
- e) **Soft soil model:** Modelo del tipo CamClay, que puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos como: arcillas normalmente consolidadas (NC) y turbas. El modelo proporciona buenos resultados en las situaciones de compresión primaria.
- f) **Modified CamClay:** Modelo utilizado para describir el comportamiento de suelos blandos como la arcilla. Este modelo describe aspectos importantes del comportamiento del suelo como:

- Resistencia del suelo dependiente del nivel de esfuerzo y del cambio de volumen.
- Compresión o dilatación.
- La deformación ilimitada sin experimentar cambios en los niveles de esfuerzos o de volumen cuando se ha alcanzado el estado crítico.

El modelo está basado en 5 parámetros: coeficiente de Poisson (ν_{ur}), índice de expansión (k), índice de compresión (λ), tangente de la línea de estado crítico y relación de vacíos (e).

- g) **Soft Soil Creep Model:** Modelo de segundo orden, planteado en el marco de la viscoplasticidad. El modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento dependiente del tiempo de suelos blandos, tales como arcillas normalmente consolidadas (NC) y turbas. El modelo incluye una ley logarítmica para la variación de la rigidez con el cambio de volumen.

3.1.2. Plaxis Calculations

Realizado el proceso de generación del modelo de elementos finitos, ya se puede dar comienzo a la fase de cálculo. En esta etapa se definen los tipos de cálculos que se han de llevar a cabo y los tipos de cargas o de etapas de construcción que se aplicarán durante todo el proceso de cálculo. El programa permite realizar tipos de cálculos mediante el método de los elementos finitos, este programa se centra exclusivamente en los análisis de deformación y distingue entre:

- Plastic (Cálculo Plástico).
- Consolidation (Análisis de Consolidación).
- Phi-c reduction (Análisis de Seguridad).
- Dynamic (Cálculo Dinámico, esta opción de análisis no se encuentra en la versión básica de Plaxis v 8.5).

Los tres primeros tipos de cálculos (Plastic, Consolidation, Phi-c reduction) permiten con carácter opcional resolver el problema dentro del contexto de grandes deformaciones. Esto se denomina Malla actualizada (Updated mesh) y se encuentra disponible como opción avanzada. En la práctica de la ingeniería, los proyectos constan de diferentes fases, de manera similar, un proceso de cálculo de PLAXIS se divide también en fases del cálculo. Son ejemplos de fases de un cálculo la activación de una carga en particular en un determinado momento, la simulación de una etapa de construcción, la introducción de un período de consolidación, el cálculo de un factor de seguridad, etc. Cada fase de cálculo se divide por lo general en un cierto número de pasos de cálculo. Esto es necesario porque el comportamiento no lineal del suelo requiere que las cargas sean aplicadas en pequeñas proporciones (llamadas pasos de carga). En la mayor parte de los casos, sin embargo, es suficiente especificar la situación que se ha de alcanzar al final de una fase de cálculo.

3.1.3. Plaxis Output

En este subprograma de PLAXIS cuenta con una amplia gama de dispositivos para la presentación de resultados de un análisis mediante elementos finitos, de la situación inicial y final de cada fase de cálculo definida en el programa de cálculos (Calculations). Los resultados con mayor importancia en un cálculo por medio de elementos finitos corresponden a los desplazamientos y a las tensiones, producidos en los nodos y en los puntos de tensión respectivamente, entre otros. Además, si el modelo incluye elementos estructurales, se puede obtener los esfuerzos generados en dichos elementos.

3.1.4. Plaxis Curves

El subprograma curvas permite el trazado de curvas, por ejemplo, carga–desplazamiento, tiempo–desplazamiento, diagramas tensión– deformación o trayectorias de tensión o de deformación, en puntos previamente seleccionados dentro de la sección transversal representativa del problema y que son relevantes de analizar para el proyecto. Estos puntos son seleccionados en la fase de cálculo mediante la opción *Select points for curves*, antes de dar inicio al proceso de cálculo. Generalmente, los nodos se utilizan para la generación de curvas carga – desplazamiento, mientras que los puntos de tensión se usan para la generación de diagramas tensión – deformación y para trayectorias de tensiones. Además, estos datos pueden ser exportados a tablas para un mejor manejo de la información.

Habiendo explicado el Software que utiliza elementos finitos, es posible ahora continuar con el desarrollo del modelado numérico asociado a esta memoria. Sin embargo, primero se presentará la información geotécnica y mediciones obtenidas en laboratorio, las cuales serán fundamentales para definir y validar el modelo, además, se presentará las consideraciones y resultados de un modelo similar realizado por otro autor.

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO BASE

Esta memoria utiliza el trabajo de Balachowski (2006), el cual contiene mediciones realizadas en laboratorio y una simulación de la ejecución del ensayo DMT realizada utilizando elementos finitos. Los detalles de estos resultados se presentan a continuación:

4.1. Ensayos de laboratorio en Cámara de Calibración

El caso de estudio consideró la realización de ensayos DMT dentro de una cámara de calibración (CC) utilizando muestras de arena de la playa Baltic en Lubiato, Polonia. Estas muestras están conformadas por una arena fina cuarzosa uniforme, que posee un coeficiente de uniformidad de $U=1,4$ y un diámetro medio de partículas $d_{50}=0.21$ [mm]. Estas muestras son creadas a partir de una arena limpia con poco o nulo contenido de agregados finos, por lo tanto, posee un valor despreciable de cohesión.

La cámara de calibración es considerada una buena técnica para calibrar equipos de ensayos de penetración en terreno en suelos sin cohesión, la cual permite preparar una muestra de un material conocido a una densidad conocida y luego ensayarla bajo condiciones de borde estrictamente controladas. Para ensayos que poseen teorías analíticas complejas esta técnica representa la mejor forma de establecer una buena calibración, como en el caso de los equipos de ensayos en terreno. La secuencia típica del ensayo de la cámara de calibración consiste en los siguientes pasos: i) preparación de la muestra de arena, ii) compresión unidimensional de la muestra para entregarle el grado de confinamiento deseado y iii) ejecución del ensayo de terreno dentro de la CC. En este caso el ensayo del dilatómetro se realiza insertando la cuchilla dentro de la muestra contenida en la CC, como es posible observar en Figura 4-1. Esta inserción puede realizarse con cuatro distintas alternativas de condiciones de borde (BC), impuestas en los valores del borde para los esfuerzos y/o deformaciones. La Tabla 4-1 presenta las opciones existentes de condiciones de borde que pueden ser aplicadas durante la ejecución de un ensayo de penetración dentro de una CC.

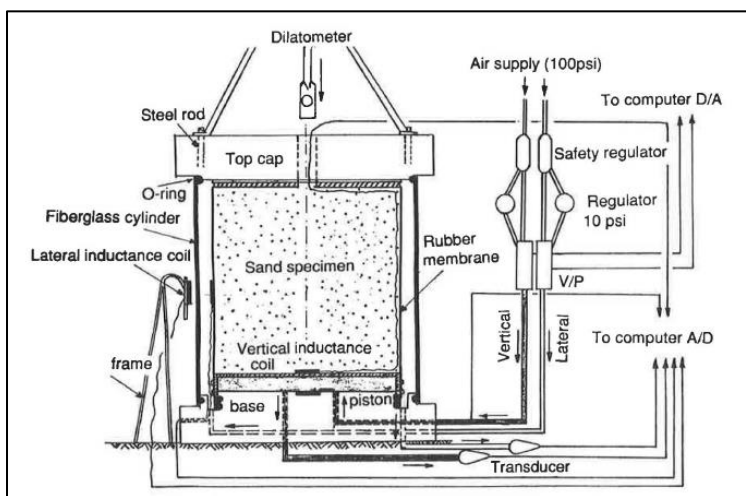


Figura 4-1: Sistema Cámara de Calibración-DMT (Lawter Jr. & Borden 1990).

Tabla 4-1: Tipos de condiciones de borde de la cámara de calibración.

Condición de Borde	Esfuerzo/Desformación	
BC1	$\sigma_v = \text{cte}$	$\sigma_h = \text{cte}$
BC2	$\Delta \varepsilon_v = 0$	$\Delta \varepsilon_h = 0$
BC3	$\sigma_v = \text{cte}$	$\Delta \varepsilon_h = 0$
BC4	$\varepsilon_v = 0$	$\sigma_h = \text{cte}$

Las mediciones del ensayo DMT tomadas dentro de la CC son útiles para validar la simulación del ensayo DMT en estas condiciones. Estos ensayos se efectuaron en una cámara de calibración cuyas dimensiones son de 53 [cm] de diámetro y 100 [cm] de alto, las condiciones de borde impuestas en este trabajo corresponden a las del tipo BC1. Los ensayos fueron ejecutados para distintas presiones de confinamiento, que van desde 50 hasta 400 [kPa] en arenas sueltas y densas, en donde las muestras de suelo son preparadas por medio de un dispositivo estacionario o por deposición pluvial a pequeñas alturas de caída. Para conocer en mayor detalle las dimensiones y componentes de la cámara de calibración utilizadas en este trabajo se recomienda revisar Balachowski & Dembicki (2000).

Se poseen los registros de lecturas A y B para las muestras sueltas y densas, sometidas en ambos casos a presiones de confinamiento de 50 [kPa] y 100 [kPa]. La Tabla 4-2 presenta los valores de las lecturas A y B registrados en la muestra suelta y densa a una profundidad de ensayo de 0,5 [m] y sometidas a una presión de confinamiento de 50 [kPa].

Tabla 4-2: Lecturas A y B para la muestra suelta y densa confinada a 50 [kPa].

Profundidad [m]	Loose		Dense	
	A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
0,5	62	520	92	670

También se presentan las lecturas A y B tomadas dentro de la cámara de calibración para distintas profundidades de ensayo, considerando muestras de arenas tipo suelta y densa sometidas a una presión de confinamiento de 100 [kPa]. Estas lecturas de presión se observan en la Figura 4-2 y sus valores se detallan en la Tabla 4-3, los cuales se obtuvieron por la inspección gráfica de la Figura 4-2, por lo tanto, se deben esperar ciertas imprecisiones relacionadas con el modo de obtención.

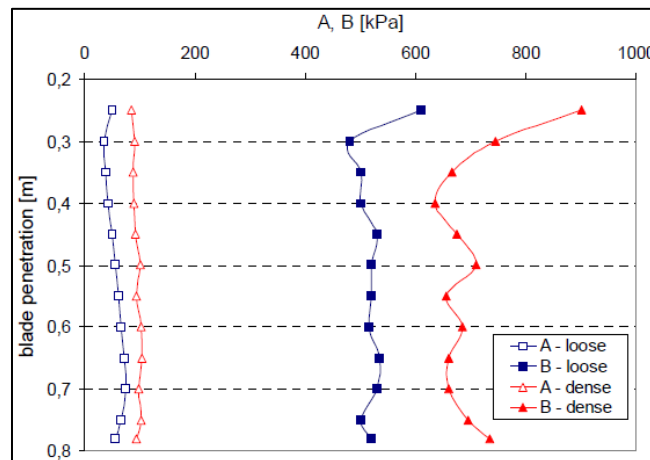


Figura 4-2: Resultados DMT obtenidos dentro de la CC para σ' confinamiento de 100 [Kpa] (Balachowski, 2006).

Tabla 4-3: Lecturas aproximadas para la muestra suelta y densa confinada a 100 [kPa].

Profundidad [m]	Loose		Dense	
	A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
0,25	50,47	609,99	85,77	901,62
0,3	35,45	480,79	91,45	745,81
0,35	38,54	500,88	88,61	666,59
0,4	42,63	500,89	89,98	635,84
0,45	50,42	530,35	92,69	675,45
0,5	55,26	520,02	101,97	710,52
0,55	61,85	519,86	94,72	656,29
0,6	66,23	515,75	103,27	685,82
0,65	72,25	534,69	105,06	660,33
0,7	74,50	530,42	99,01	660,20
0,75	65,90	500,66	103,07	696,16
0,8	55,27	519,78	94,72	735,07

Además, se realizaron ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente drenados (CID) para obtener los parámetros de rigidez y resistencia del suelo a distintas presiones de confinamiento en arenas sueltas y densas, con el fin de poder definir los modelos constitutivos del suelo que se utilizarán en la simulación. A modo de ejemplo, la Tabla 4-4 presenta información geotécnica obtenida mediante un ensayo CID para una presión de confinamiento de 50 [kPa] para los dos tipos de densidades que se utilizan en este trabajo.

Tabla 4-4: Parámetros del suelo para un presión de confinamiento de 50 [kPa].

Arena	ID	ϕ [°]	Ψ [°]	E ₅₀ [MPa]
Suelta	0,4	35	5	40
Densa	0,8	42	15	70

Sin embargo, en el documento no se presentan explícitamente todos los valores de estos parámetros, es por ello, que fueron determinados de manera aproximada mediante la inspección de las Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5, las cuales tratan sobre la rigidez, ángulo de fricción y ángulo de dilatación respectivamente con respecto a la presión de confinamiento, además, con esta información es posible calcular líneas de tendencia para completar datos inexistentes.

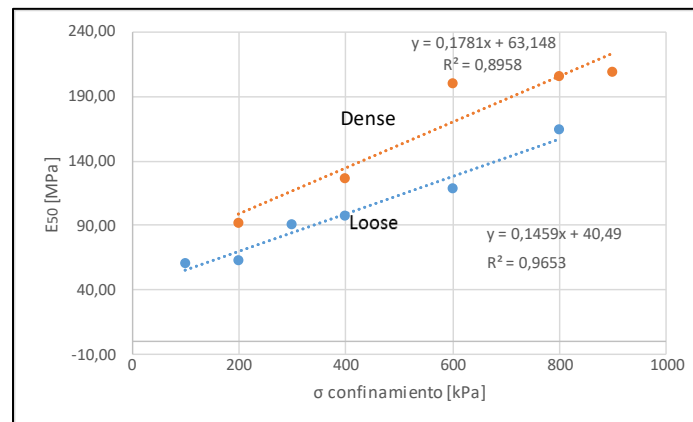


Figura 4-3: Rigidez v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: lineal (Balachowski, 2006).

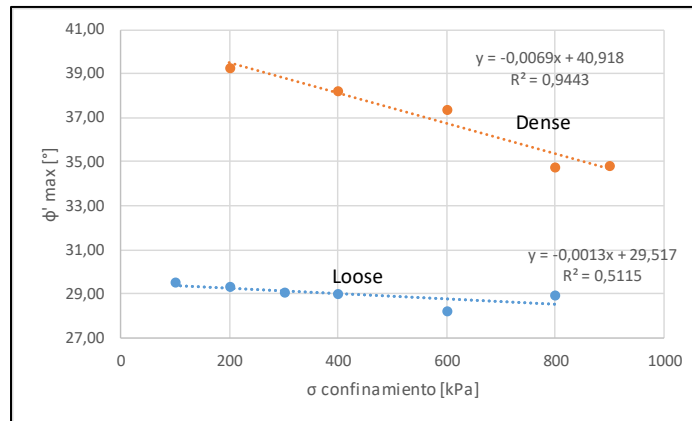


Figura 4-4:Ángulo de fricción v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: lineal (Balachowski,2006).

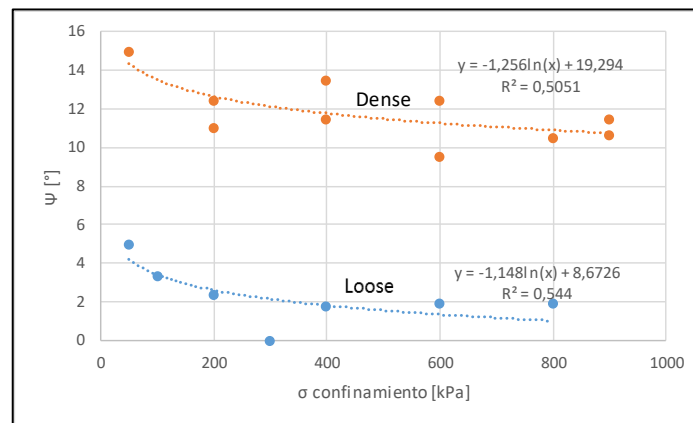


Figura 4-5:Ángulo de dilatancia v/s presión de confinamiento, línea de tendencia: logarítmica (Balachowski, 2006).

En la Tabla 4-5 se muestra la información geotécnica obtenida por medio de la inspección gráfica de las figuras anteriores.

Tabla 4-5: Parámetros de resistencia y rigidez para una arena suelta y otra densa.

Id=0,4/Loose				Id=0,8/Dense				
σ [kPa]	φ [°]	E ₅₀ [MPa]	Ψ [°]	σ [kPa]	φ [°]	E ₅₀ [MPa]	Ψ [°]	
50	35	40	5	50	42	70	15	--
100	29,55	60,69	3,34	100	--	--	--	--
200	29,35	62,53	2,39	200	39,27	91,77	11,01	12,45
300	29,05	90,44	--	400	38,25	126,36	11,50	13,52
400	28,99	96,67	1,78	600	37,41	199,80	9,52	12,47
600	28,20	118,67	1,95	800	34,74	205,25	10,51	--
800	28,92	164,06	1,93	900	34,84	208,99	10,62	11,49

4.2. Modelo numérico

La investigación experimental de Balachowski fue complementada por una simulación, la cual respeta el orden temporal del procedimiento del ensayo, es decir, primero se realiza la inserción de la paleta para luego expandir la membrana. Cabe mencionar que ambas fases del ensayo, inserción de la paleta y expansión de la membrana, corresponden a un fenómeno en 3-D. La penetración de la paleta del DMT, siendo ésta casi plana, puede ser considerada de forma simplificada como un problema de 2-D; sin embargo, la expansión de la membrana circular ciertamente corresponde a un problema de 3-D. Teniendo en cuenta el pequeño desplazamiento del centro de la membrana de 1,1 [mm], es posible modelar esta expansión de manera aproximada como un problema de 2-D.

Bajo este enfoque, Balachowski propone dos ideas considerando condiciones de deformaciones elásticas para modelar la expansión de la membrana:

1. La membrana es tratada como una viga simplemente apoyada, cuyo tipo de modelo corresponde a uno de deformaciones planas (“plane strain”).
2. La membrana es tratada como una placa circular con apoyos libres alrededor de la circunferencia, cuyo tipo de modelo corresponde a uno axisimétrico.

Las fórmulas para la deflexión del centro de la membrana (f) bajo carga uniforme para ambas ideas señaladas anteriormente, se muestran en la Figura 4-6 a continuación.

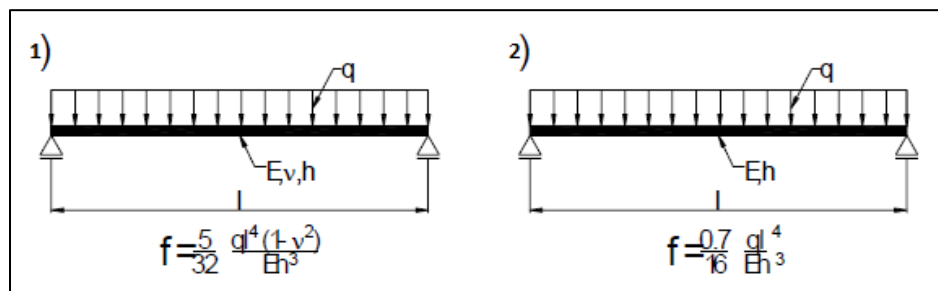


Figura 4-6: Deflexión del centro de la membrana: 1) viga simplemente apoyada en condición de deformaciones planas 2) placa circular (Balachowski, 2006).

Al comparar ambas expresiones se tiene:

1. Viga simplemente apoyada, considerando un coeficiente de Poisson $\nu=0,3$

$$f = 0,1422 \frac{ql^4}{Eh^3}$$

2. Placa circular

$$f = 0,0437 \frac{ql^4}{Eh^3}$$

Dónde:

q : Carga uniforme distribuida.

l : Longitud de la viga o diámetro de la placa.

E : Módulo de rigidez.

h : Espesor de la viga o placa.

Considerando la misma carga uniforme sobre ambas ideas, la deflexión en el caso de deformaciones planas será 3,5 veces más importante que las que ocurren en el caso axisimétrico, por lo tanto, con el fin de modelar correctamente la expansión de la membrana circular se debe aumentar 3,5 veces la deflexión en el centro de la membrana cuando se realizan cálculos utilizando el modelo tipo de deformaciones planas. Sin embargo, no sólo se debería incluir la presión impuesta (carga uniforme), sino también se debería incluir la respuesta del suelo, pero ésta posee un comportamiento elasto-plástico, dándole más complejidad al problema.

Para incluir este comportamiento del suelo Balachowski (2006) realizó algunos análisis numéricos, los cuales fueron hechos para verificar la respuesta de la membrana en condiciones de deformaciones planas y condiciones axisimétricas. Los cálculos fueron realizados en Plaxis y los modelos constitutivos elegidos fueron Mohr-Coulomb (M-C) y Hardening Soil Model (HSM), revisar sección 3.1.1.4. Se utilizó una malla fina, adicionalmente refinada sobre la paleta y la membrana, utilizando elementos de 15 nodos. Para definir el estado de esfuerzos iniciales se utiliza la opción aplicación de carga de gravedad y luego se reinician los desplazamientos a cero. La cuchilla fue puesta horizontalmente sobre la superficie de la cámara de calibración, y luego la CC fue rellena con arena. Debido a la simetría, sólo la mitad de la membrana fue modelada. Entonces se expande la membrana imponiendo una deformación volumétrica en el dominio (cluster) del cuerpo de la cuchilla, el cual se encuentra justo detrás de la membrana. Una respuesta numérica correspondiente a la lectura B (deflexión del centro de la membrana de 1,1 [mm]) fue evaluada para deformaciones planas (viga simplemente apoyada) y para condiciones axisimétricas (placa circular).

La distribución del esfuerzo de contacto normal calculado para la mitad de la membrana es mostrada en la Figura 4-7, donde se obtiene una distribución de esfuerzo de contacto normal considerablemente mayor para el caso axisimétrico en comparación con el obtenido para la condición de deformaciones planas. La distribución de esfuerzo de contacto normal también se calculó para el desplazamiento de 1,1 [mm] multiplicado por 3,5 para el caso de deformaciones planas. Debido a la plasticidad del suelo, el esfuerzo de contacto normal en el caso axisimétrico es mayor que en el caso de deformaciones planas con 3,85 [mm] de deflexión en el centro de la membrana.

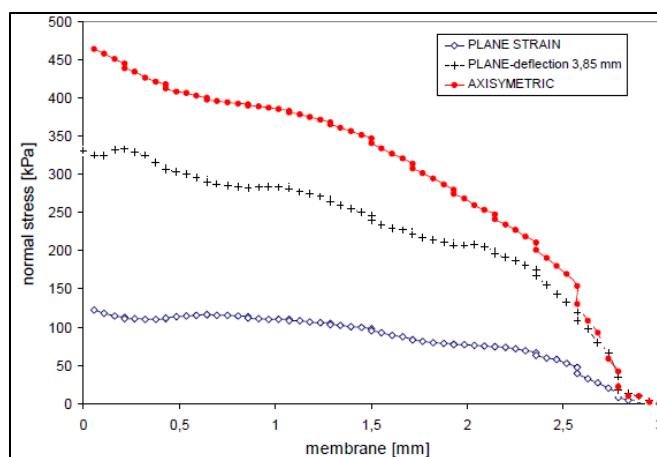


Figura 4-7: Distribución del esfuerzo de contacto normal sobre la mitad de la membrana (Balachowski, 2006).

En cuanto a la inserción, Balachowski (2006) sugiere imponer un desplazamiento vertical en la cuchilla hasta que se alcancen valores asintóticos en las trayectorias de tensiones y en este punto obtener el valor de la lectura A.

Como parte de los resultados que se cuentan del modelo numérico realizado por Balachowski, se presentan las Tabla 4-6 y Tabla 4-7, las cuales muestran los resultados de las lecturas A y B obtenidas mediante la simulación para una presión de confinamiento en la Cámara de Calibración de 50 [kPa] para muestras de arenas sueltas y densas, además, se varían los parámetros ϕ y E_{50} para observar su influencia en los resultados.

Tabla 4-6: Esfuerzo promedio de contacto normal sobre la membrana calculado para arena densa a 50 [kPa] de presión de confinamiento.

E_{50} [MPa]	ϕ [°]	M-C		HSM	
		A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
40	42	65	679	78	662
70	38	42	558		
	40	44	608		
	42*	85	831	76	721
100	42	101	858		

Tabla 4-7: Esfuerzo promedio de contacto normal sobre la membrana calculado para arena suelta a 50 [kPa] de presión de confinamiento.

E_{50} [MPa]	ϕ [°]	M-C	
		A [kPa]	B [kPa]
30	35	41	402
40	35#	45	427
	38	50	518
70	35	43	475

Las celdas destacadas con los signos * y # en las Tabla 4-6 y Tabla 4-7 respectivamente, corresponden a aquellos casos donde los dominios de suelos a ensayar virtualmente fueron definidos utilizando los parámetros de rigidez y resistencia obtenidos por medio de los ensayos CID para una presión de confinamiento de 50 [kPa] (ver Tabla 4-4), por lo tanto, sí es posible comparar los resultados obtenidos gracias a la simulación de Balachowski (2006) con los resultados obtenidos en la ejecución del ensayo DMT dentro de la CC.

Luego de haber presentado las mediciones de ensayos DMT dentro de una cámara de calibración, los ensayos triaxiales CID y el modelo numérico realizado por Balachowski (2006), es posible ahora definir la muestra de suelo a ensayar virtualmente y validar el modelo numérico propuesto en esta memoria por medio de la comparación con estas mediciones y resultados considerados como referentes.

CAPÍTULO 5. MODELO NUMÉRICO PROPUESTO

Para el desarrollo de este modelo se utilizan los principios del método científico, específicamente para este problema se utiliza el método sistémico, el cual está dirigido a modelar el objeto mediante la determinación de sus componentes, así como las relaciones entre ellos. Esas relaciones determinan, por un lado, la estructura del objeto, y, por otro su dinámica.

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo de un modelo numérico del ensayo DMT, el cual permite llevar a cabo la simulación de la ejecución del ensayo, tomando en cuenta condiciones de bordes definidas para el modelo y los parámetros geotécnicos, entre otras cosas.

Los resultados obtenidos en esta memoria están relacionados puntualmente para un suelo granular homogéneo. El enfoque, metodología, procedimiento y resultados podrán ser utilizados para aumentar la base de datos de suelos a modelar o realizar una simulación de un ensayo similar como, por ejemplo, el presiómetro PMT.

5.2. Planteamiento del Problema

El ensayo DMT posee inherentemente cierta complejidad para su simulación como, por ejemplo: el gran número de parámetros geotécnicos necesarios para definir el suelo; la interrelación existente entre estos parámetros; las imprecisiones a la hora de cuantificar el efecto asociado a la interacción entre el suelo y la cuchilla del DMT en la fase de inserción; y la heterogeneidad del suelo en el terreno. Además, se debe mencionar que las fases de inserción de la cuchilla y expansión de la membrana corresponden a fenómenos en 3D.

Debido a lo mencionado anteriormente es necesario considerar una situación bien controlada, en donde sea posible eliminar la influencia o incertidumbre de ciertos parámetros y que permita trabajar con un suelo homogéneo. Esto es factible cuando el ensayo DMT es ejecutado dentro de una Cámara de Calibración (CC), la cual posee condiciones de bordes bien definidas, permite trabajar con un suelo específico a distintos niveles de presión de confinamiento y decidir sobre la presencia de agua en la muestra de suelo. El ensayo DMT es un ensayo que tiene asociado dos lecturas independientes y cuando éste es ejecutado dentro de una cámara de calibración representa una interesante oportunidad para una posible simulación numérica.

En esta memoria los resultados obtenidos por medio de un modelo numérico que simula ambas fases del ensayo DMT, se comparan con las lecturas de presiones del ensayo DMT obtenidas en laboratorio cuando el ensayo es ejecutado dentro de una cámara de calibración (Balachowski, 2006). Para llevar a cabo esta simulación, se cuenta con el software Plaxis v 8.5 que realiza cálculos con elementos finitos en modelos de 2-D.

5.2.1. Parámetros del suelo en estudio

Para el desarrollo de esta tesis se trabaja con el mismo suelo que se utiliza en el trabajo de Balachowski (2006), el cual corresponde a una arena fina cuarzosa uniforme ($U=1,4$ y $d_{50}=0,21$

[mm]) de la playa Baltic en Lubiato, Polonia. Para este tipo de arena se posee información de los parámetros de rigidez y resistencia, la cual fue presentada en la sección 4.1. Puntualmente, se utiliza como caso de estudio la muestra de arena densa sometida a una presión de confinamiento de 50 [kPa], cuyos parámetros se presentan en la Tabla 4-4.

Debido a que la muestra de arena no se encuentra completamente definida, es necesario buscar información en trabajos, casos de estudio e investigaciones relacionados con el lugar donde pertenece la muestra. La información que se requiere corresponde al peso específico y al coeficiente de Poisson. Los trabajos que se presentan a continuación sugieren un rango de valores que podrían adoptarse para definir la muestra considerada.

- **Peso específico:** Según Bałachowski & Gotteland (2007) trabajan con un peso específico mínimo de $\gamma_{dmin}=14,52$ [kN/m³] y un peso específico máximo de $\gamma_{dmax}=16,38$ [kN/m³]; Dembicki & Duszynski afirman que el peso específico mínimo seco es de $\gamma_{dmin}=14,3$ [kN/m³] y que el peso específico máximo es de $\gamma_{dmax}=17,5$ [kN/m³]; Lesniewska, D. (2009) y Panda, T. C., Omre, P. K., & Kumbhar, B. K. (2008) trabajan con un valor promedio de $\gamma_d=17,0$ [kN/m³].
- **Coeficiente de Poisson:** En el trabajo realizado por Adam Bolt & Dembicki, E. (1995) sugieren que el valor del coeficiente de Poisson para la arena de Lubiato es de aproximadamente 0,3. Además, se considera los rangos del coeficiente de Poisson propuestos en la Tabla 5-1 que señala que las arenas sueltas poseen un Poisson entre [0,2-0,4] y arenas densas entre [0,3-0,45], por lo tanto, el rango que se utiliza para variar el coeficiente de Poisson será entre [0,2-0,3].

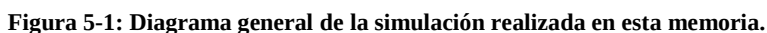
Tabla 5-1: Rango de valores para el coeficiente de Poisson en suelos granulares (Braja M. Das, 2008)

Tipo de Suelo	Rango de coeficiente de Poisson
Arena Suelta	0,2-0,4
Arena Densidad media	0,25-0,4
Arena Densa	0,3-0,45
Arena Limosa	0,2-0,4
Arena y Grava	0,15-0,35

5.2.2. Definición del modelo

Para la definición del modelo se considera la situación en la que el ensayo DMT es ejecutado dentro de una cámara de calibración (CC), debido a que asociado a la CC existen condiciones de borde bien definidas y se trabaja con muestras de suelo homogéneas. Las muestras de suelos que se consideran en esta memoria son las utilizadas en el trabajo de Balachowski (2006), las cuales corresponden a muestras homogéneas de suelos granulares sin cohesión, que fueron reconstituidas por deposición pluvial dentro de la CC; además, debido a que estas muestras fueron preparadas, es posible ensayarlas en laboratorio para obtener los parámetros geotécnicos del suelo que caracterizan su comportamiento a distintos niveles de presión de confinamiento y grados de saturación, por lo tanto, el ensayo DMT ejecutado dentro de la CC es una situación bien controlada y representa una atractiva posibilidad para llevar a cabo esta simulación.

Esta simulación comprende la reproducción de la respuesta del suelo cuando se realiza un ensayo DMT haciendo uso de un software de elementos finitos (Plaxis), con la idea de observar la distorsión del suelo y los esfuerzos generados en cada una de las fases del ensayo: inserción de la cuchilla del DMT y expansión de la membrana. Considerando lo dicho en la sección 4.2, la cual trata sobre las sugerencias e hipótesis adoptadas en la simulación realizada por Balachowski (2006), además, se trata de emular de la mejor manera posible el trabajo de Balachowski con el fin de poder comparar y validar la simulación presentada en esta memoria. El esquema general del desarrollo de la simulación realizada en esta memoria se muestra en la Figura 5-1, donde se presenta de manera resumida la definición y validación de la simulación.



En la Figura 5-1 se presenta el esquema general de la simulación del ensayo, donde es posible notar que la simulación del ensayo está conformada por dos aristas, por un lado, se encuentra la definición del modelo geométrico, y por el otro, la ejecución del ensayo virtual.

En la definición del modelo geométrico se define la sección transversal representativa del problema, la cual es explicada en la sección 5.3.1 y presentada en la Figura 5-4. Esta sección se encuentra conformada por los siguientes objetos:

- i) Suelo por ensayar: Corresponde a la muestra de suelo que se utilizará en la ejecución del ensayo DMT dentro de la CC.
- ii) Cámara de calibración: Su definición depende de las dimensiones y condiciones de bordes adoptadas.
- iii) Paleta DMT: Está conformada por el contorno, la membrana y el dominio DMT, y su definición depende dimensiones y restricciones de movimiento adoptadas.

Una vez adoptadas las dimensiones, condiciones de borde y restricciones de movimiento, se procede a definir los conjuntos de datos (ver secciones 5.5.1, 5.5.2 y 5.5.3) para cada uno de los componentes involucrados. Estos conjuntos de datos se apoyan en mediciones de laboratorio, propiedades físicas de los materiales y las dimensiones ya establecidas de los elementos, además, los conjuntos de datos quedan controlados por el modo de deformación del suelo y ausencia de deformación en la paleta cuando se realizan pruebas de inserción y expansión. Para cumplir estos requerimientos se estudió la influencia de los componentes en los resultados, con el fin de observar el comportamiento del suelo y paleta (ver sección 5.3.6).

Una vez que ya se han definido los componentes y a éstos ya se les ha asignado sus correspondientes conjuntos de datos es posible subdividir la sección transversal representativa del problema en una malla de elementos finitos, los cuales corresponden a elementos triangulares de 15 nodos; si aún quedan conjuntos de datos pendientes por definir o asignar no es posible generar la malla de elementos finitos.

Creada la malla de elementos finitos se procede a la ejecución del ensayo virtual, el cual consta de las siguientes fases:

- i) Confinamiento: Se confina la muestra de arena dentro de la Cámara de Calibración de acuerdo con la condición de borde tipo BC1.
- ii) Inserción: se inserta la cuchilla en la muestra de suelo, esto genera información para obtener la Lectura A.
- iii) Expansión: se expande la membrana contra la muestra de suelo, esto genera información para obtener la Lectura B.

Luego de realizadas las fases del ensayo se analiza la información generada a partir de la inserción y expansión para obtener los resultados. Estos se obtienen mediante el cálculo del esfuerzo promedio, el cual depende del área de dominio considerada. Estos resultados se comparan con las medidas de ensayos DMT ejecutados dentro de la Cámara de Calibración en laboratorio y se comparan también con los resultados de la simulación realizada por Balachowski. Finalmente se analiza si estos resultados son satisfactorios para dar por terminada la simulación del ensayo DMT.

Se debe tener en cuenta que en esta simulación interesa representar el comportamiento del suelo cuando se ejecuta un ensayo DMT en éste, por lo tanto, esto corresponde a un problema de análisis de esfuerzo-deformación. En el que el suelo es considerado como el objeto de análisis y el equipo DMT es el encargado de ejercer la sollicitación (deformación de la membrana). De manera análoga a un problema estructural, lo principal es representar correctamente la estructura (objeto de análisis) y luego modelar la carga, de modo que las fuerzas equivalentes y modo de deformación sean los esperados.

La representación del suelo está asociada directamente con el modelo constitucional elegido y la precisión de los parámetros que los definen; por otro lado, para la representación de la paleta, puntualmente, para la ejecución del ensayo (sollicitación de las cargas en el suelo) se debe tener presente que lo importante no es representar correctamente las propiedades físicas del equipo DMT, sino el modo en el que el equipo perturba el suelo. Por esta razón, la definición del equipo DMT en el modelo queda controlada por el modo en que la expansión de la membrana deforma el suelo contiguo y por la nula deformación que debiera existir en el contorno de la paleta después de haber experimentado la fase de inserción.

Sumado a la importancia de la correcta representación del modo de deformación del suelo, se tiene que para la expansión de la membrana en el ensayo real existe un aumento de presión de un gas dentro de la paleta, lo cual conlleva a la expansión de la membrana; sin embargo para el ensayo virtual no es posible presurizar la paleta DMT modelada y esperar la consecuente expansión de la membrana, por lo tanto, para poder representar la expansión de la membrana es necesario imponer una deformación volumétrica en el dominio del cuerpo de la paleta, para que esta deformación ocurra exclusivamente en la membrana se deben definir apropiadamente el conjunto de datos y las restricciones de movimiento a los elementos placa que conforman el contorno de la paleta. Para el caso real las lecturas A y B se obtienen debido al aumento de presión que se mide en la unidad de control, que se encuentra en superficie, la cual posee manómetros; por otra parte, en el modelo estas lecturas se obtienen bajo la idea de que existe un equilibrio de presiones entre la presión impuesta por la membrana y la presión ejercida en el suelo, por esta razón, las lecturas A y B se determinan a través del aumento de presión en los puntos de tensión pertenecientes al dominio del suelo por ensayar.

5.3.1. Consideraciones

Para el modelado del ensayo DMT dentro de la CC, el tipo de modelo que se utiliza para realizar la simulación del ensayo DMT es uno de deformaciones planas (“Plane Strain”), según lo recomendado por Balachowski (2006). Los elementos finitos que se utilizan son elementos triangulares de 15 nodos, los cuales entregan la mayor precisión posible en los cálculos. Considerando el tipo de muestras que se utilizan en este trabajo, la magnitud de deformaciones y tensiones a las que se somete la muestra, el comportamiento del suelo que define la muestra cuando se ejecuta el ensayo DMT puede ser representado por modelos constitutivos del suelo, tales como los modelos de Mohr-Coulomb y Hardening Soil Model, descritos en la sección 3.1.1.4. El modelo de Mohr-Coulomb es recomendado para predecir estados de esfuerzo de falla en suelos definidos en condiciones drenadas cuando se utilizan parámetros efectivos, las muestras de suelos con las que se trabajará en esta memoria corresponden a muestras secas de suelo granular homogéneo sin cohesión, por lo tanto, este tipo de muestra es propicia para ser definida por este modelo. Por otra parte, el modelo Hardening Soil requiere de un mayor número de parámetros para ser correctamente definido, por lo tanto, es necesario contar con más información o adoptar sugerencias para utilizarlo correctamente, lo cual significa que emplear este modelo podría ser más exigente o menos preciso cuando se compara con M-C. Debido a lo mencionado anteriormente, en esta memoria se trabajará exclusivamente con el modelo de Mohr-Coulomb.

En cuanto a la expansión real de la membrana, la forma expandida de ésta podría aproximarse a la pequeña porción de una esfera cortada por un plano vertical, de manera que este plano de corte contenga una circunferencia de 60 [mm] de diámetro, la cual representa el diámetro de la membrana; y este pequeño volumen de la esfera cortada debe poseer 1,1 [mm] del radio total de la esfera, de manera que esta longitud este centrada y sea perpendicular al plano que define la circunferencia, este volumen representa la membrana expandida. Dicho de otro modo, la membrana se expande dentro del suelo con forma aproximadamente esférica a lo largo de un eje perpendicular al plano de la cuchilla. El modo en que deforma el suelo cuando la expansión de la membrana es simulada, depende del tipo de modelo utilizado. Esto se aprecia la Figura 5-2, la cual muestra cómo se deforma el suelo para un modelo de deformaciones planas y para otro axisimétrico, teniendo en cuenta la situación en que la cuchilla es dispuesta horizontalmente y sólo la mitad de la membrana (simetría) es considerada. Esta disposición corresponde a la utilizada por Balachowski (2006) para cuantificar la respuesta elasto-plástica del suelo en el análisis de expansión de la membrana (sección 4.2).

Al revisar la Figura 5-2 es posible notar que el tipo de deformación asociado al modelo de tipo axisimétrico, al ser multiplicado por 2π representa correctamente el modo aproximado de deformación del suelo señalado anteriormente, y que para el caso de deformaciones planas el suelo poseerá deformaciones adicionales con respecto a ese modo de deformación. Por otra parte, Plaxis sólo permite trabajar con la gravedad y el eje de simetría asociados exclusivamente al eje Y, por esta razón, para representar correctamente la ejecución del ensayo DMT es necesario orientar verticalmente la cuchilla del equipo. Esta nueva disposición de la cuchilla significa desplazamientos diferentes del suelo, a los presentados en la Figura 5-2. Al considerar ambos tipos de modelos (deformaciones planas o axisimétrico), es posible observar en la Figura 5-3 que ninguna de estas dos opciones simula correctamente la forma expandida de la membrana, en consecuencia, es necesario trabajar con la opción que entregue mejores resultados.

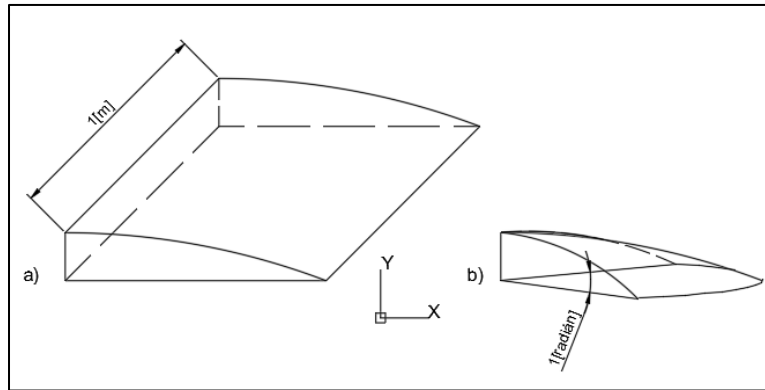


Figura 5-2: Esquema de deformación del suelo considerando la cuchilla disupuesta horizontalmente para modelo tipo de a) deformaciones planas b) axisimétrico.

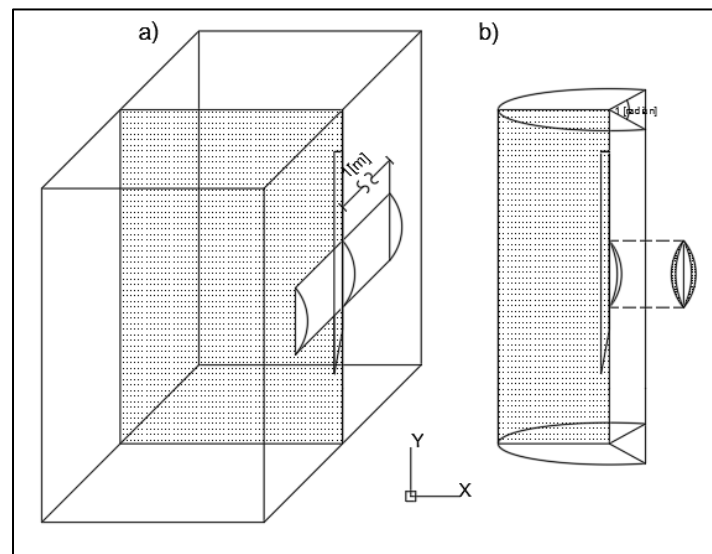


Figura 5-3: Esquema de deformación del suelo considerando la cuchilla disupuesta verticalmente para modelo tipo de a) deformaciones planas b) axisimétrico.

Considerando lo expuesto anteriormente y lo presentado en la sección 4.2, se decide por modelar ambas fases del ensayo DMT en 2D bajo la opción de deformaciones planas, ya que su modo de deformación es el más cercano al correcto, de acuerdo a lo que es permitido definir en Plaxis, además, los esfuerzos no son gravemente sobreestimados por los efectos de la plasticidad del suelo (como sucede en el modelo axisimétrico cuando la cuchilla es puesta horizontalmente, Balachowski 2006).

El modelo 2-D considera la ejecución del ensayo DMT dentro de una cámara de calibración. El eje del equipo DMT dentro de la CC corresponde también al eje de simetría del sistema DMT-CC cómo es posible de ver en la Figura 4-1, por lo tanto, sólo se utilizará la mitad de la cuchilla del DMT que contiene la membrana. En esta simulación 2-D la paleta se modela mediante un corte longitudinal perpendicular al ancho de la cuchilla que pasa por el eje del equipo. Esta vista lateral contiene el punto de máxima deflexión o centro de la membrana. La forma de la paleta fue diseñada para que ésta sea similar a la presentada en la descripción del equipo en la norma ASTM Standard 6635-0. El contorno de la paleta fue definido mediante elementos placa, el diámetro de la membrana fue definido

por 60 [mm] de elementos placa y se utiliza una interface entre la membrana y el suelo para modelar la interacción suelo-membrana. Al dibujar el contorno del DMT se define un nuevo dominio (en inglés “cluster”) que corresponderá al cuerpo de la cuchilla. El sistema DMT-CC simulado en Plaxis se aprecia en la Figura 5-4, donde se representa la sección transversal representativa del problema sometida a la condición de borde tipo BC1, ver Tabla 4-1, y además, se realiza un acercamiento a la paleta DMT para poder apreciar fácilmente sus componentes e interface.

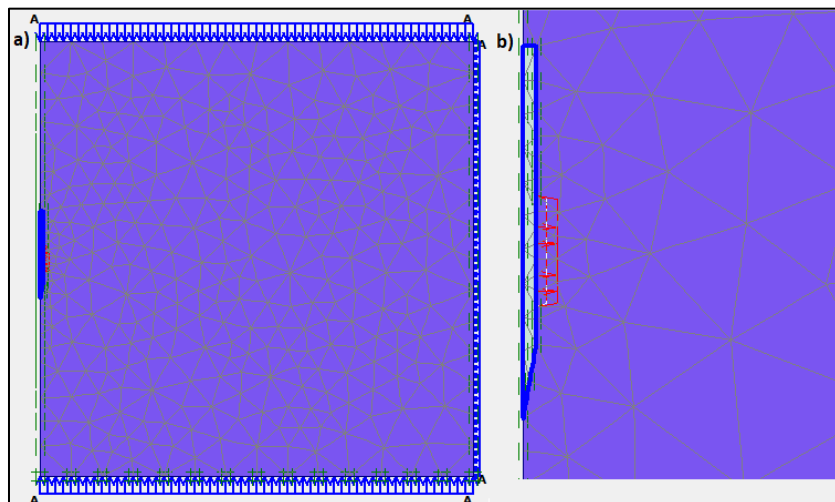


Figura 5-4: Modelo 2-D del sistema paleta DMT-CC: a) Sección transversal representativa del problema y b) acercamiento a la paleta DMT.

5.3.2. Modelado de la inserción de la cuchilla

Las distancias verticales asociadas a un sondaje o a un ensayo DMT (generalmente 20 [cm]) significan grandes deformaciones puntuales en la malla de elementos finitos, por otro lado, Plaxis no permite llevar a cabo un análisis para deformaciones de gran magnitud ni aun cuando se utiliza la opción de Malla Actualizada (“Updated Mesh”). Sin embargo, sí es posible conocer los efectos de la inserción de la cuchilla cuando ésta se desplaza pequeñas distancias a través del suelo, como es posible ver en Figura 5-5.

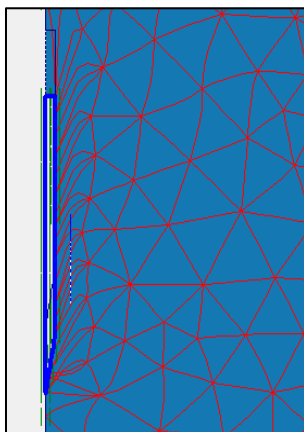


Figura 5-5: Ejemplo de la malla deformada cuando la paleta es insertada en el suelo.

La inserción de la paleta se realiza imponiendo un desplazamiento uniforme en la parte superior de ésta. La paleta se posiciona de forma tal, que el centro de la membrana coincida con el punto de interés. La inserción es parada cuando la resistencia a la penetración se aproxime a un valor asintótico; cómo es posible observar en la Figura 5-6, donde se muestran las trayectorias de esfuerzos correspondientes a los puntos de tensión ubicados bajo la paleta, y, por otro lado, la Figura 5-7 muestra trayectorias de esfuerzos para puntos de tensión próximos a la membrana.

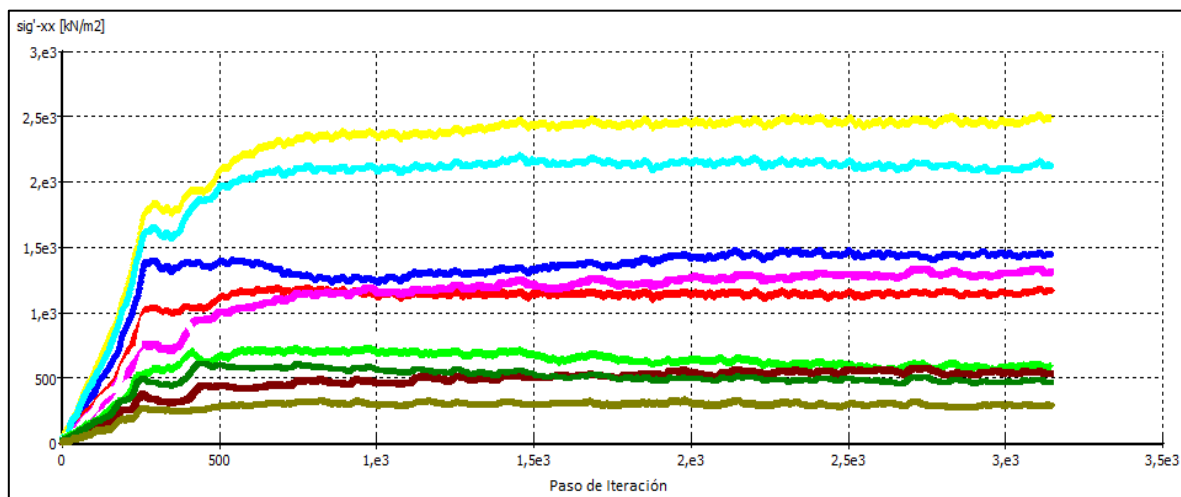


Figura 5-6: Curvas asintóticas de esfuerzo correspondientes a puntos de tensión bajo la paleta.

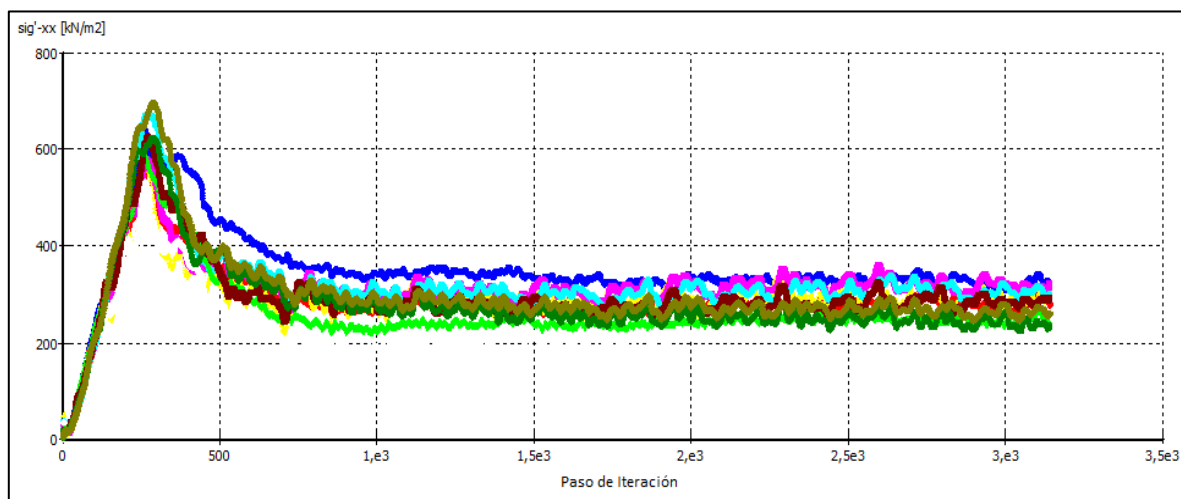


Figura 5-7: Curvas asintóticas de esfuerzo correspondientes a puntos de tensión próximos a la membrana.

Balachowski (2006) registra la presión promedio en la membrana una vez que se alcanzan los valores asintóticos en las trayectorias de tensiones y asocia este valor a la lectura A. Debido a que eventualmente se alcanzarán los valores asintóticos en las trayectorias de esfuerzos de los puntos de tensión próximos a la membrana, no es necesario insertar la paleta más de lo suficiente para llegar a estos valores, ya que el valor de la lectura A registrada por esta vía no se verá afectado y una mayor profundidad de inserción sólo significará mayor tiempo de cálculo.

5.3.3. Modelado de la expansión de la membrana

Considerando lo dicho anteriormente en cuanto a una simulación más apropiada de la deflexión de la membrana circular cuando ésta se modela en 2-D, se debe aumentar la deflexión en 3,5 veces si se realizan cálculos utilizando el modelo tipo de deformaciones planas, por lo tanto, se debe alcanzar una deflexión de 3,85 [mm] en el centro de la membrana para luego calcular el valor promedio en la distribución de esfuerzos normales de contacto a lo largo de la membrana, lo cual correspondería a la lectura B. Para realizar la fase de expansión de la membrana se ubica a la paleta del DMT, de tal manera que el centro de la membrana coincida con el punto de interés. La expansión de la membrana se modela a partir de una deformación volumétrica impuesta en el dominio que define el material de la cuchilla DMT, que se encuentra detrás de la membrana. En la Figura 5-8 se puede apreciar la expansión de la membrana (imagen ampliada), en donde el esfuerzo ejercido asociado a la deformación volumétrica impuesta no es horizontal, sino que es perpendicular a la membrana expandida, de modo que, simula la presión que ejerce el gas sobre la membrana. Además, la máxima deflexión es observada en el centro de la membrana, lo cual es consistente con la forma esperada en que se debería deformarse la membrana.

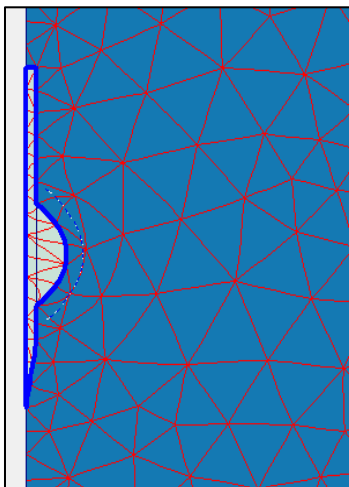


Figura 5-8: Ejemplo de la malla deformada cuando la membrana es expandida (imagen ampliada).

5.3.4. Cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal a lo largo de la membrana

Para conocer el valor del esfuerzo promedio de contacto normal a lo largo de la membrana, ya sea en la fase de inserción o de expansión, se debe conocer el valor de la coordenada X por donde pasa la membrana y los valores de la coordenada Y que representan los límites inferior y superior de la membrana, luego se elige un valor de la coordenada X dentro del dominio de la muestra de arena, encerrando un área de dominio, la cual contiene puntos de tensión. Estos puntos de tensión se promedian para obtener el valor del esfuerzo promedio de contacto. A continuación, en la Figura 5-9 se muestra la elección del ancho del rectángulo del área de dominio (Coordenada X), por lo tanto, la definición del área de dominio queda completa, encerrando los puntos de tensión que fueron sometidos al análisis de esfuerzo-deformación.

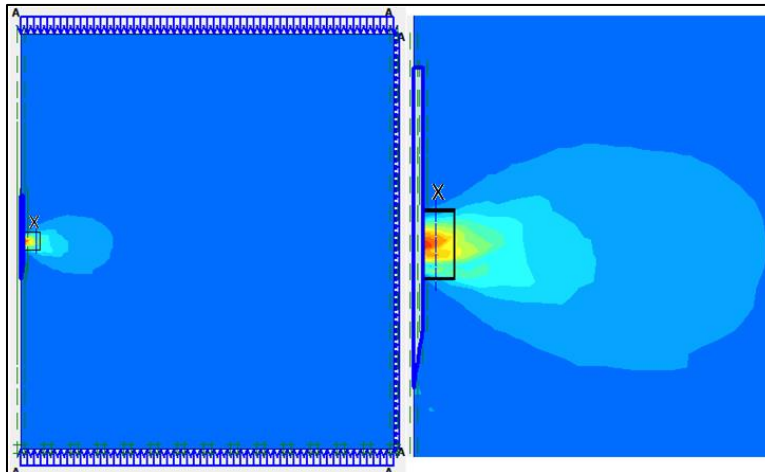


Figura 5-9: Definición del área de dominio con la cual se obtendrá el esfuerzo promedio.

Es fundamental saber la manera en que Balachowski obtiene de su simulación los valores promedios de las distribuciones de esfuerzo de contacto normal, para luego poder comparar los valores promedios de las simulaciones realizadas por Balachowski con los valores promedios de las simulaciones realizadas en esta memoria. A continuación, la Figura 5-10 presenta la distribución de esfuerzo de contacto normal calculado mediante el modelo Mohr-Coulomb considerando condiciones de bordes del tipo BC1 para un caso de arena densa confinada a 50 [kPa]. Esta distribución de esfuerzos presentada en la Figura 5-10 fue calculada gracias a una simulación realizada por Balachowski, a partir de ésta Balachowski obtuvo un esfuerzo promedio de 831 [kPa]. Utilizando la misma distribución de esfuerzo (Figura 5-10) se obtuvo un valor de esfuerzo promedio de 842 [kPa]. Estos valores calculados para la misma distribución de esfuerzos no son iguales, ya que el valor de cada punto de tensión se obtuvo de manera aproximada por medio de la inspección del gráfico, por lo tanto, debido a estas pequeñas diferencias se puede afirmar que el procedimiento indicado anteriormente corresponde al modo con el cual Balachowski calcula los esfuerzos promedios.

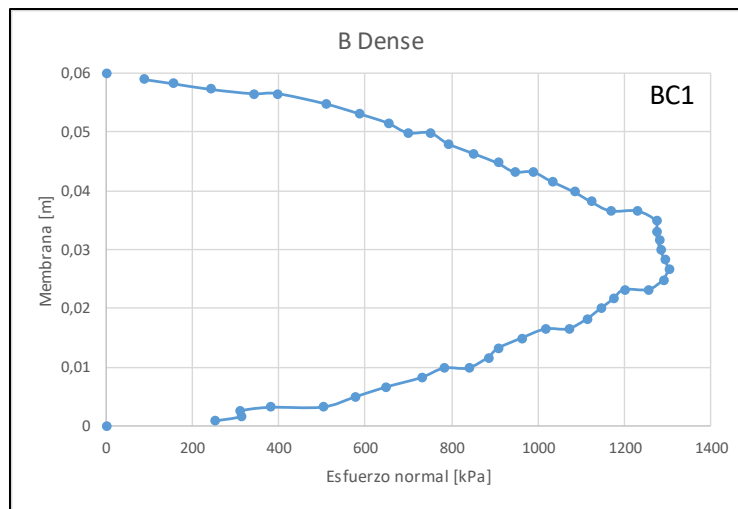


Figura 5-10: Distribución de esfuerzo de contacto normal asociado a la expansión de la membrana para una muestra granular densa confinada a 50 [kPa].

5.3.5. Manipulación de la información obtenida

Después de haber llevado a cabo bastantes simulaciones es posible afirmar que los resultados dependen del refinado de la malla de elementos finitos y también del área de dominio considerada para calcular el esfuerzo promedio de contacto normal. Se debe mencionar que asociado a solo un caso de análisis se obtienen muchos resultados, ya que se tiene un resultado diferente para cada uno de los niveles de refinado de la malla, y, además para cada nivel de refinado es posible definir distintas áreas de dominio, lo cual significa más resultados. Con el fin de presentar la información obtenida de las simulaciones de manera concisa, se buscará el resultado para un nivel de refinado y área de dominio que mejor represente la distribución de esfuerzos normales a lo largo de la membrana.

Para analizar la influencia del área de dominio en los resultados se presenta la Tabla 5-2, la cual muestra cómo afecta el área de dominio considerada en el cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B, para distintos valores del radio de la cámara de calibración cuando se utiliza un refinamiento de malla similar en la zona de la cuchilla. Todos los resultados fueron generados a partir de los valores propuestos en la sección 5.2.1 y los parámetros que se adoptarán posteriormente, además, la simulación empleada en este caso considero ambas fases del ensayo (método continuo). La primera fila corresponde al valor de la coordenada X dentro del dominio del suelo, la cual sirve para definir un área rectangular dentro de este dominio, los otros límites de este rectángulo guardan relación con la posición y dimensiones de la membrana; y, por último, en la primera columna se varía el radio de la cámara de calibración.

Tabla 5-2: Influencia del radio de la CC y del área del dominio de suelo en el calculo del esfuerzo promedio.

Radio CC	Coordenada X							
	0,0085 [m]	0,013 [m]	0,015 [m]	0,02 [m]	0,05 [m]	0,1 [m]	0,2 [m]	0,5 [m]
10 [m]	-860,04	-948,16	-967,32	-966,44	-918,13	-853,18	-825,41	-789,30
5 [m]	-879,95	-931,27	-910,06	-912,90	-891,13	-834,95	-799,04	-763,61
2,5 [m]*	-848,74	-816,84	-813,34	-846,73	-822,13	-780,38	-725,71	-635,68
2 [m]	-866,40	-961,92	-970,71	-944,77	-914,20	-858,18	-822,39	-738,26
1,5 [m]	-919,88	-970,57	-1000,15	-1007,48	-924,53	-848,32	-754,89	-560,54
1 [m]	-995,46	-991,68	-1041,42	-1046,59	-989,48	-943,55	-853,01	-652,85
0,53 [m]	-804,09	-874,07	-875,35	-834,38	-806,54	-748,42	-615,88	-441,91
0,265 [m]	-523,34	-563,55	-578,84	-572,44	-550,30	-493,69	-415,49	-383,27

A continuación, en la Figura 5-11 se presentan las curvas de distribución de esfuerzo para distintas áreas de dominio (definidas por la coordenada X dentro del dominio del suelo) cuando el radio de la cámara de calibración es de 1[m]. Al aumentar el área del dominio de suelo implica un aumento en el número de puntos de tensión considerados. Los puntos de tensión más cercanos a la membrana definen el perfil de la curva de esfuerzos a lo largo de la membrana y los puntos de tensión más lejanos poseen valores menores de esfuerzos que se grafican dentro del perfil de la curva. Lo dicho anteriormente se puede observar para valores de la coordenada $X > 0,1$ [m], cuyas curvas poseen bastantes puntos de tensión cuya magnitud es inferior al perfil de la curva de esfuerzos.

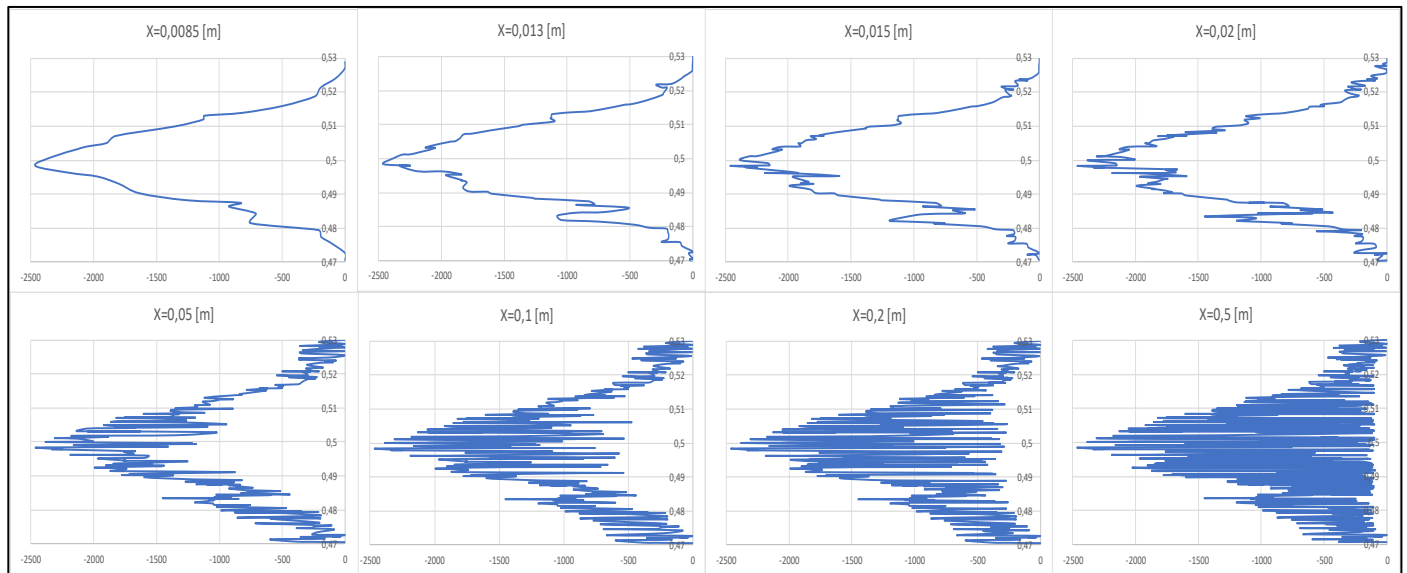


Figura 5-11: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de la coordenada X, que define las áreas de dominios consideradas.

Al observar la Figura 5-11 y la Tabla 5-2 se decide utilizar el área de dominio relacionada con la coordenada $X=0,0085$ [m], la cual dibuja el perfil de la curva de distribución de esfuerzos de manera más continua, además, el esfuerzo promedio para esta área rectangular de dominio es más representativo, ya que para valores intermedios de la coordenada X se obtienen los máximos esfuerzos promedios y para los valores de X mayores se obtienen los promedios más bajos, debido a lo mencionado anteriormente para los puntos de tensión asociados a una coordenada $X>0,1$ [m].

Por otra parte, el grado de refinamiento también afecta a los resultados de los valores de esfuerzos promedios, debido a que un mayor refinamiento tiene asociado una mayor presencia de puntos de tensión en un área de dominio considerada. La Tabla 5-3 muestra esta influencia mencionada en el cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal cuando se consideran ambas fases del ensayo (método continuo) para el caso de estudio, además, se varía el radio de la CC y se adopta el valor de la coordenada $X=0,0085$ [m] elegido anteriormente.

Tabla 5-3: Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y una área de dominio asociada a $X=0,0085$ [m] para una muestra densa confinada a 50 [kPa].

Grado de Refinado	GC=Fine; RC=0; RL=0		GC=Fine; RC=1; RL=0		GC=Fine; RC=1; RL=1		GC=Fine; RC=1; RL=2	
Radio CC	A	B	A	B	A	B	A	B
26,5 cm	61,12	530,33	52,13	524,84	53,42	516,80	37,32	579,80
53 cm	71,61	656,05	58,41	740,68	54,07	804,09	47,82	807,93
100 cm	No aplica		86,42	891,21	87,19	935,13	70,20	1025,72
150 cm	No es posible calcular		No es posible calcular		92,10	919,88	78,35	881,69

La primera fila está relacionada con el grado de refinado.

GC: “Global Coarseness” o refinado global.

RC: “Refine Cluster” o refinado local en el dominio seleccionado.

RL: “Refine Line” o refinado local en la línea seleccionada.

En la Tabla 5-3 algunas celdas son rellenadas con la frase no aplica o no es posible calcular, el primer caso se refiere a que no existen puntos de tensión dentro del área de dominio considerada y el otro caso se utiliza cuando el programa no puede entregar resultados bajo esas condiciones. A continuación, en la Figura 5-12 se presentan las curvas de distribución de esfuerzos para los distintos grados de refinamiento calculados en la Tabla 5-3 cuando se considera un radio de la cámara calibración de 1 [m] (ver leyenda de cada gráfico para apreciar el grado de refinado de la malla de elementos finitos).

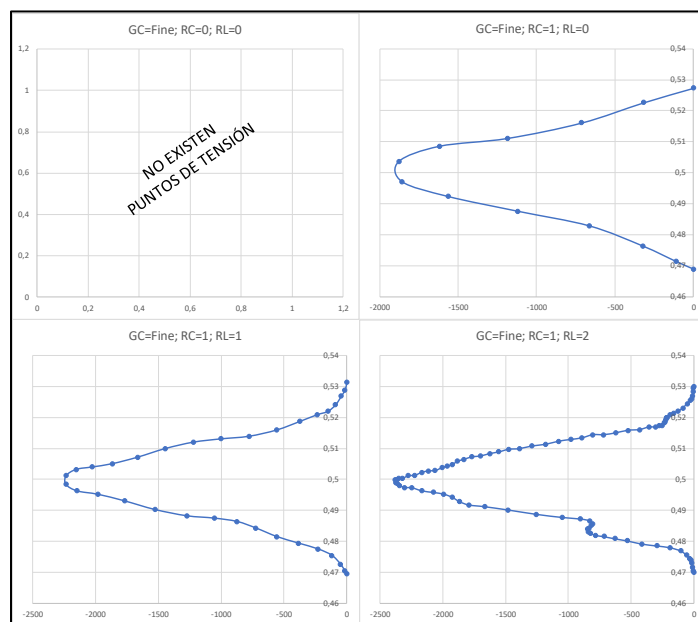


Figura 5-12: Curvas de distribución de presión para distintos grados de refinamiento.

Luego de revisar estas curvas se opta por utilizar la opción con un refinado global fino (GC=Fine), con un solo refinado local en la malla del dominio del cuerpo de la paleta (RC=1) y otro refinado local adicional en la línea que define la membrana (RL=1), ya que las alternativas menos refinadas no representan correctamente las curvas de distribución de presiones en algunos casos, y la opción más refinada tiene asociado un mayor tiempo de cálculo; Además, Balachowski (2006) utiliza la alternativa escogida para conocer los efectos de la respuesta elasto-plástica del suelo cuando se dispone horizontalmente a la cuchilla dentro de la CC y se expande la membrana (sección 4.2), y también al revisar las figuras adjuntas en su trabajo se estima que el grado de refinado es similar.

5.3.6. Influencia de los componentes de la simulación en la Lectura B

Para realizar esta simulación no sólo es necesario definir completamente el suelo que se ensayará, sino que además se debe definir el sistema DMT-CC para esto se analiza por separado la paleta del DMT y la cámara de calibración. La paleta del DMT se define mediante los siguientes componentes: membrana, contorno de la paleta definido por elementos placas y el dominio que define el cuerpo de la cuchilla del DMT. Además, las dimensiones consideradas en la definición de la paleta y la cámara de calibración también deberán ser estudiadas.

Cada de uno de estos componentes será analizado mediante la variación de los valores que los definen, fijándose en el cambio que significa esta variación en el esfuerzo promedio asociado a la lectura B (expansión de la membrana) cuando el resto de los parámetros se mantienen constantes. Para este fin el centro de la membrana se ubica en el punto de interés y luego se aplica una deformación volumétrica en el dominio que define el cuerpo de la paleta DMT. Al contorno de la paleta se le asignan restricciones de desplazamiento en ambas direcciones, obligando a que la expansión volumétrica ocurra sólo en la zona de la membrana. Este análisis considera sólo la fase de expansión debido a que los tiempos de cálculo se reducen significativamente, además, permite aislar aún más la influencia de cada parámetro.

Antes de mostrar estos resultados es necesario explicar el formato con el cual serán presentados y también señalar los valores asumidos de ciertos parámetros. Con el objetivo de cumplir lo anterior se crea la Tabla 5-4, la cual corresponde a la tabla tipo que presenta los resultados de esfuerzos promedios para los distintos casos en análisis, considerando el área de dominio y nivel de refinado de la malla de elementos finitos adoptados en la sección 5.3.5. Se debe mencionar que en este ejemplo (Tabla 5-4) se ha elegido la rigidez (E[kPa]) como parámetro variable, pero no se ha variado su magnitud de 2,1 E+08 [kPa], ya que en este ejemplo sólo se pretende indicar la estructura de la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Cálculo del esfuerzo de contacto normal promedio en la membrana.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar		Dimensiones			
Contorno [mm]	8	Y peso [kN/m3]	17	Paleta DMT		Finno 1993	
Membrana [mm]	0,2	Poisson	0,286	Radio CC [cm]		53	
E [kPa]	Variable	R interfaz	1				
Parámetro Variable: E [kPa]							
Magnitud Parámetro	2,1,E+08	2,1,E+08	2,1,E+08	2,1,E+08	2,1,E+08	2,1,E+08	2,1,E+08
Esfuerzo Promedio	834,7	834,7	834,7	834,7	834,7	834,7	834,7

Los valores de los parámetros asumidos son indicados y clasificados en la fila superior, en donde se puede apreciar una clasificación de los parámetros que intervienen en el cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal: i) Dominio del suelo por ensayar; ii) Componentes de la Paleta DMT; iii) Dimensiones.

La sección “Dominio de Suelo por Ensayar” está conformada por los parámetros que no fueron especificados en el trabajo de Balachowski (2006) y que son necesarios para definir un dominio de suelo, los cuales son: peso específico del suelo, Coeficiente de Poisson y Resistencia de la interfaz. Los parámetros omitidos en esta lista, que también definen el dominio del suelo fueron definidos con los valores correspondientes del caso de estudio propuesto (ver Tabla 4-4)

La sección “Paleta DMT” está conformada por todos los componentes necesarios para definirla en el modelo geométrico, los cuales corresponden a: Contorno de la paleta, Membrana, Dominio del cuerpo de la paleta (Rigidez E).

Finalmente, la sección “Dimensiones” se define la forma de la paleta DMT que se utilizará en la simulación y también el radio de la Cámara de Calibración (CC).

Luego de haber explicado la estructura de la tabla tipo se grafica en la Figura 5-13 la distribución de esfuerzos asociada al valor del esfuerzo promedio que se indica en la Tabla 5-4. Para este gráfico se considera el nivel de refinado de la malla y área de dominio indicados en la sección 5.3.5, y en éste se presentan dos curvas: una que utiliza directamente la información extraída de los resultados de Plaxis y otra curva suaviza la información utilizando un promedio móvil de grado 3

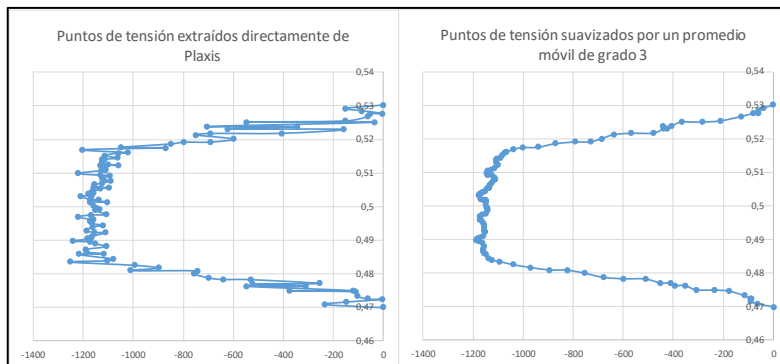


Figura 5-13: Comparación entre distribuciones de esfuerzos extraídas directamente de Plaxis y distribuciones suavizadas.

En la Figura 5-13 se aprecia como el promedio móvil de grado 3 elimina los valores extremos aislados, por lo tanto, se decide trabajar con estas curvas suavizadas.

5.3.6.1. Variación del contorno de la paleta

El contorno de la paleta del DMT es definido por elementos placas. Estos elementos placas poseen una rigidez axial y una rigidez a la flexión, estas dos propiedades determinan la magnitud del espesor del elemento placa, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{espesor} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (5-1)$$

Dónde:

E: Módulo de rigidez [kPa].

I: inercia del elemento placa [L⁴].

A: Área transversal del elemento placa [L²].

La variación del espesor del elemento placa que define el contorno de la paleta DMT modifica el valor del esfuerzo promedio de contacto normal asociado al cálculo de la lectura B, como se muestra en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Variación del espesor del contorno de la paleta DMT.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	Variable	Y peso [kN/m3]	17		Paleta DMT		Finno 1993
Membrana [mm]	0,2	Poisson	0,286		Radio CC [cm]		53
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz	1				
Parámetro Variable: Espesor de Contorno de la Paleta DMT[mm]							
Magnitud Parámetro	8,0	7,5	3,75	1	0,5	Sin Placa	
Esfuerzo Promedio	834,70	834,36	834,28	832,62	831,54	874,89	

Los espesores de los elementos placa fueron calculados considerando un módulo de rigidez igual al módulo del acero y un área transversal rectangular. Al revisar la Tabla 5-5 es posible notar que no existe una fuerte relación entre el espesor de la placa que define el contorno de la paleta del DMT y el esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B, sin embargo, al no existir elementos placa que definan el contorno de la paleta sí suben los valores del esfuerzo promedio, pero este caso sólo se dio como una situación extrema, ya que el contorno de la paleta debe ser definido por elementos placas. La Figura 5-14 muestra algunas curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores del espesor de los elementos placas que definen el contorno de la paleta.

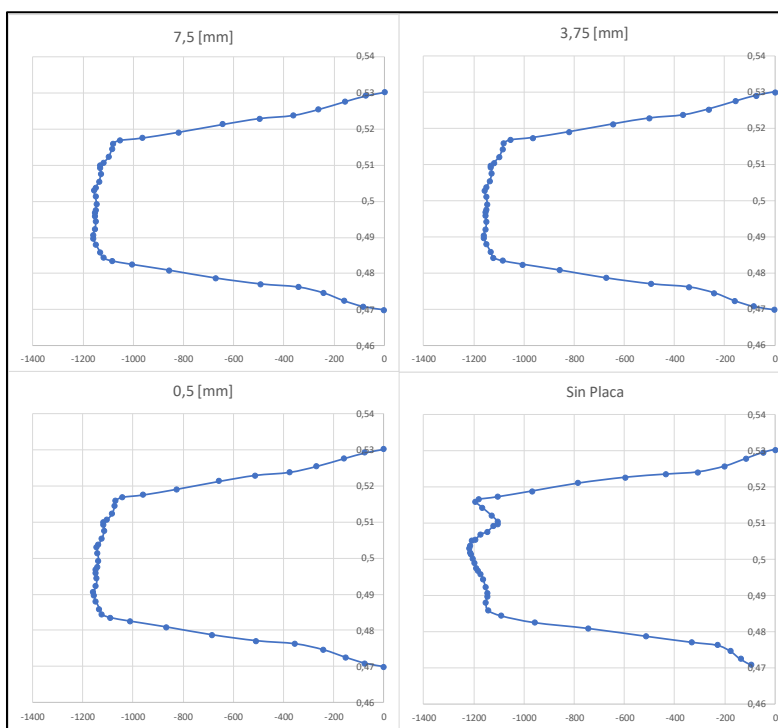


Figura 5-14: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores del espesor del contorno de la paleta DMT.

5.3.6.2. Variación del espesor de la membrana

La membrana de la paleta DMT es definida por elementos placas y también se considera el módulo de rigidez del acero en su definición. La variación del espesor de la membrana de la paleta DMT modifica el valor del esfuerzo promedio de contacto normal asociado al cálculo de la lectura B, como se muestra en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6: Variación del espesor de la membrana.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m3]		17	Paleta DMT		Finno 1993
Membrana [mm]	Variable	Poisson		0,286	Radio CC [cm]		53
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz		1			
Parámetro Variable: Espesor de la Membrana [mm]							
Magnitud Parámetro	20	2	0,2	0,02	0,002		
Esfuerzo Promedio	793,46	820,52	834,36	832,38	834,86		

Al revisar la Tabla 5-6 es posible notar que al aumentar el espesor de la membrana el valor del esfuerzo promedio de contacto normal disminuye y que al disminuir el espesor el valor del esfuerzo promedio aumenta. En la Figura 5-15 se presentan algunas curvas de distribución de esfuerzos asociadas a la Tabla 5-6. Al observar la Figura 5-15 es posible notar que para una membrana gruesa se tiene una curva más parabólica y para una membrana delgada se tiene una curva que posee aproximadamente forma de meseta.

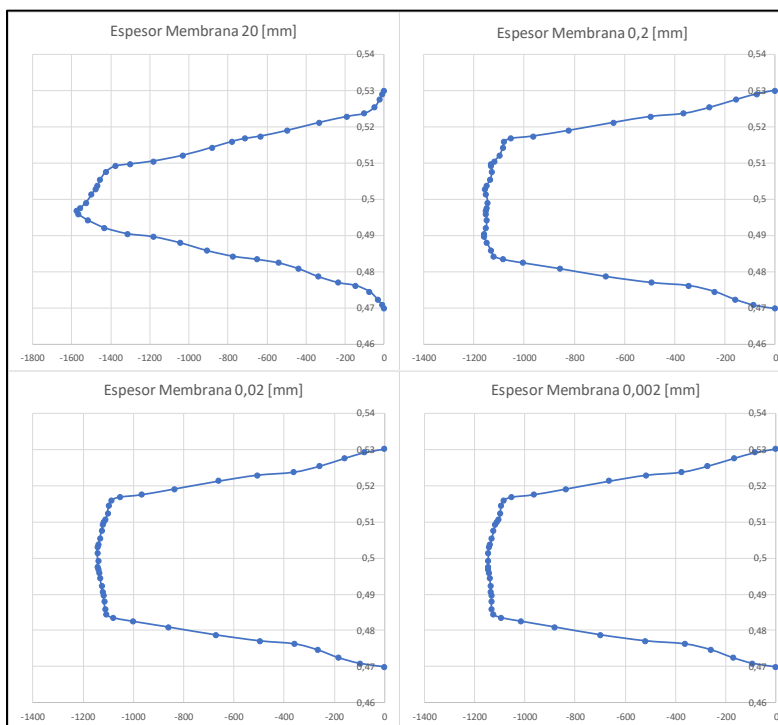
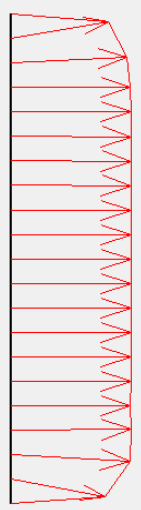
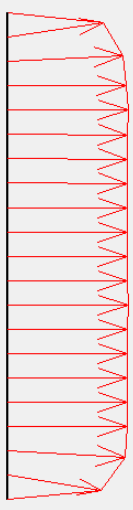
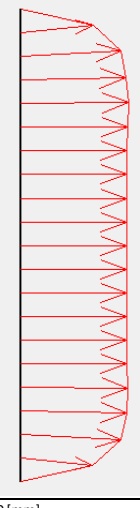
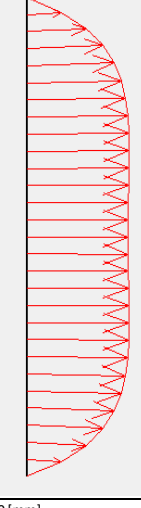
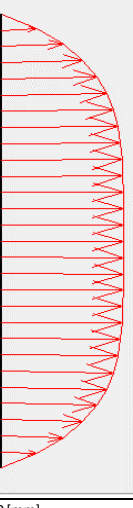
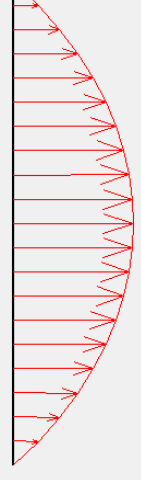


Figura 5-15: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos espesores de membrana considerados.

En la Tabla 5-7 se muestra la deflexión de la membrana cuando existe un desplazamiento en el centro de ésta de 3,85 [mm] para distintos espesores de membrana, considerando un refinamiento General Fino y un refinamiento de dominio, en el dominio que define el cuerpo de la paleta DMT. Al revisar la Tabla 5-7 es posible notar que existen espesores que no cumplen con la condición de máxima deflexión en el centro de la membrana (0,5 [m]). Espesores mayores a 15 [mm] sí cumplen esta condición, sin embargo, estos espesores son bastantes mayores a los que se utilizan en la realidad (0,2 a 0,25 [mm]), pero esta simulación busca reproducir la repuesta del suelo cuando es ejecutado un ensayo DMT, por lo tanto, es importante que la membrana seleccionada simule adecuadamente el modo de deflexión y el consecuente modo de deformación del suelo. Para una membrana con un espesor de 2000 [mm] no es posible alcanzar la deflexión de 3,85 [mm] cuando se impone la máxima deformación volumétrica posible en el dominio de la paleta DMT. Cabe destacar que estos espesores no significan una dimensión en el modelo geométrico, más bien corresponden a una relación entre la rigidez a la flexión y la rigidez axial. Esto se comprueba en el CAPÍTULO 6 en la sección 5.4.

Tabla 5-7: Deflexión de la membrana para distintos espesores de la membrana (amplificado).

Espesor 0,002 [mm]			Espesor 0,02 [mm]			Espesor 0,2 [mm]		
Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada
0,530	0,000		0,530	0,000		0,530	0,000	
0,527	3,118		0,527	3,116		0,527	3,095	
0,524	3,729		0,524	3,728		0,524	3,719	
0,521	3,826		0,521	3,825		0,521	3,812	
0,518	3,855		0,518	3,859		0,518	3,891	
0,518	3,855		0,518	3,859		0,518	3,891	
0,515	3,859		0,515	3,859		0,515	3,851	
0,512	3,854		0,512	3,855		0,512	3,862	
0,509	3,851		0,509	3,851		0,509	3,846	
0,506	3,852		0,506	3,853		0,506	3,869	
0,506	3,852		0,506	3,853		0,506	3,869	
0,503	3,851		0,503	3,851		0,503	3,850	
0,500	3,851		0,500	3,851		0,500	3,849	
0,497	3,851		0,497	3,851		0,497	3,847	
0,494	3,853		0,494	3,855		0,494	3,879	
0,494	3,853		0,494	3,855		0,494	3,879	
0,491	3,855		0,491	3,854		0,491	3,847	
0,488	3,857		0,488	3,858		0,488	3,865	
0,485	3,848		0,485	3,847		0,485	3,842	
0,482	3,838		0,482	3,840		0,482	3,856	
0,482	3,838		0,482	3,840		0,482	3,856	
0,479	3,849		0,479	3,849		0,479	3,843	
0,476	3,811		0,476	3,810		0,476	3,802	
0,473	3,035		0,473	3,033		0,473	3,012	
0,470	0,000		0,470	0,000		0,470	0,000	
Espesor 2 [mm]			Espesor 10 [mm]			Espesor 15 [mm]		
Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada
0,530	0,000		0,530	0,000		0,530	0,000	
0,527	2,622		0,527	1,719		0,527	1,484	
0,524	3,639		0,524	2,784		0,524	2,461	
0,521	3,799		0,521	3,393		0,521	3,082	
0,518	3,913		0,518	3,707		0,518	3,457	
0,518	3,913		0,518	3,707		0,518	3,457	
0,515	3,863		0,515	3,843		0,515	3,667	
0,512	3,855		0,512	3,886		0,512	3,775	
0,509	3,851		0,509	3,886		0,509	3,824	
0,506	3,849		0,506	3,873		0,506	3,842	
0,506	3,849		0,506	3,873		0,506	3,842	
0,503	3,848		0,503	3,861		0,503	3,847	
0,500	3,848		0,500	3,856		0,500	3,848	
0,497	3,848		0,497	3,861		0,497	3,847	
0,494	3,850		0,494	3,873		0,494	3,842	
0,494	3,850		0,494	3,873		0,494	3,842	
0,491	3,852		0,491	3,886		0,491	3,824	
0,488	3,856		0,488	3,886		0,488	3,775	
0,485	3,854		0,485	3,843		0,485	3,667	
0,482	3,884		0,482	3,706		0,482	3,456	
0,482	3,884		0,482	3,706		0,482	3,456	
0,479	3,833		0,479	3,394		0,479	3,083	
0,476	3,641		0,476	2,787		0,476	2,463	
0,473	2,598		0,473	1,718		0,473	1,484	
0,470	0,000		0,470	0,000		0,470	0,000	
Espesor 20 [mm]			Espesor 200 [mm]			Espesor 2000 [mm]		
Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada	Y [m]	Ux [mm]	Membrana Deflectada
0,530	0,000		0,530	0,000		0,530	0,000	
0,527	1,317		0,527	0,804		0,527	0,462	
0,524	2,228		0,524	1,493		0,524	0,874	
0,521	2,848		0,521	2,079		0,521	1,236	
0,518	3,257		0,518	2,570		0,518	1,548	
0,518	3,257		0,518	2,570		0,518	1,548	
0,515	3,518		0,515	2,973		0,515	1,812	
0,512	3,678		0,512	3,296		0,512	2,026	
0,509	3,771		0,509	3,541		0,509	2,193	
0,506	3,823		0,506	3,714		0,506	2,312	
0,506	3,823		0,506	3,714		0,506	2,312	
0,503	3,848		0,503	3,817		0,503	2,384	
0,500	3,855		0,500	3,851		0,500	2,407	
0,497	3,847		0,497	3,817		0,497	2,384	
0,494	3,823		0,494	3,714		0,494	2,312	
0,494	3,823		0,494	3,714		0,494	2,312	
0,491	3,771		0,491	3,541		0,491	2,193	
0,488	3,678		0,488	3,296		0,488	2,026	
0,485	3,518		0,485	2,973		0,485	1,812	
0,482	3,257		0,482	2,570		0,482	1,548	
0,482	3,257		0,482	2,570		0,482	1,548	
0,479	2,848		0,479	2,079		0,479	1,236	
0,476	2,229		0,476	1,493		0,476	0,874	
0,473	1,316		0,473	0,804		0,473	0,462	
0,470	0,000		0,470	0,000		0,470	0,000	

5.3.6.3. Variación de la rigidez

Al variar el valor de la rigidez del dominio que define el cuerpo de la paleta DMT, es posible cuantificar la influencia de este parámetro en el cálculo del valor promedio del esfuerzo de contacto normal asociado a la lectura B, esta variación se muestra en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8: Variación de la rigidez del dominio de la paleta DMT.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones				
Contorno [mm]	8	Y peso [kN/m3]		17	Paleta DMT Finno 1993				
Membrana [mm]	0,2	Poisson		0,286	Radio CC [cm] 53				
E [kPa]	Variable	R interfaz		1					
Parámetro Variable: Rigidez E [kPa]									
Magnitud Parámetro	2,1,E+14	2,1,E+10	2,1,E+08	2,1,E+06	2,10E+05	7,00E+04	2,1,E+04	2,1,E+02	2,1,E+00
Esfuerzo Promedio	833,4	832,8	834,7	833,2	813,7	818,2	814,6	681,3	15,2

Al observar la Tabla 5-8 es posible notar que para valores de E entre el valor nominal de la rigidez del acero ($2,1E+08$ [kPa]) y el valor de la rigidez de $2,1E+06$ [kPa] se obtienen esfuerzos levemente menores a los que se obtienen con el valor del acero. Para valores de E igual o menores al valor de la rigidez del dominio de la muestra de suelo ($7,00E+04$ [kPa]), existe una gran caída en el esfuerzo obtenido. Para valores de E entre el valor nominal de la rigidez del acero y el valor de E igual a $2,1E+14$ [kPa] se obtienen valores del esfuerzo promedio bastante similares a los que se obtienen con el E del acero, pero a medida que se considera un valor mayor aumenta el tiempo de cálculos. Para valores de E mayores que $2,1E+14$ [kPa] no es posible alcanzar la deflexión deseada cuando se impone la máxima deformación volumétrica posible ni cuando se utiliza la mayor cantidad posible de iteraciones y pasos de cálculos. En Figura 5-16 se encuentran los gráficos de las curvas de distribución de esfuerzo para todos los valores de E considerados.

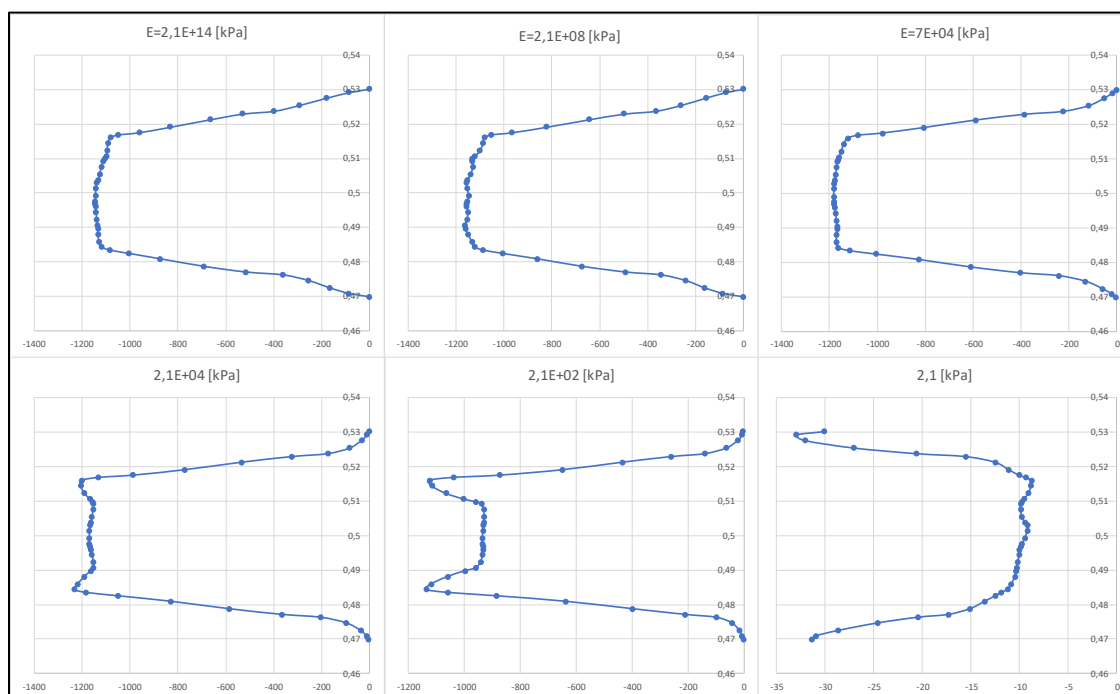


Figura 5-16: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de rigideces considerados.

Por otro lado, es necesario conocer la influencia de ciertos parámetros que definen los dominios de suelos, tales como: peso específico (γ_s), coeficiente de Poisson (ν) y resistencia de la interface (R_{inter}). Los rangos de variación de estos parámetros fueron definidos considerando lo dicho en la sección 5.2.1.

5.3.6.4. Variación del peso específico

La influencia en los resultados al variar la magnitud del peso específico es presentada en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9: Variación del peso específico.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m3]	Variable		Paleta DMT	Finno 1993	
Membrana [mm]	0,2	Poisson	0,286		Radio CC [cm]	53	
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz	1				
Parámetro Variable: Peso Específico Seco del Suelo [mm]							
Magnitud Parámetro	17,5	17	16,38	14,52			
Esfuerzo Promedio	839,69	834,70	825,38	819,50			

Al observar la Tabla 5-9 es posible notar que al aumentar el peso específico aumenta el valor del esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B. Al variar este valor dentro del rango de valores del peso específico para el suelo considerado, se puede afirmar que la precisión de este valor tiene una importancia medianamente significativa, debido a que sí cambia en cierto grado el valor del esfuerzo promedio. En la Figura 5-17 se presentan las curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de γ_d considerados.

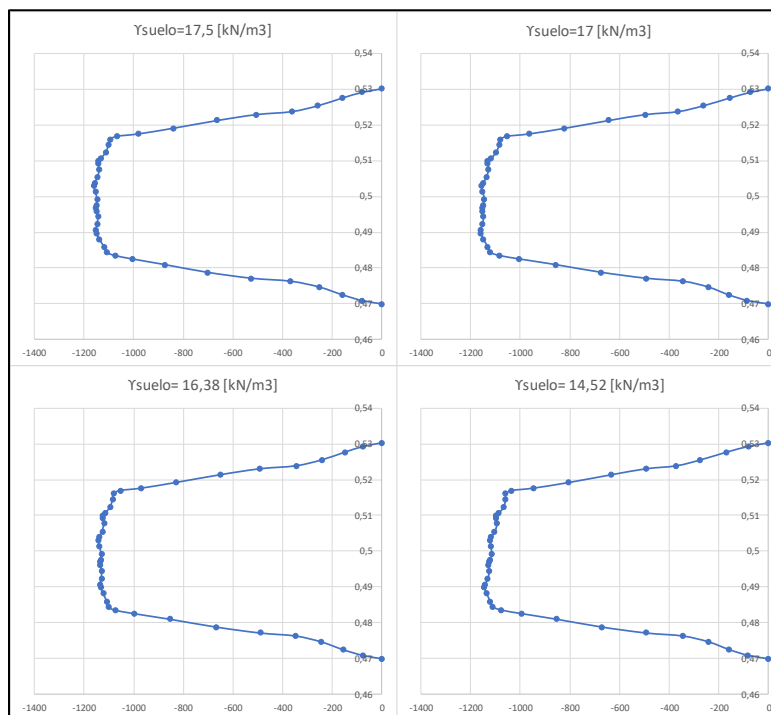


Figura 5-17: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de pesos específicos considerados.

5.3.6.5. Variación del coeficiente de Poisson

El valor del coeficiente de Poisson se varía para determinar la influencia de éste en el valor del esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B. En la Tabla 5-10 se presenta los valores de esfuerzos promedios de contacto normal para distintos valores de Poisson.

Tabla 5-10: Variación del coeficiente de Poisson.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m3]	17		Paleta DMT	Finno 1993	
Membrana [mm]	0,2	Poisson	Variable		Radio CC [cm]	53	
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz	1				
Parámetro Variable: Coeficiente de Poisson (v)							
Magnitud Parámetro	0,3	0,286	0,2				
Esfuerzo Promedio	823,50	834,70	823,50				

Al observar la Tabla 5-10 se puede notar que al aumentar el valor del coeficiente de Poisson aumenta el valor promedio del esfuerzo de contacto normal asociado a la lectura B, por lo tanto, es posible afirmar que este parámetro si influye en cierto grado en el valor del esfuerzo promedio obtenido. En la Figura 5-18 se puede observar las curvas distribución de esfuerzos de contacto normal para cada uno de los valores asumidos para el coeficiente de Poisson.

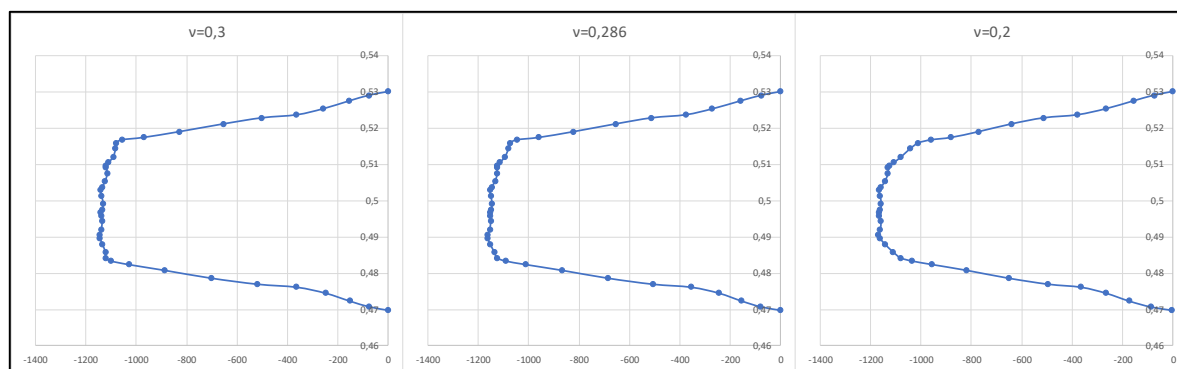


Figura 5-18: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos Coeficientes de Poisson.

5.3.6.6. Variación de la resistencia de la interfaz (R_{inter})

La variación del valor de la resistencia de la interfaz (R_{inter}) causa cambios en la magnitud del valor del esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B, como se aprecia en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11: Variación del valor de R_{inter} .

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m3]	17		Paleta DMT	Finno 1993	
Membrana [mm]	0,2	Poisson	0,286		Radio CC [cm]	53	
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz	Variable				
Parámetro Variable: Resistencia de la Interface							
Magnitud Parámetro	1	0,9	0,667	0,53			
Esfuerzo Promedio	834.36	826.19	826.19	825.31			

La variación del valor de R_{inter} no influye significativamente en el cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal, ya que no existe un cambio evidente. En la Figura 5-19 se puede observar las curvas de distribución de esfuerzos de contactos normal para cada uno de los valores asumidos para R_{inter} .

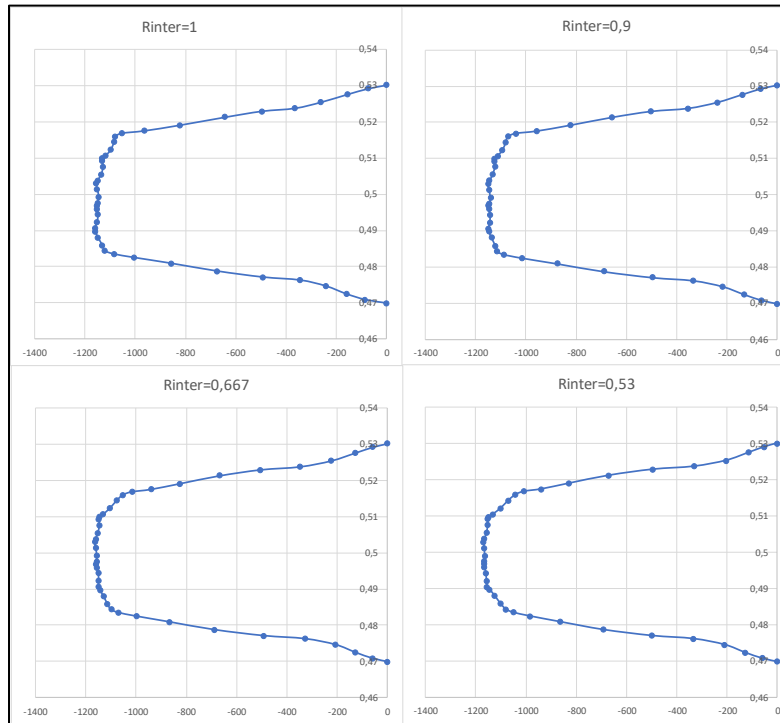


Figura 5-19: Curvas de distribución de esfuerzos para distintos valores de R_{inter} considerados

La variación de los esfuerzos promedios no sólo se debe a la magnitud seleccionada de los parámetros involucrados, sino que también afectan las dimensiones consideradas como, por ejemplo: la forma de la paleta utilizada y las dimensiones de la cámara de calibración.

5.3.6.7. Variación en las dimensiones de la paleta del DMT

Existen distintos tipos de paletas DMT, los cuales deben cumplir con lo exigido dentro de la norma ASTM Standard 6635-0. En esta memoria se utilizan dos tipos distintos de paleta: el primero es presentado en la Figura 2-2 y el segundo es la utilizada por Finno (1993) presentada en la Figura 5-20.

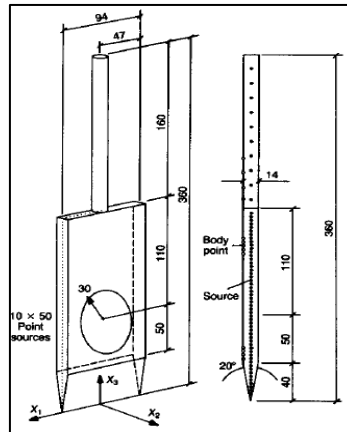


Figura 5-20: Definición de las dimensiones de la paleta (Finno, 1993).

Al considerar estas dos opciones de paletas DMT de dimensiones diferentes, existen cambios en los esfuerzos promedio de contacto normal asociado a la lectura B, cómo es posible apreciar en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12: Variación en el esfuerzo promedio al considerar distintos tipos de paletas DMT.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar		Dimensiones	
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m ³]	17	Paleta DMT	Variable
Membrana [mm]	0,2	Poisson	0,286	Radio CC [cm]	53
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz	1		
Parámetro Variable: Forma de la Paleta DMT					
Magnitud Parámetro	Finno 1993	ISSMGE			
Esfuerzo Promedio	834,36	853,64			

Los esfuerzos promedios de contacto normal calculados para la paleta presentada en el informe del ISSMGE TC-16 son mayores que los esfuerzos promedios que se obtienen para la paleta presentada por Finno (1993). En la Figura 5-21 se pueden apreciar las curvas de distribución de esfuerzo para cada uno de los tipos de paletas considerados.

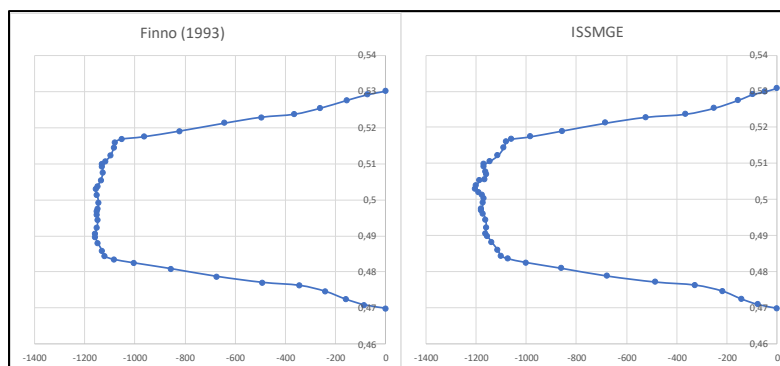


Figura 5-21: Curvas de distribución de esfuerzos para las dos formas de paletas consideradas.

5.3.6.8. Variación en el radio de la Cámara de Calibración

Asociado a la cámara de calibración (CC) existe el problema del efecto del tamaño (“size effects”). Este problema consiste en que los resultados de los ensayos de penetración ejecutados dentro de la CC se ven influenciados por las pequeñas dimensiones de la cámara, en comparación cuando estos ensayos son realizados en terreno en donde no existen condiciones de borde. Estos efectos de tamaño se pueden presentar experimentalmente como también en el modelado numérico. A continuación, en la Tabla 5-13 se presentan los efectos en los esfuerzos promedios de contacto normal asociado a la lectura B al variar el radio de la CC.

Tabla 5-13: Variación del radio de la cámara de calibración CC.

Paleta DMT		Dominio de Suelo por Ensayar			Dimensiones		
Contorno [mm]	7,5	Y peso [kN/m3]		17	Paleta DMT		Finno 1993
Membrana [mm]	0,2	Poisson		0,286	Radio CC [cm]		Variable
E [kPa]	2,10E+08	R interfaz		1			
Parámetro Variable: Radio de la Cámara de Calibración [cm]							
Magnitud Parámetro	26,5	53	100	150			
Esfuerzo Promedio	583,21	826,19	1013,98	846,34			

Al revisar la Tabla 5-13 es posible notar una gran influencia del valor del radio de la CC en los resultados obtenidos para los esfuerzos promedio de contacto normal asociados a la lectura B. En la Figura 5-22 se puede apreciar la gran influencia del radio de la cámara de calibración en el cálculo de esfuerzos promedios. La mayor curva de distribución de esfuerzo se obtiene para un radio de 100 [cm], por lo tanto, en esta simulación se trabaja con un rango de radios entre 53[cm] a 150 [cm], superior al radio real de la CC que corresponde a 26,5 [cm].

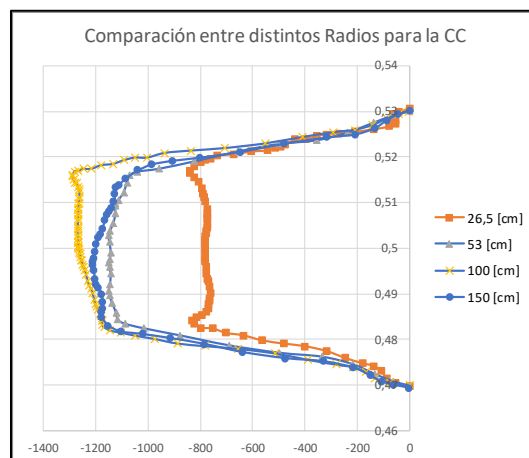


Figura 5-22: Comparación de curvas de distribución de esfuerzos a lo largo de la membrana para distintos radios de la CC y para dos casos de refinamiento.

5.4. Influencia de los componentes de la paleta en la lectura A

Una vez definidos los componentes del sistema DMT-CC asociados al método continuo propuesto, se analizan las respectivas distorsiones generadas en el suelo después de la fase de inserción de la paleta. Para esta tarea se impone un desplazamiento vertical hacia abajo de 5 [cm] y se define a la paleta del DMT de acuerdo con tres modos distintos, con el objetivo de conocer los efectos de la presencia de ciertos componentes en la generación de distorsiones del suelo. Estos modos de definir la paleta son: en primer lugar, todo el contorno de la paleta es definido por elementos placa de bordes, o sea, que no se asigna la componente membrana en su ubicación correspondiente; para la segunda opción, sí se asigna la componente membrana en su ubicación correspondiente en la paleta modelada, la cual posee un espesor de 200 [mm], esto significa una discontinuidad de espesores entre el espesor de la membrana (200 [mm]) y el espesor del contorno de la paleta [7,5 [mm]]; por último, al modo anterior se le agrega una interfaz a la placa que define la membrana, para modelar la interacción suelo-estructura.

Para realizar estos cálculos se considera un nivel refinado global fino en la malla de elementos finitos. Este nivel de refinado no es el que se escogido para encontrar los valores de esfuerzo promedio (ver sección 5.3.5), sin embargo, sí es útil para apreciar las distorsiones generadas en el suelo producto de la inserción de la cuchilla. A continuación, en las Figura 5-23, Figura 5-24 y Figura 5-25 se presentan los diagramas de desplazamiento horizontal (U_x) en las secciones transversales representativas para los tres modos distintos.

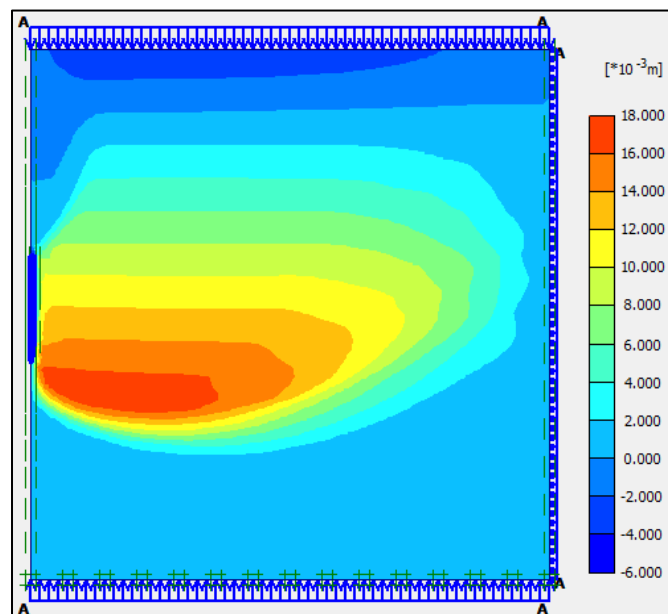


Figura 5-23: Campo U_x para una paleta definida sólo por elementos placa de borde (modo 1).

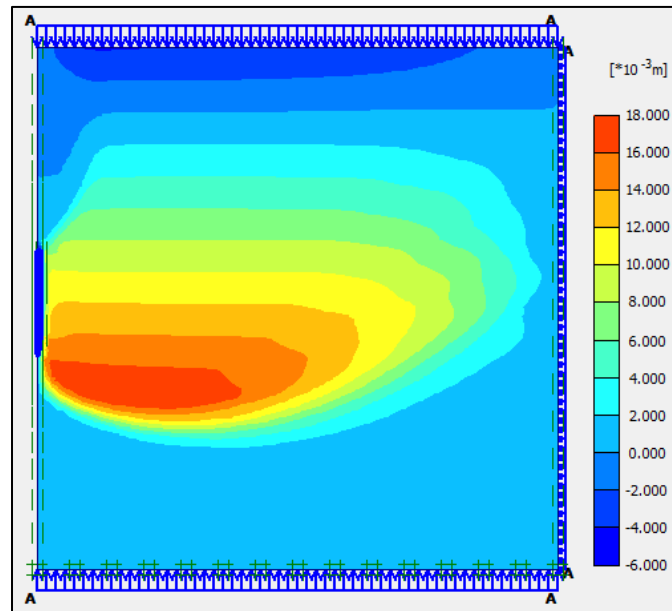


Figura 5-24: Campo U_x para una paleta definida por elementos placa de borde y membrana de 200 [mm] (modo 2).

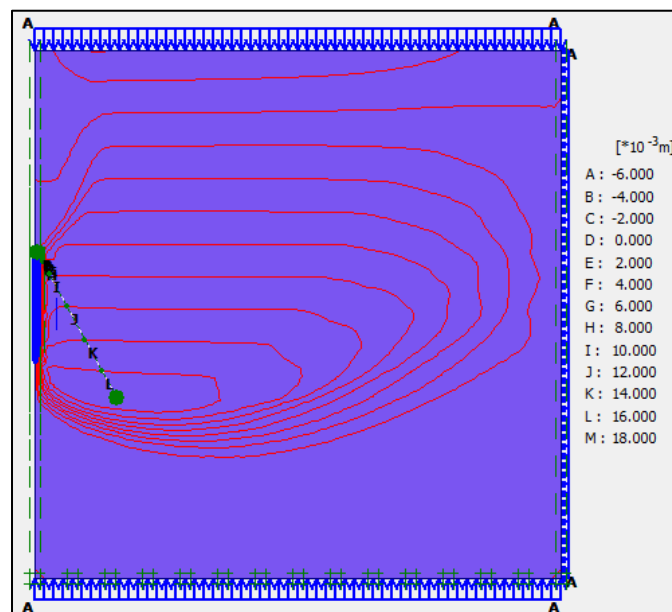


Figura 5-25: Campo U_x para una paleta definida por elementos placa de borde, membrana de 200 [mm] e interfaz suelo-estructura (modo 3).

Al revisar estas Figuras se puede apreciar que la presencia de los distintos componentes que fueron agregados en cada uno de los modos de cuchillas insertadas, no tienen gran relevancia en las distorsiones generadas, ya que la forma y magnitud de éstas permanecen casi invariables. Es decir, que la discontinuidad entre los espesores de elementos placa, asociados al contorno y a la membrana, no influyen en las distorsiones generadas después de la fase de inserción de la paleta DMT, por lo tanto, es posible afirmar que este espesor de los elementos placa no ocupa lugar o no corresponde a una dimensión dentro del modelo geométrico, sino que representa la relación entre la rigidez a la flexión y a la rigidez axial.

Debido a que para obtener la lectura A se inserta la cuchilla hasta el punto en que las trayectorias de tensión tienden a valores asintóticos, se debe insertar la cuchilla sólo 1 [cm] aproximadamente. Esto se logra apreciar en la Figura 5-26, que indica el desplazamiento vertical asociado a las trayectorias de tensiones asintóticas.

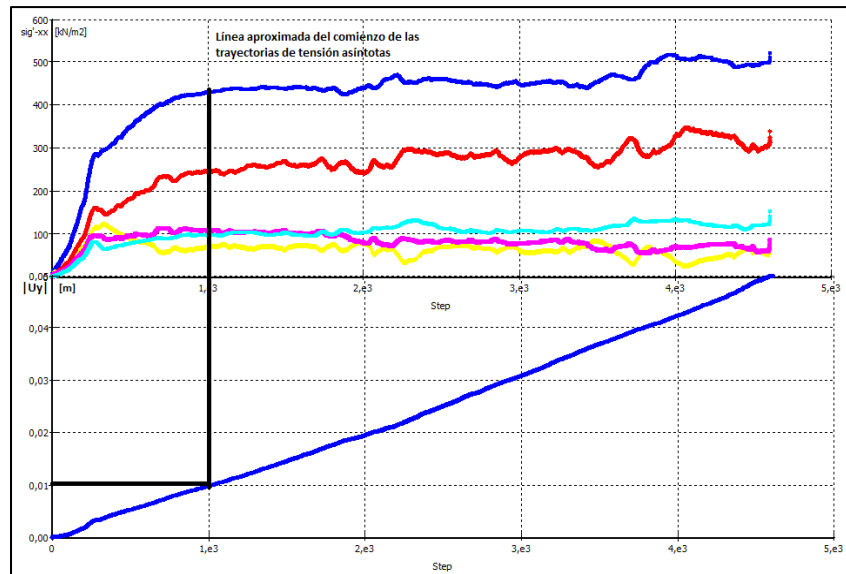


Figura 5-26: Curvas de esfuerzos y desplazamiento para la inserción de la paleta con membrana e interfaz.

Los desplazamientos horizontales obtenidos para la distancia vertical de inserción de 1 [cm] se presentan en la Figura 5-27, en donde se puede notar que las distorsiones poseen una forma similar, pero las magnitudes de éstas son menor.

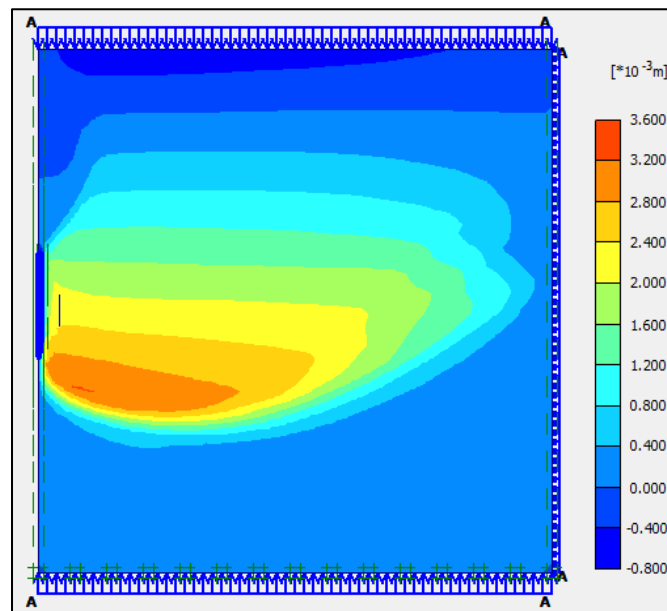


Figura 5-27: Campo U_x de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interfaz para una inserción vertical de 1 [cm].

También se realizó este mismo cálculo para la sección transversal representativa completa, es decir, sin considerar simetría, con el fin de poder ver cómo afecta este nuevo arreglo de los elementos finitos (triángulos de 15 nodos) en los resultados de las distorsiones. El campo de desplazamientos horizontales para el caso de la cuchilla con membrana e interfaz, cuando la cuchilla es insertada 1 [cm] se presenta en la Figura 5-28.

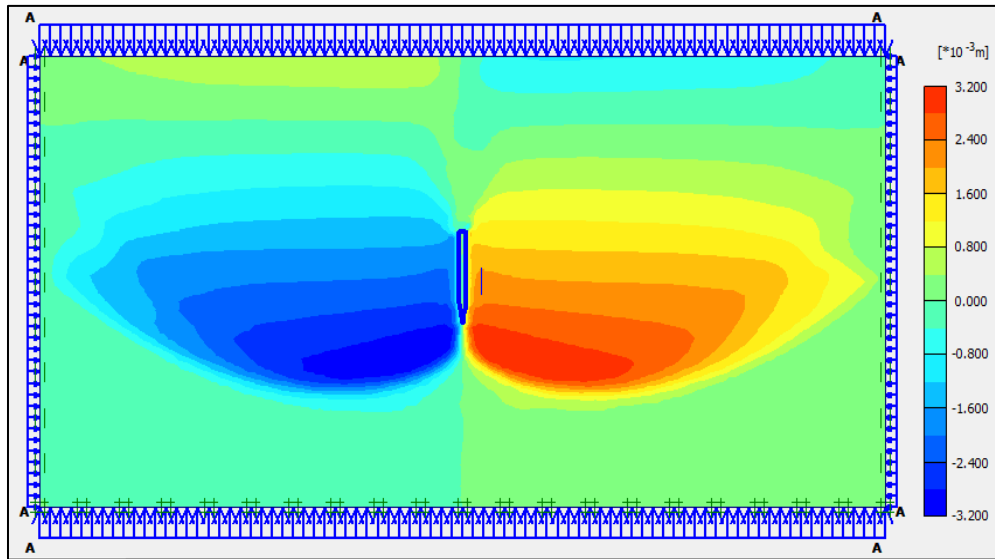


Figura 5-28: Campo U_x para la sección transversal completa.

Además, los gráficos para el campo de desplazamiento vertical (U_y) y para el campo de desplazamiento total (U) se presentan a continuación en las Figura 5-29 y Figura 5-30 respectivamente.

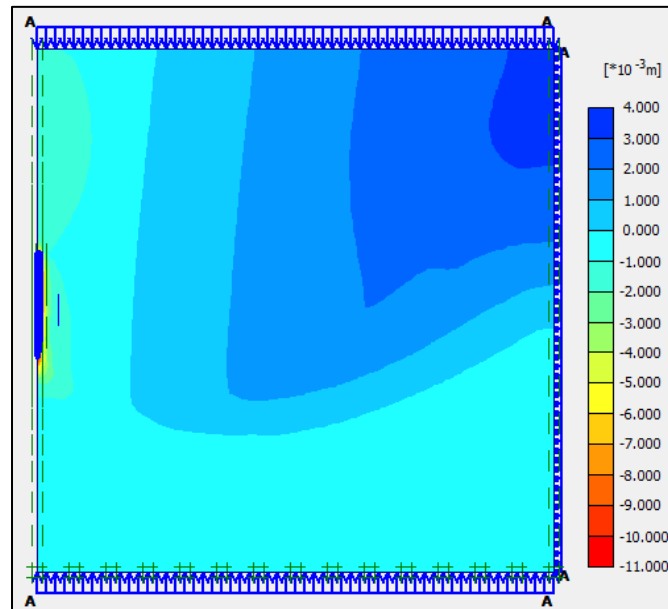


Figura 5-29: Campo U_y de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interfaz para una inserción vertical de 1 [cm].

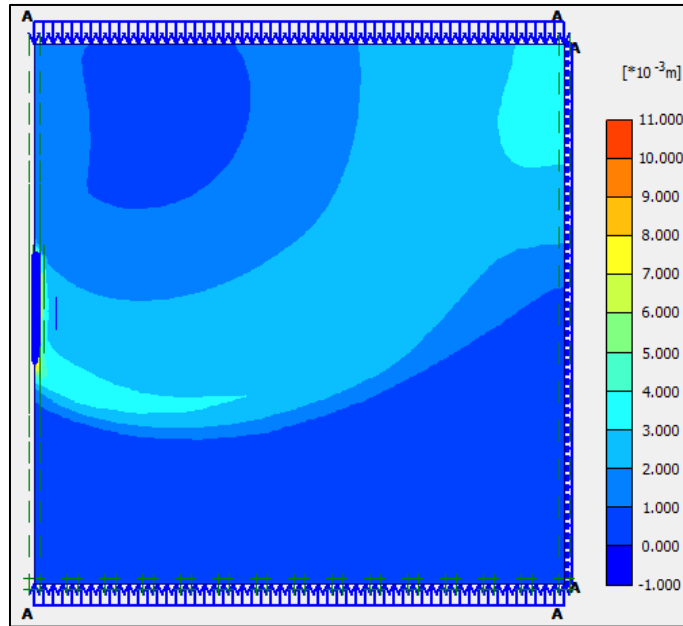


Figura 5-30: Campo U de la paleta definida por elementos placa de borde, membrana e interaz para una inserción vertical de 1 [cm].

5.5. Validación del modelo

Las mediciones en laboratorio del ensayo DMT dentro de la cámara de calibración y los valores de esfuerzos promedios obtenidos en la simulación hecha por Balachowski (2006) presentados en el CAPÍTULO 4 serán útiles para validar el modelo realizado en esta memoria.

La simulación de la ejecución del ensayo es abordada de dos maneras diferentes: una alternativa simula el procedimiento del ensayo de una manera continua, ya que considera en primer lugar la fase de inserción y luego la fase de expansión; la otra alternativa considera sólo la fase de expansión del ensayo. Ambas opciones permiten obtener las lecturas de presiones A y B, bajo ciertas condiciones y suposiciones dependiendo del tipo de simulación que se trate. El modelo constitutivo elegido para realizar los cálculos corresponde al de Mohr-Coulomb; además, se definen los valores para los componentes, presentados anteriormente, que influyen en los resultados del esfuerzo promedio de contacto normal. Para ejemplificar los valores adoptados y comparar los resultados de ambos métodos se utiliza el caso de estudio señalado en la sección 5.2.1.

5.5.1. Definición del modelo constitutivo

El modelo constitutivo elegido es el modelo de Mohr-Coulomb. Los parámetros necesarios para definir el modelo de Mohr-Coulomb son presentados en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14: Parámetros que definen el modelo de Mohr-Coulomb.

Parámetro	Unidad	Mohr-Coulomb Descripción	Ecuación/Recomendación
E	[Kpa]	Modulo de Young	Ensayo Triaxial CID
Poisson	--	Coficiente de Poisson	Tabla
c	[Kpa]	Cohesión	0,2
ϕ	[°]	Ángulo de fricción	Ensayo Triaxial CID
Ψ	[°]	Ángulo de dilatación	Ensayo Triaxial CID
Eincrement	[Kpa/m]	Incremento con la profundidad del Modulo de Young	No aplica
Cincrement	[Kpa/m]	Incremento con la profundidad de la Cohesión	No aplica
K _o	--	Coficiente de empuje lateral en reposo	Consolidación CC
ρ	[KN/m ³]	Peso específico	Arena relleno

Los parámetros de la Tabla 5-14 definen el modelo de Mohr-Coulomb, estos son obtenidos de la siguiente manera: E, ϕ y Ψ se obtienen a partir de la Tabla 4-5, que resume los resultados de los ensayos triaxiales CID realizados por Balachowski (2006) para muestras de arena homogénea sometidas a distintas presiones de confinamiento para dos tipos de densidades (baja y densa). Cabe destacar que el modelo de Mohr-Coulomb usa el módulo de Young como un módulo de rigidez, pero gracias a los ensayos CID se cuenta con el módulo de rigidez asociado a la pendiente de la recta entre el origen y el punto correspondiente al 50% de máxima resistencia (E_{50}), por lo tanto, estos dos módulos conceptualmente no son equivalentes, sin embargo, E_{50} es recomendado para sustituir al módulo de Young en este caso, ya que representa mejor que otras alternativas el comportamiento no lineal típico de los suelos normalmente consolidados (R. B. J. Brinkgreve, 2005), como por ejemplo E_0 . La cohesión se considera nula debido a que la arena utilizada corresponde a una arena limpia, pero Plaxis sugiere adoptar el valor 0,2 [kPa] para evitar problemas numéricos; el valor de K_0 viene dado de acuerdo al esfuerzo de consolidación al cual se sometió a la muestra en la CC; para los valores de peso específico (ρ) y del coeficiente de Poisson (ν) debido a que no se cuenta con la información para el caso de estudio propuesto, se utilizan recomendaciones y estudios realizados con suelo del mismo lugar de donde se extrajeron las muestras utilizadas en el trabajo de Balachowski (2006).

5.5.2. Valores adoptados

En la sección 5.3.6 se presenta la influencia de ciertos parámetros, cuyos valores son desconocidos, en la determinación del esfuerzo promedio de contacto normal. Estos parámetros deben ser definidos en los conjuntos de datos (“data sets”) asociados a los componentes de la simulación o en el modelo geométrico asociado a las dimensiones que se deben considerar, en cuanto a la paleta DMT y a la cámara de calibración (CC). A continuación, se presentan los valores adoptados para estos parámetros, no especificados, que cuya selección influyen en cierto grado los resultados de esfuerzo promedio de contacto normal obtenidos.

5.5.2.1. Conjunto de datos muestra densa a 50 [kPa]

Los valores adoptados para el conjunto de datos que define el dominio del suelo a ensayar, se visualizan en la Tabla 5-15, en donde se aprecia que el modelo constitutivo elegido corresponde al de Mohr-Coulomb; se define al material como tipo drenado (“Drained”) debido a que no existe aumento en la presión de poros al someter a la muestra a una carga; el valor del peso específico del suelo saturado (γ_{sat}) no tiene relevancia, ya que no existe la presencia de agua en el modelo.

Tabla 5-15: Definición del conjunto de datos de la muestra de arena densa confinada a 50 [kPa].

General		Parámetros			Interface	
Identificación	Muestra Densa 50 [kPa]	Modulo de Young	7,00E+04	[KN/m2]	R inter	0,9
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb	Poisson	0,286			
Tipo de Material	Drenado	Cohesión	0,2	[KN/m2]		
Peso específico	16,38	Ángulo de Fricción	42	[°]		
Peso específico saturado	--	Ángulo de Dilatancia	15	[°]		

Las muestras ensayadas son clasificadas de acuerdo con su densidad, en donde las muestras sueltas o de baja densidad poseen un índice de densidad igual a $I_D=0,4$ y las muestras densas poseen un $I_D=0,8$. En el trabajo de Bałachowski & Gotteland (2007) afirman que el peso específico mínimo es de $\gamma_{dmin}=14,52$ [kN/m³] y que el peso específico máximo es de $\gamma_{dmáx}=16,38$ [kN/m³]. Estas muestras que podrían ser preparadas de una manera similar, debido a que el autor y lugar de extracción de las muestras coinciden y poseen los mismos valores de $U=1,4$ y $d_{50} = 0,21$ [mm]. Por lo tanto, se consideran estos valores de peso específico para la muestra suelta y densa respectivamente.

Por otro lado, para esta simulación se utiliza el valor del coeficiente de Poisson (ν) que entrega la ecuación (5-2), recomendada en el manual de referencia de Plaxis cuando las tensiones iniciales son calculadas a partir de la aplicación de la carga gravitacional. Bajo estas condiciones se utiliza un modelo de suelo elastoplástico perfecto, tal como el modelo de Mohr-Coulomb, el valor final de K_0 depende en gran medida de los valores supuestos del coeficiente de Poisson. En el caso propuesto como ejemplo, muestra densa confinada a 50 [kPa], se tiene una relación esfuerzo horizontal/esfuerzo vertical de $K_0=0,4$ el cual tiene asociado un coeficiente de Poisson de 0,286.

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (5-2)$$

El valor del coeficiente de la resistencia de la interface R_{inter} elegido depende del valor del ángulo de fricción ϕ que define el dominio del suelo. Para la muestra que ejemplifica este procedimiento el suelo posee un $\phi=42[^\circ]$, lo cual implica el uso de un coeficiente $R_{inter}=0,9$. El manual de referencia de Plaxis sugiere adoptar un valor de 2/3 cuando no existe información relacionada.

5.5.2.2. Conjunto de datos dominio paleta DMT

Los valores adoptados para el conjunto de datos que define el dominio de la paleta del DMT, se visualizan en la Tabla 5-16, en donde se aprecia que el modelo constitutivo elegido corresponde a uno Lineal Elástico; se define al material como tipo no- poroso (“Non-porous”), debido a que se considera este dominio como un material sólido que no posee poros, por lo tanto, no existe un aumento en la presión de poros al someter a este dominio a una carga; el valor del peso específico (γ_{unsat}), como también el valor de su rigidez (E_{ref}) y el valor del coeficiente de Poisson (ν)

corresponden a los valores relacionados con las propiedades del acero inoxidable. Por último, el valor del coeficiente R_{inter} corresponde a $R_{inter}=1$, debido a que el dominio de la paleta no interactúa con el dominio de suelo a ensayar.

Tabla 5-16: Definición del conjunto de datos que definen el dominio de la paleta DMT.

General		Parámetros		Interface	
Identificación	DMT real	Modulo de Young	2,10E+08 [KN/m ²]	R inter	1
Modelo Constitutivo	Lineal Elastico	Poisson	0,15		
Tipo de Material	No-Poroso				
Peso específico	76,93				
			[KN/m ³]		
Peso específico saturado	--				
			[KN/m ³]		

5.5.2.3. Conjunto de datos contorno de la paleta

El contorno de la cuchilla se dibuja utilizando elementos placas y su conjunto de datos depende de la rigidez axial y rigidez a la flexión, como se señaló anteriormente en la sección 5.3.6. Los conjuntos de datos dependen, además, del tipo de simulación que se trate. Para la simulación que considera sólo la expansión de la membrana, se asignan restricciones al movimiento horizontal y vertical en los elementos placa del contorno de la paleta DMT, evitando que la cuchilla se expanda al momento de aplicar la deformación volumétrica, de este modo, se permite exclusivamente una libre expansión en la membrana. En este caso, para definir el dominio de estos elementos placa, las magnitudes de la rigidez axial y de la rigidez a la flexión no son relevantes, es por ello, que para definir este dominio se considera la rigidez del acero y una sección transversal rectangular, que posee una altura igual al espesor del elemento placa y un largo de 1 [m] (distancia perpendicular al plano de análisis, que se utiliza en los modelos de deformaciones planas), entonces solo resta por definir el espesor del elemento placa, sin embargo, debido a la poca influencia del espesor de los elementos placa del contorno de la paleta en el cálculo del esfuerzo promedio asociado a la lectura B (sección 5.3.6), se optó por utilizar un espesor de 7,5 [mm], ya que la mitad del valor del espesor total de la paleta de acuerdo a la norma ASTM Standard 6635-0 se encuentra entre 7 a 7,5 [mm].

Por otro lado, para el caso de la simulación que considera ambas fases del procedimiento del ensayo DMT, sólo se asignan restricciones de desplazamiento horizontal a los elementos placa que definen el contorno de la paleta DMT, permitiendo el desplazamiento vertical de la paleta, ya que ésta debe desplazarse verticalmente hacia abajo una distancia impuesta, pudiendo provocar deformaciones axiales a la paleta del modelo y además la paleta se puede expandir verticalmente luego de aplicar la deformación volumétrica en el dominio del cuerpo de la paleta DMT, por lo tanto, para evitar estas deformaciones verticales no deseadas, es necesario definir los elementos placas que dibujan el contorno de la paleta DMT con valores altos para la rigidez axial y para la rigidez a la flexión.

A continuación, en la Tabla 5-17 se presentan los valores adoptados en los conjuntos de datos para definir los elementos placas que dibujan el contorno de la paleta en ambas alternativas propuestas en esta memoria: a) método estacionario que considera sólo la fase de expansión y b) método continuo que considera ambas fases del procedimiento del ensayo. La rigidez asumida en ambas alternativas corresponde a la rigidez del acero de 2,1E+08 [kPa].

Tabla 5-17: Definición del conjunto de datos que define los contornos de la paleta para : a) caso estacionario y b) caso continuo.

a) Método estacionario			b) Método continuo		
Identificación	Borde		Identificación	Borde	
Tipo del Material	Elástico		Tipo del Material	Elástico	
EA	1,58E+06	[KN/m]	EA	2,13E+15	[KN/m]
EI	7,838	[KNm2/m]	EI	1,00E+10	[KNm2/m]
Espesor	7,50E-03	[m]	Espesor	7,50E-03	[m]

5.5.2.4. Conjunto de datos membrana

La membrana se dibuja utilizando elementos placas y su conjunto de datos depende principalmente del espesor que se le asignará, la rigidez adoptada corresponde a la rigidez del acero, y el área e inercia se calculan considerando una sección rectangular de largo de 1[m] y alto igual al espesor. Para deformar correctamente la membrana se utiliza espesor de 200 [mm], el cual es un valor considerablemente mayor a los espesores que se utilizan en realidad de 0,2 a 0,25 [mm]. La Tabla 5-18 muestra el conjunto de datos que definen los elementos placa que se asignan a la membrana.

Tabla 5-18: Definición del conjunto de datos para la membrana de 15 [mm] de espesor.

Membrana		
Identificación	Membrana-200[mm]	
Tipo del Material	Elástico	
EA	4,20E+07	[KN/m]
EI	1,40E+05	[KNm2/m]
Espesor	0,2	[m]

5.5.3. Dimensiones consideradas

Las dimensiones asociadas a la paleta DMT y a la cámara de calibración también tienen efectos sobre los resultados, en este trabajo se optó por la paleta utilizada por Finno (1993) y se eligió el mismo radio para la cámara de calibración utilizado por Balachowski (2006) en su modelo del ensayo, el cual corresponde a 100 [cm].

5.5.4. Resultados

5.5.4.1. Muestra densa a 50 [kPa]

Todas estas incógnitas fueron elegidas pensando en los valores adoptados en la simulación de referencia (sección 4.2), con el fin de poder comparar los resultados obtenidos de esa simulación y los resultados obtenidos de los ensayos DMT ejecutados dentro de la CC con los resultados obtenidos de la simulación presentada en esta memoria. Para el caso de la muestra de arena densa sometida a una presión de confinamiento de 50 [kPa] se tienen los siguientes resultados presentados en la Tabla 5-19 cuando se utiliza el método continuo propuesto:

Tabla 5-19: Resultados para la muestra densa sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa].

Lectura	DMT dentro CC		Simulación Balachowski		Resultados obtenidos	
	A	B	A	B	A	B
Promedio [kPa]	92	670	85	831	87,19	935,13

5.5.4.2. Muestra suelta a 50 [kPa]

Para el caso de la muestra de arena suelta o poco densa, sólo el dominio del suelo utilizado debe ser redefinido, ya que las propiedades geotécnicas son diferentes. Este dominio de suelo se define como se presenta en la Tabla 5-20.

Tabla 5-20: Definición del conjunto de datos de la muestra de arena suelta confinada a 50 [kPa].

General		Parámetros			Interface	
Identificación	Muestra Suelta 50 [kPa]	Modulo de Young	4,00E+04	[KN/m ²]	R inter	0,667
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb	Poisson	0,286			
Tipo de Material	Drenado	Cohesión	0,2	[KN/m ²]		
Peso específico	14,52	Ángulo de Fricción	35	[°]		
Peso específico saturado	--	Ángulo de Dilatancia	5	[°]		

Los resultados para esta muestra de suelo sometida a una presión de confinamiento de 50 [kPa] son presentados en la Tabla 5-21 cuando se utiliza el método continuo propuesto:

Tabla 5-21: Resultados para la muestra suelta sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa].

	DMT dentro CC		Simulación Balachowski		Resultados obtenidos	
Lectura	A	B	A	B	A	B
Promedio [kPa]	62	520	45	427	39,92	465,15

Análogamente a la Tabla 5-3 en la Tabla 5-22 se muestra la influencia del grado de refinamiento, variando el radio de la CC y la coordenada X que define el área de dominio considerada en el cálculo del esfuerzo promedio de contacto normal asociado a la lectura B para una muestra de arena suelta o poco densa confinada a 50 [kPa]

Tabla 5-22: : Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y áreas de dominio para una muestra suelta confinada a 50 [kPa].

Grado de Refinado	GC=Fine; RC=0; RL=0		GC=Fine; RC=1; RL=0		GC=Fine; RC=1; RL=1		GC=Fine; RC=1; RL=2	
Radio CC	A	B	A	B	A	B	A	B
26,5 cm	21,99	359,17	22,24	352,53	21,05	340,64	19,61	379,48
53 cm	26,04	481,91	24,45	472,60	24,29	484,06	23,99	499,65
100 cm	No aplica		38,76	438,36	39,92	465,15	35,41	503,76
150 cm	No aplica		39,29	459,77	32,25	466,93	36,73	447,42

5.5.4.3. Muestras sometidas a 100 [kPa]

Se cuenta con las mediciones de lecturas A y B tomadas dentro de una CC para ambos tipos de muestras (suelta y densa) en distintas profundidades de ensayo y sometidas a un esfuerzo de confinamiento de 100 [kPa]. Estos valores son presentados en la Tabla 4-3.

En la Tabla 4-5 sólo se encuentra disponible la información geotécnica para la muestra suelta a esta presión de confinamiento. En la Tabla 5-23 se presenta el conjunto de datos que define el dominio de suelo que representa la muestra suelta a 100 [kPa]

Tabla 5-23: Definición del dominio de suelo para una muestra suelta confinada a 100 [kPa].

General			Parámetros			Interface	
Identificación	Muestra Suelta 50 [kPa]		Modulo de Young	4,00E+04	[KN/m2]	R inter	0,667
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb		Poisson	0,286			
Tipo de Material	Drenado		Cohesión	0,2	[KN/m2]		
Peso específico	14,52	[KN/m3]	Ángulo de Fricción	35	[°]		
Peso específico saturado	--	[KN/m3]	Ángulo de Dilatancia	5	[°]		

Los resultados obtenidos por medio del método continuo para las distintas profundidades de ensayos son comparados con las lecturas de presiones obtenidas dentro de la CC en laboratorio, las cuales se encuentran en la Tabla 5-24, donde se puede apreciar una buena correspondencia entre los valores obtenidos en la simulación con aquellos medidos en laboratorio.

Tabla 5-24: Comparación de los resultados obtenidos en laboratorio con los obtenidos en la simulación.

Profundidad [m]	Laboratorio		Simulación	
	A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
0,25	50,47	609,99	38,93	471,85
0,3	35,45	480,79	40,80	484,78
0,35	38,54	500,88	43,15	498,06
0,4	42,63	500,89	42,46	525,18
0,45	50,42	530,35	45,37	532,83
0,5	55,26	520,02	47,61	573,28
0,55	61,85	519,86	47,53	557,97
0,6	66,23	515,75	47,47	591,40
0,65	72,25	534,69	48,36	596,03
0,7	74,50	530,42	47,25	606,70
0,75	65,90	500,66	49,67	637,21
0,8	55,27	519,78	47,72	616,72
Promedio	55,73	514,01	45,53	565,47

Estos resultados se pueden observar en la Figura 5-31, donde se muestran los resultados para las lecturas A y B obtenidas en laboratorio o en la simulación para la muestra suelta confinada a 100 [kPa].

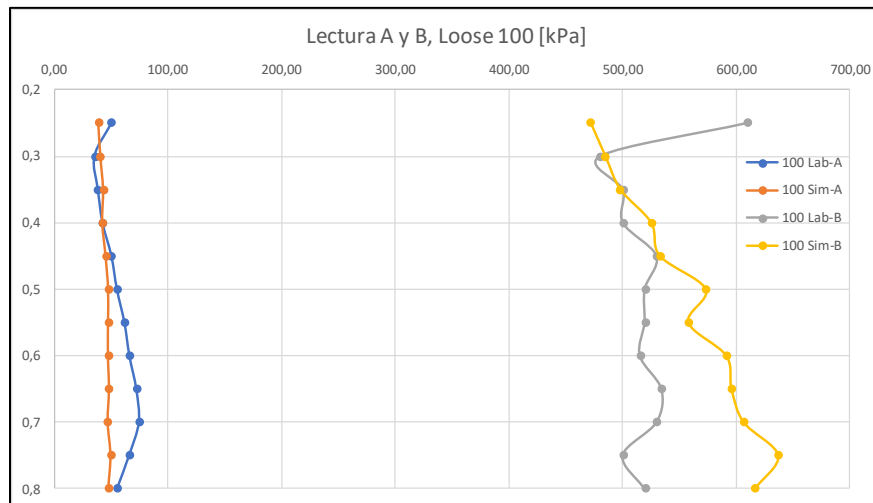


Figura 5-31: Lecturas A y B para una muestra suelta a 100 [kPa] obtenidas en laboratorio o simulación.

Para el caso de la muestra densa se estimaron los parámetros de resistencia y rigidez mediante las líneas de tendencia presentadas en las Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5, las cuales

tratan sobre la rigidez, ángulo de fricción y ángulo de dilatancia, respectivamente, con respecto a la presión de confinamiento. Estos valores corresponden a: módulo de rigidez de 80,96 [MPa], ángulo de fricción de 40,23 [°] y ángulo de dilatancia de 13,51 [°]. Al realizar ensayos simulados empleando el método continuo para todas las profundidades se tiene un promedio para la lectura A de 67,5 [kPa] y para la lectura B de 1115 [kPa], que al ser comparadas con los promedios de lecturas obtenidas de la Tabla 5-24, se tiene que A es 95,86 [kPa] y B es 684 [kPa], obtenidos dentro de la CC en laboratorio, por lo tanto, se puede afirmar que las líneas de tendencias no entregan buenas estimaciones de la información geotécnica y que errores en los valores que definen el dominio del suelo, significan resultados bastante alejados de la realidad, por esta razón, se realiza una análisis de sensibilidad para destacar la importancia en la precisión de los valores de los parámetros de rigidez y resistencia que definen el dominio de suelo.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez validados los resultados de la simulación por medio de la comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio, en conjunto con los resultados de la simulación de Balachowski con los resultados obtenidos de la simulación presentada en esta memoria, se analizan los resultados para conocer en mayor detalle su naturaleza.

6.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza variando el ángulo de fricción, el ángulo de dilatación y la rigidez. Estos resultados se compararán con los análisis de sensibilidad presentados en las Tabla 4-6 y Tabla 4-7 para el caso de una presión de confinamiento de 50 [kPa], considerando los dos tipos de muestras utilizados. A continuación, en las Tabla 6-1 y Tabla 6-2 se presentan los resultados de los esfuerzos promedios, al variar los parámetros ϕ y E que conforman los dominios de suelos que definen las muestras utilizadas en el ensayo DMT dentro de la CC.

Tabla 6-1: Analisis de sensibilidad para muestra densa confinada a 50 [kPa].

E [MPa]	ϕ [°]	Simulación Balachowski		Resultados obtenidos	
		A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
40	42	65	679	100,5	735,3
70	38	42	558	70,8	811,1
	40	44	608	80,2	874,0
	42	85	831	87,2	935,1
100	42	101	858	82,5	1052,9

Tabla 6-2: Analisis de sensibilidad para muestra suelta confinada a 50 [kPa].

E [MPa]	ϕ [°]	Simulación Balachowski		Resultados obtenidos	
		A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
30	35	41	402	39,3	409,3
40	35	45	427	39,9	465,1
	38	50	518	44,4	506,5
70	35	43	475	42,4	531,3

Las filas destacadas en las tablas anteriores corresponden a los parámetros obtenidos mediante el ensayo triaxial CID para esa presión de confinamiento. En las Figura 6-1 y Figura 6-2 se grafican las lecturas de presiones A y B obtenidas en la simulación de Balachowski y las asociadas al modelo numérico elaborado en esta memoria para los dos tipos de muestras, suelta y densa, confinadas a 50 [kPa], manteniendo constante en primer lugar la rigidez de la muestra y luego fijando el ángulo de fricción, con el fin de poder de comparar ambos modelos numéricos, como se muestra a continuación:

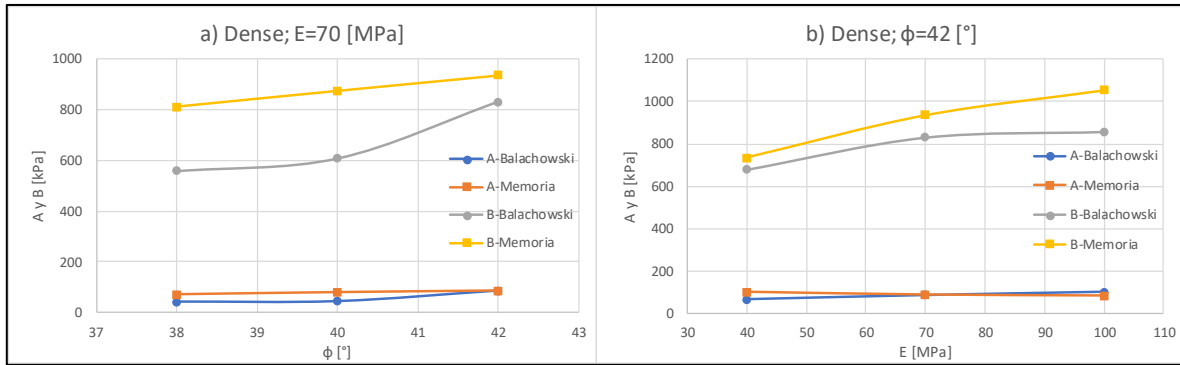


Figura 6-1: Comparación entre el modelo de Balachowski y el realizado en esta memoria, para la muestra Densa a 50 [kPa] para el caso a) Rigidez constante y b) Ángulo de Fricción constante.

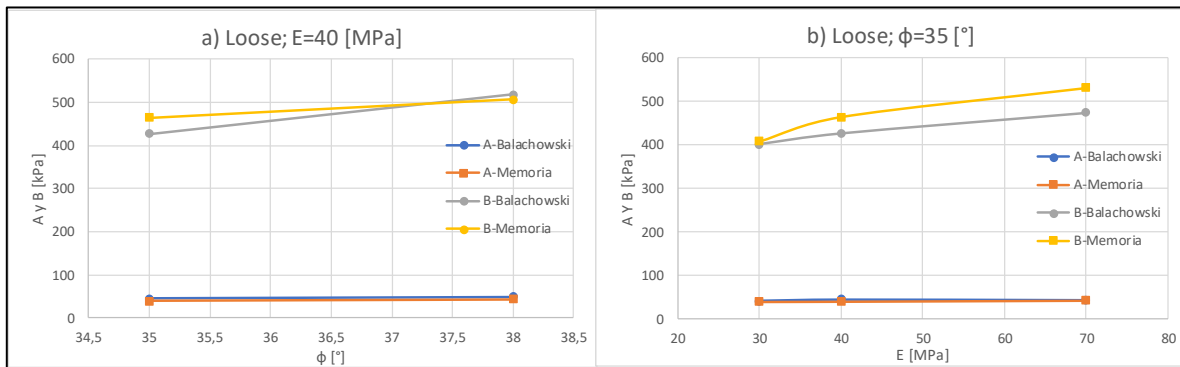


Figura 6-2: Comparación entre el modelo de Balachowski y el realizado en esta memoria, para la muestra Suelta a 50 [kPa] para el caso a) Rigidez constante y b) Ángulo de Fricción constante.

Además, se realiza una variación porcentual en los parámetros E , ϕ y Ψ con respecto a los valores obtenidos mediante el ensayo triaxial CID para cada uno de ellos por separado, es decir, sólo se varía un parámetro y los demás se mantienen constantes de acuerdo con el ensayo CID. Estas variaciones porcentuales son de $\pm [1-2,5-5]\%$ y se realizan sobre las mismas muestras utilizadas anteriormente. Los resultados son presentados en las Tabla 6-3 y Tabla 6-4 para la muestra densa y suelta respectivamente, donde se puede apreciar la influencia de cada uno de estos parámetros en los resultados.

Tabla 6-3: Variación porcentual de E , ϕ y Ψ para la muestra densa confinada a 50 [kPa].

Muestra Densa		E_{50} [MPa]			ϕ [°]			Ψ [°]		
		E_{50}	A [kPa]	B [kPa]	ϕ	A [kPa]	B [kPa]	Ψ	A [kPa]	B [kPa]
Variación Porcentual	+5%	73,5	-88,70	-947,03	44,10	-95,30	-1004,07	15,75	-95,74	-947,58
	+2,5%	71,75	-92,41	-940,25	43,05	-97,74	-966,42	15,38	-89,25	-937,37
	+1%	70,7	-86,26	-939,08	42,42	-92,07	-941,70	15,15	-94,68	-936,67
	CID	70	87,2	935,1	42	87,2	935,1	15	87,2	935,1
	-1%	69,3	-99,37	-933,24	41,58	-88,14	-919,98	14,85	-96,90	-931,41
	-2,5%	68,25	-97,56	-921,10	40,95	-85,38	-900,85	14,63	-90,52	-931,94
	-5%	66,5	-90,19	-905,49	39,90	-85,38	-900,85	14,25	-91,95	-924,95

Tabla 6-4: Variación porcentual de E, ϕ y Ψ para la muestra suelta confinada a 50 [kPa].

Muestra Suelta		E50 [MPa]			ϕ [°]			Ψ [°]		
		E50	A [kPa]	B [kPa]	ϕ	A [kPa]	B [kPa]	Ψ	A [kPa]	B [kPa]
Variación Porcentual	+5%	42	-35,96	-473,47	36,75	-31,21	-487,01	5,25	-39,55	-470,65
	+2,5%	41	-35,24	-469,17	35,88	-32,67	-475,83	5,13	-36,91	-465,88
	+1%	40,4	-39,72	-469,76	35,35	-38,41	-470,18	5,05	-40,50	-467,76
	CID	40	39,90	465,10	35	39,90	465,10	5	39,90	465,10
	-1%	39,6	-39,72	-464,49	34,65	-39,35	-461,09	4,95	-38,47	-465,28
	-2,5%	39	-42,18	-461,98	34,13	-32,81	-450,18	4,88	-38,52	-465,28
	-5%	38	-40,49	-456,01	33,25	-33,81	-440,41	4,75	-37,05	-461,55

Para facilitar la comprensión de los resultados provenientes de este análisis de sensibilidad porcentual se presentan las Figura 6-3Figura 6-4figuras tanto, que muestran la tendencia de cada parámetro al ser variado en ambas muestras estudiadas a 50 [kPa]. Separando los resultados de las lecturas A y B para una mejor visualización de la tendencia asociadas a estas variaciones.

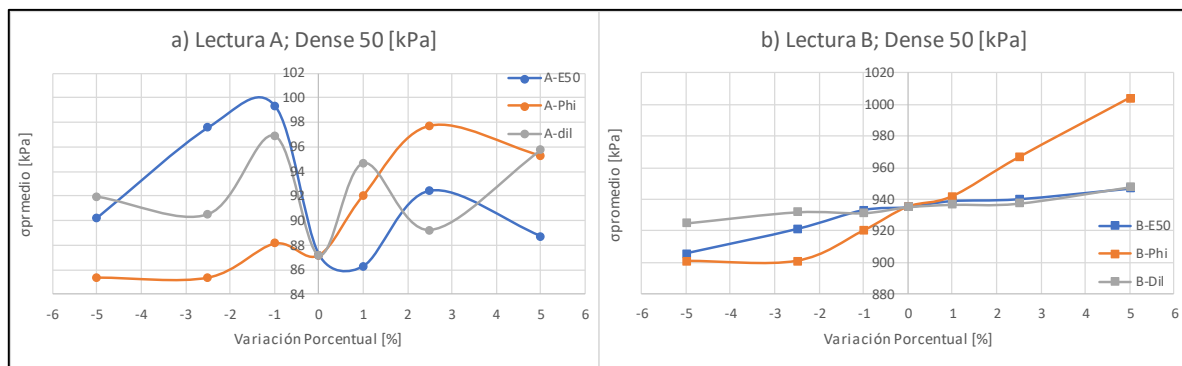


Figura 6-3: Análisis de sensibilidad porcentual para la muestra Densa, donde a) Lectura A y b) Lectura B.

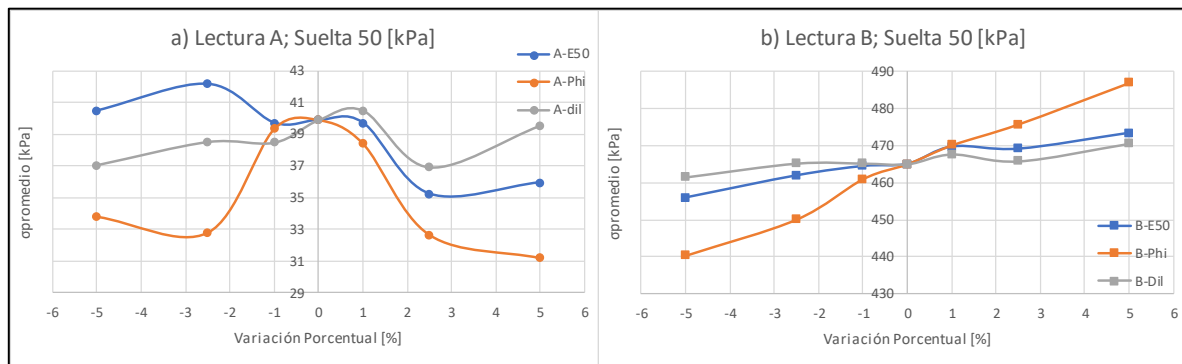


Figura 6-4: Análisis de sensibilidad porcentual para la muestra Suelta, donde a) Lectura A y b) Lectura B.

6.2. Método Estacionario

También se presentan los resultados para el método estacionario propuesto anteriormente, que sólo considera la fase de expansión. Para obtener la lectura A mediante este método es necesario saber que físicamente, ésta ocurre cuando el centro de la membrana se encuentra sobre la antena del sensor (Anexos B), la cual significa una elevación del centro de 0,05 [mm]; y considerando lo asumido anteriormente sobre un correcto modelado de la expansión de la membrana circular, se debe aumentar en 3,5 veces la deflexión en el centro de la membrana cuando se realizan cálculos utilizando el modelo tipo de deformaciones planas. Esta distancia vertical amplificada del centro de la membrana

asociada a la lectura A, corresponde en este caso a 0,175 [mm]. Este método estacionario se aplica en todos los tipos de muestras que se tiene información para ensayos efectuados a una profundidad de 0,5 [m]. A continuación, en la Tabla 6-5 se presentan estos resultados y se comparan con los obtenidos en laboratorio (DMT dentro de la CC), con los resultados de la simulación hecha por Balachowski (2006) y con los resultados obtenidos en la simulación continua propuesta en esta memoria.

Tabla 6-5: Comparación de resultados para el método estacionario.

Muestra	Dense 50 [kPa]		Loose 50 [kPa]		Loose 100 [kPa]	
	A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]	A [kPa]	B [kPa]
Método estacionario	106,39	777,04	74,30	360,08	112,51	505,76
Método continuo	87,2	935,1	39,9	465,1	47,61	573,28
Simulación Balachowski	85	832	45	427	-	-
Resultados Laboratorio	92	670	62	520	55,26	520,02

Luego de revisar la Tabla 6-5 es posible afirmar que, este método sobredimensiona el valor de la lectura A y que entrega valores menores para la lectura B, ya que los cálculos se realizan en un dominio de suelo que no posee las distorsiones causadas por la penetración de la paleta.

6.3. Interpretación de los resultados

En este apartado se comparan los parámetros de resistencia y rigidez obtenidos mediante los ensayos triaxiales CID (Balachowski, 2006) con los parámetros obtenidos en la interpretación de los resultados asociados al ensayo DMT, ya sea para los resultados adquiridos en laboratorio o por medio de alguna simulación. Para la interpretación de los resultados se utilizan las fórmulas presentadas en el CAPÍTULO 2, puntualmente, aquellas que corresponden a suelos arenosos. Cabe mencionar que no se cuenta con registros de ensayos CPT realizados dentro de la CC para las muestras utilizadas en esta memoria, por lo tanto, sólo se utilizan aquellas correlaciones que no dependen de este parámetro. Además, ya que no se posee la información sobre los valores de las presiones de corrección, se utilizarán los valores típicos, los cuales corresponden a $\Delta A=15$ [kPa] y $\Delta B=40$ [kPa]. Por ultimo, debido a que el ensayo DMT no presenta una fórmula para la obtención del ángulo de dilatancia, se utilizan dos opciones que entregarán una estimación de este parámetro:

- Ángulo de Dilatancia (Ψ) en función de la Densidad Relativa D_r

$$I_r = 5D_r - 1 \quad (6-1)$$

$$0 < I_r < 4$$

$$\text{En condiciones de deformaciones planas} \quad (6-2)$$

$$\psi = 6,25I_r$$

$$\text{En condiciones triaxiales} \quad (6-3)$$

$$\psi = 3,75I_r$$

- Ángulo de Dilatancia (Ψ) en función del Ángulo de Fricción ($\emptyset$)

Arenas con contenido de cuarzo (6-4)

$$\psi \approx \emptyset - 30.$$

A continuación, se presenta la interpretación de los resultados para cada una de las muestras que se utilizaron en esta memoria. Donde no sólo se presentan los parámetros que serán comparados con los resultados de los ensayos CID realizados por Balachowski (2006), sino que también se presentan los indicadores o parámetros intermedios e información adicional posible de obtener utilizando sólo los registros de presiones del ensayo DMT.

6.3.1. Muestra Densa 50 [kPa]

Tabla 6-6: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Densa 50 [kPa].

Método de obtención	Condiciones Iniciales			Lecturas de campo		Lecturas corregidas		Parámetros intermedios		
	Z [m]	Gamma --	σ'_{vo} [bar]	A [bar]	B [bar]	p0 [bar]	p1 [bar]	Id --	Kd --	Ed [bar]
Laboratorio	0,5	1,67	0,082	0,92	6,70	0,81	6,30	6,79	9,87	190,6
Balachowski	0,5	1,67	0,082	0,85	8,32	0,65	7,92	11,11	7,99	252,1
Continuo	0,5	1,67	0,082	0,87	9,35	0,63	8,95	13,31	7,64	288,9
Estacionario	0,5	1,67	0,082	1,06	7,77	0,91	7,37	7,13	11,06	224,3
Método de obtención	Parámetros de resistencia y rigidez									
	ϕ [°]	Rm --	M [bar]	E [MPa]	Dr TS	TS+TOS+HS	Ψ [°] Triaxial TS	TS+TOS+HS	Ψ cuarzo [°]	Tipo de Suelo --
Laboratorio	40,4	2,5	474,3	39,5	0,96	0,92	14,26	13,47	10,44	Sand
Balachowski	39,5	2,3	581,1	48,4	0,88	0,83	12,73	11,74	9,46	Sand
Continuo	39,3	2,3	654,6	54,6	0,86	0,81	12,41	11,37	9,25	Sand
Estacionario	41,0	2,6	582,2	48,5	1,00	0,97	15,08	14,41	10,95	Sand

6.3.2. Muestra Suelta 50 [kPa]

Tabla 6-7: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Suelta 50 [kPa].

Método de obtención	Condiciones Iniciales			Lecturas de campo		Lecturas corregidas		Parámetros intermedios		
	Z [m]	Gamma --	σ'_{vo} [bar]	A [bar]	B [bar]	p0 [bar]	p1 [bar]	Id --	Kd --	Ed [bar]
Laboratorio	0,5	1,48	0,073	0,62	5,20	0,57	4,80	7,44	7,83	146,8
Balachowski	0,5	1,48	0,073	0,45	4,27	0,44	3,87	7,87	6,01	119,1
Continuo	0,5	1,48	0,073	0,40	4,65	0,36	4,25	10,68	5,01	134,9
Estacionario	0,5	1,48	0,073	0,74	3,60	0,78	3,20	3,12	10,71	84,1
Método de obtención	Parámetros de resistencia y rigidez									
	ϕ [°]	Rm --	M [bar]	E [MPa]	Dr TS	TS+TOS+HS	Ψ [°] Triaxial TS	TS+TOS+HS	Ψ cuarzo [°]	Tipo de Suelo --
Laboratorio	39,4	2,3	335,9	28,0	0,86	0,80	12,43	11,33	9,37	Sand
Balachowski	38,1	2,1	245,2	20,4	0,76	0,69	10,52	9,17	8,10	Sand
Continuo	37,2	1,9	256,3	21,4	0,69	0,61	9,21	7,68	7,19	Sand
Estacionario	40,8	2,6	215,7	18,0	0,98	0,94	14,69	13,90	10,81	Silty Sand

6.3.3. Muestra Densa 100 [kPa]

Tabla 6-8: Interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio para muestra Densa 100 [kPa].

Método de obtención	Condiciones Iniciales			Lecturas de campo		Lecturas corregidas		Parámetros intermedios		
	Z [m]	Gamma --	σ'_{vo} [bar]	A [bar]	B [bar]	p0 [bar]	p1 [bar]	Id --	Kd --	Ed [bar]
Laboratorio	0,25	1,67	0,041	0,86	9,02	0,63	8,62	12,74	15,33	277,2
	0,3	1,67	0,049	0,91	7,46	0,76	7,06	8,23	15,58	218,4
	0,35	1,67	0,057	0,89	6,67	0,77	6,27	7,09	13,52	190,5
	0,4	1,67	0,065	0,90	6,36	0,80	5,96	6,41	12,29	178,8
	0,45	1,67	0,074	0,93	6,75	0,81	6,35	6,82	11,04	192,3
	0,5	1,67	0,082	1,02	7,11	0,89	6,71	6,51	10,91	201,7
	0,55	1,67	0,090	0,95	6,56	0,84	6,16	6,30	9,38	184,6
	0,6	1,67	0,098	1,03	6,86	0,92	6,46	6,03	9,36	192,2
	0,65	1,67	0,106	1,05	6,60	0,95	6,20	5,53	8,93	182,3
	0,7	1,67	0,115	0,99	6,60	0,89	6,20	5,99	7,74	184,4
	0,75	1,67	0,123	1,03	6,96	0,91	6,56	6,20	7,43	196,1
	0,8	1,67	0,131	0,95	7,35	0,80	6,95	7,64	6,14	213,3
Método de obtención	Parámetros de resistencia y rigidez									
	ϕ [°]	Rm --	M [bar]	E [MPa]	Dr		Ψ [°] Triaxial		Ψ cuarzo [°]	Tipo de Suelo --
Laboratorio	42,4	2,81	2,9	67,1	1,08	1,04	16,53	15,66	12,36	Sand
	42,4	2,20	2,9	53,1	1,10	1,06	16,88	16,16	12,42	Sand
	41,8	2,13	2,8	44,2	1,06	1,02	16,06	15,32	11,83	Sand
	41,4	2,12	2,7	40,2	1,03	0,99	15,54	14,81	11,41	Sand
	40,9	2,16	2,6	41,6	1,00	0,96	14,92	14,17	10,94	Sand
	40,9	2,17	2,6	43,4	1,00	0,96	14,98	14,29	10,89	Sand
	40,2	2,20	2,4	37,6	0,95	0,91	14,01	13,24	10,21	Sand
	40,2	2,20	2,4	39,1	0,95	0,92	14,11	13,41	10,20	Sand
	40,0	2,20	2,4	36,5	0,94	0,90	13,88	13,19	9,99	Sand
	39,3	2,17	2,3	35,0	0,89	0,85	12,94	12,17	9,32	Sand
	39,1	2,01	2,2	36,6	0,88	0,84	12,73	11,97	9,12	Sand
	38,2	1,77	2,1	36,9	0,81	0,76	11,45	10,55	8,21	Sand

6.3.4. Muestra Suelta 100 [kPa]

Tabla 6-9: Interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y laboratorio para muestra Suelta 100 [kPa].

Método de obtención	Condiciones Iniciales			Lecturas de campo		Lecturas corregidas		Parámetros intermedios		
	Z [m]	Gamma --	σ'_{vo} [bar]	A [bar]	B [bar]	p0 [bar]	p1 [bar]	Id --	Kd --	Ed [bar]
Laboratorio	0,2	1,48	0,029	0,50	6,10	0,40	5,70	13,16	13,87	183,8
	0,3	1,48	0,044	0,35	4,81	0,31	4,41	13,25	7,11	142,2
	0,35	1,48	0,051	0,39	5,01	0,33	4,61	12,89	6,54	148,4
	0,4	1,48	0,058	0,43	5,01	0,37	4,61	11,30	6,46	146,9
	0,45	1,48	0,065	0,50	5,30	0,44	4,90	10,10	6,77	154,8
	0,5	1,48	0,073	0,55	5,20	0,50	4,80	8,65	6,86	149,3
	0,55	1,48	0,080	0,62	5,20	0,57	4,80	7,46	7,11	146,8
	0,6	1,48	0,087	0,66	5,16	0,62	4,76	6,74	7,07	143,7
	0,65	1,48	0,094	0,72	5,35	0,67	4,95	6,40	7,09	148,5
	0,7	1,48	0,102	0,74	5,30	0,69	4,90	6,06	6,84	146,1
Continuo	0,75	1,48	0,109	0,66	5,01	0,62	4,61	6,44	5,69	138,4
	0,8	1,48	0,116	0,55	5,20	0,50	4,80	8,64	4,29	149,2
	0,25	1,48	0,036	0,39	4,72	0,35	4,32	11,33	9,66	137,7
	0,3	1,48	0,044	0,41	4,85	0,36	4,45	11,24	8,35	141,7
	0,35	1,48	0,051	0,43	4,98	0,38	4,58	11,01	7,52	145,7
	0,4	1,48	0,058	0,42	5,25	0,36	4,85	12,45	6,22	155,8
	0,45	1,48	0,065	0,45	5,33	0,39	4,93	11,72	5,94	157,6
	0,5	1,48	0,073	0,48	5,73	0,39	5,33	12,65	5,39	171,5
	0,55	1,48	0,080	0,48	5,58	0,40	5,18	12,03	4,98	165,9
	0,6	1,48	0,087	0,47	5,91	0,38	5,51	13,50	4,37	178,1
Método de obtención	Parámetros de resistencia y rigidez									
	ϕ [°]	Rm --	M [bar]	E [MPa]	Dr		Ψ [°] Triaxial		Ψ cuarzo [°]	Tipo de Suelo --
Laboratorio	41,9	2,47	2,8	43,0	1,02	0,95	15,36	14,14	11,94	Sand
	38,9	2,34	2,2	26,1	0,79	0,71	11,07	9,49	8,91	Sand
	38,5	2,25	2,1	26,3	0,77	0,69	10,66	9,12	8,51	Sand
	38,4	2,09	2,1	26,0	0,77	0,70	10,75	9,29	8,45	Sand
	38,7	2,05	2,2	27,9	0,80	0,73	11,24	9,92	8,68	Sand
	38,7	1,96	2,2	27,0	0,81	0,75	11,48	10,25	8,74	Sand
	38,9	1,90	2,2	27,0	0,83	0,77	11,85	10,73	8,91	Sand
	38,9	1,78	2,2	26,3	0,84	0,78	11,92	10,86	8,88	Sand
	38,9	1,73	2,2	27,2	0,84	0,79	12,06	11,06	8,90	Sand
	38,7	1,62	2,2	26,4	0,83	0,78	11,89	10,91	8,73	Sand
Continuo	37,8	1,59	2,0	23,2	0,77	0,71	10,65	9,55	7,83	Sand
	36,4	1,51	1,8	21,9	0,66	0,59	8,70	7,37	6,40	Sand
	40,3	2,90	2,5	34,0	2,08	2,24	35,28	38,24	10,34	Sand
	39,7	2,92	2,3	33,2	2,10	2,26	35,55	38,57	9,68	Sand
	39,2	2,79	2,3	32,8	2,11	2,28	35,83	38,92	9,18	Sand
	38,3	2,70	2,1	32,5	2,14	2,30	36,29	39,43	8,26	Sand
	38,0	2,59	2,0	32,3	2,14	2,32	36,46	39,66	8,04	Sand
	37,6	2,58	2,0	33,7	2,18	2,36	37,13	40,45	7,56	Sand
	37,2	2,44	1,9	31,4	2,17	2,34	36,89	40,18	7,16	Sand
	36,5	2,44	1,8	31,7	2,19	2,37	37,40	40,76	6,49	Sand
Continuo	36,2	2,40	1,7	31,0	2,20	2,38	37,48	40,86	6,17	Sand
	35,5	2,28	1,6	29,8	2,21	2,39	37,62	41,00	5,54	Sand
	35,3	2,24	1,6	30,8	2,23	2,42	38,07	41,55	5,32	Sand
	34,8	2,08	1,5	28,2	2,21	2,40	37,77	41,18	4,82	Sand

6.3.5. Comparación de la interpretación de resultados con los resultados de ensayos CID

En la Tabla 6-10 se presentan los parámetros de rigidez y resistencia E , ϕ y Ψ obtenidos por medio del ensayo CID, considerados como los valores referentes, para distintas muestras según el nivel de confinamiento y también se presentan los parámetros de rigidez y resistencia obtenidos en la interpretación de datos (Tabla 6-6, Tabla 6-7, Tabla 6-8 y Tabla 6-9) utilizando las lecturas de presiones adquiridas en laboratorio dentro de la CC o las presiones adquiridas en algún tipo de simulación.

Tabla 6-10: Resumen de la interpretación de datos para los parámetros de rigidez y resistencia.

Método de obtención	Dense 50 [kPa]					Loose 50 [kPa]				
	ϕ [°]	E [MPa]	Ψ [°]			ϕ [°]	E [MPa]	Ψ [°]		
Ensayo CID	42	70	15			35	40	5		
DMT dentro CC	40,40	39,52	14,26	13,47	10,44	39,40	27,99	12,43	11,33	9,37
Balachowski	39,50	48,42	12,73	11,74	9,46	38,10	20,43	10,52	9,17	8,10
Método Continuo	39,30	54,55	12,41	11,37	9,25	37,20	21,36	9,21	7,68	7,19
Método Estacionario	41,00	48,52	15,08	14,41	10,95	40,80	17,97	14,69	13,90	10,81
Método de obtención	Loose 100 [kPa]					Dense 100 [kPa]				
	ϕ [°]	E [MPa]	Ψ [°]			ϕ [°]	E [MPa]	Ψ [°]		
Ensayo CID	29,6	60,7	3,4			--	--	--		
DMT dentro CC	38,74	27,04	11,47	10,22	8,74	--	--	--	--	--
Balachowski	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Método Continuo	37,38	33,66	9,53	8,03	7,38	40,57	43,41	14,50	13,75	10,57
Método Estacionario	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó el estado del arte respecto al ensayo DMT, indicando procedimientos recomendados y las últimas correlaciones verificadas en distintos tipos de suelos. Además, se mencionan las ventajas que posee este ensayo frente a otros ensayos en terreno, destacando que este ensayo es el único ensayo de penetración que puede entregar una idea al respecto a la historia de tensiones.

Por otro lado, para los inicios del desarrollo de un ensayo de penetración virtual es fundamental contar con registros de este ensayo adquiridos sobre un entorno completamente controlado, que permita una reducción de las variables involucradas y una mejor comprensión del evento, de modo que, esta situación represente una simplificación importante en la complejidad del problema. Esto se logra cuando el ensayo DMT es realizado en laboratorio dentro de una cámara de calibración (CC).

Se define a la sección transversal representativa del problema por medio del modelo de deformaciones planas, el cual fue elegido por sobre el modelo axisimétrico, ya que éste no se ve fuertemente influenciado por la plasticidad del suelo y reproduce mejor el modo en que se expande la membrana. Habiendo definido la sección transversal representativa del problema y generado la malla de elementos finitos es posible afirmar que los resultados de la simulación del ensayo dependen directamente del modelo constitutivo elegido, del modo de representar ambas fases del ensayo y de la definición de cada una de las componentes presentes en el modelo geométrico.

En cuanto a la definición de los componentes que conforman la cuchilla del DMT, tales como: elementos placa que definen el contorno de la paleta, la membrana y el dominio que define el cuerpo de la cuchilla. Se debe destacar la importancia en la definición del conjunto de datos asociados a los elementos placa que conforman la membrana, ya que su definición afecta directamente en la forma en la que ésta se expande y deforma el suelo contiguo. En esta simulación se adoptó un espesor de membrana de 200 [mm], el cual es 1000 veces mayor que el espesor real de la membrana (0,2 [mm]). Sin embargo, esta membrana gruesa no ocupa lugar en el modelo geométrico, es decir, este espesor solo corresponde a una relación entre la rigidez a la flexión y la rigidez axial. Lo anterior es posible de comprobar al observar las Figura 5-23 y Figura 5-24, las cuales corresponden a las distorsiones generadas en la fase de inserción por dos tipos de paleta, por un lado, una que posee una membrana delgada, y por el otro, otra que posee una membrana gruesa respectivamente, donde se puede ver que las distorsiones provocadas son bastante similares y no se observa ninguna diferencia con respecto al espesor definido en el conjunto de datos.

Los elementos placas que conforman el contorno de la paleta y el dominio del cuerpo de la cuchilla fueron definidos basándose las propiedades físicas del acero inoxidable. Donde sumado a lo dicho anteriormente, respecto al espesor de la membrana, el espesor de los elementos placas que conforman el contorno de la paleta no influye significativamente en las distorsiones ni esfuerzos generados; sin embargo, su rigidez a la flexión y rigidez axial si influyen en el modo en el que la cuchilla se comportará al ser sometida a un desplazamiento prescrito y a una deformación volumétrica. En cuanto a la rigidez del dominio que conforma el cuerpo de la paleta DMT se obtienen resultados similares para rigideces sobre el valor de la rigidez de la muestra de suelo $7,00E+04$ [kPa], si bien los resultados no se ven influenciados para distintos valores de rigideces mayores a la rigidez

de la muestra de suelo, se debe mencionar que al aumentar la rigidez se deben aumentar la deformación volumétrica impuesta y esto significa también un aumento en los tiempos de cálculos. Para valores iguales o menores a la rigidez de la muestra de suelo existe una fuerte caída en los valores de esfuerzos promedios obtenidos.

También se deben definir con cuidado las dimensiones del sistema DMT-CC, es decir, las dimensiones de la paleta DMT y de la cámara de calibración. La definición de estas dimensiones sí afectan a los resultados obtenidos, siendo más notorio el efecto asociado al tamaño de la CC. El análisis numérico relacionado con el efecto del tamaño de la cámara muestra que se necesita un radio de al menos el doble del que en realidad se posee (0,265 [m]) para disminuir estos efectos numéricos en los cálculos. En esta tesis se adoptó un radio de 1 [m] para la CC, con el fin de poder comparar los resultados obtenidos en esta memoria con los obtenidos en la simulación realizada por Balachowski (2006), pero al observar las Tabla 5-3 y Tabla 5-22 se puede afirmar que se obtienen resultados más cercanos a los valores de las lecturas registradas en el laboratorio dentro de la CC y a los resultados de la simulación de Balachowski (2006) cuando se considera un radio de 0,53 [m]. Sin embargo, los resultados obtenidos al considerar una CC de 1 [m] radio, para la muestra densa sometida a 50 [kPa] y para las muestras sueltas sometidas a 50 y 100 [kPa], son satisfactorios.

Por falta de información se tuvo que analizar la influencia de ciertos parámetros en los resultados como, por ejemplo: peso específico (γ_s), coeficiente de Poisson (ν) y la resistencia de la interface (R_{inter}). Los rangos de valores que se adoptaron para variar la magnitud de estos parámetros desconocidos fueron obtenidos gracias a trabajos o publicaciones anteriores relacionadas con el lugar en donde se extrajeron las muestras de arena utilizadas en el trabajo de Balachowski (2006) y ciertas recomendaciones o sugerencias para cada parámetro. En conclusión, se le asigna mayor importancia en la definición del modelo al coeficiente de Poisson y al peso específico, los cuales sí tienen cierta influencia en los resultados, por lo tanto, conocer exactamente su valor ayudaría a aumentar la precisión de esta simulación.

Por otro lado, cabe destacar que los resultados de los esfuerzos promedios también dependen del área de dominio y del grado de refinado de la malla, ya que ambos factores están relacionados con el número de puntos de tensión cercanos a la membrana, los cuales son considerados en el cálculo del esfuerzo promedio.

De los análisis de sensibilidad realizados para los parámetros de rigidez y resistencia en muestras de arena densa y suelta sometidas a una presión de confinamiento de 50 [kPa], se debe destacar lo siguiente:

- Para el análisis de sensibilidad similar al que se hizo en el trabajo de Balachowski (2006), Tabla 6-1 y Tabla 6-2, en donde se considera la variación de ϕ y E , permite realizar una comparación sobre la tendencia que existe en ambos modelos al variar alguno de estos parámetros involucrados. Al revisar las Figura 6-1 y Figura 6-2 es posible concluir que ambos modelos poseen comportamientos similares, debido a que en los dos modelos se puede observar un aumento en los resultados al aumentar ϕ o E con respecto a los valores obtenidos por medio del ensayo CID (indicados en filas amarillas), y viceversa. Sin embargo, el análisis propuesto por Balachowski no muestra la influencia del ángulo de dilatación (Ψ) ni permite conocer

cuantitativamente la influencia en los resultados de esfuerzo promedio de cada uno de los parámetros que definen la muestra.

- Para el análisis de sensibilidad que varía porcentualmente ($\pm 1-2,5-5\%$) por separado cada uno de los parámetros que definen la muestra, con respecto a los valores de las muestras definidas en laboratorio por medio del ensayo CID (indicados en filas amarillas en las Tabla 6-3 y Tabla 6-4), se tiene que al observar estas tablas, puntualmente, para las lecturas B se puede apreciar que el ángulo de fricción es el parámetro más sensible a las variaciones, seguido por la rigidez y finalmente por el ángulo de dilatación, con respecto a sus valores de referencia. Además, este comportamiento igual se observa en las lecturas A, pero estas lecturas al estar relacionadas con la fase de inserción (en este modelo), dependen del punto en el que se considera que las trayectorias de tensiones se vuelven asintóticas y de las fluctuaciones en los valores de estas trayectorias. Por otro lado, al poseer las lecturas A pequeñas magnitudes resulta más complicado apreciar los efectos en las variaciones de los valores que definen a las muestras de suelo.

Por lo tanto, poseer valores representativos para la muestra del suelo que definirá el dominio del suelo por simular, es fundamental para la obtención de buenos resultados.

Además, se presentaron los resultados del método estacionario (sólo considera la expansión de la membrana) al no poseer la fase de inserción no existen distorsiones en el suelo y la lectura A en este caso se debe calcular por medio de la expansión de la membrana. Este método no simula la ejecución del ensayo, pero permite observar el aporte de la distorsión del suelo en los resultados, donde se tienen lecturas A mayores y lecturas B menores cuando sus resultados son comparados con los obtenidos por el método continuo, es decir, que las distorsiones sí influyen en los resultados.

Por último, en la sección análisis de resultados se realiza la tradicional interpretación de los resultados. Al inspeccionar las Tablas presentadas en la sección 6.3 se aprecia que el indicador I_D sí clasifica a la muestra como arenosa; que los pesos específicos estimados a partir de la Figura 2-11 resultan ser mayores para la muestra densa ($\gamma_{\text{densa}}=17,64 \text{ [kN/m}^3\text{]})$ y para la muestra suelta ($\gamma_{\text{suelta}}=16,66 \text{ [kN/m}^3\text{]})$ en comparación a los pesos adoptados en la simulación obtenidos gracias estudios realizados con muestras similares ($\gamma_{\text{densa}}=16,38 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ y $\gamma_{\text{suelta}}=14,52 \text{ [kN/m}^3\text{]})$; la magnitud de K_D es mayor que 2 en todas las muestras ensayadas, esto indica una posible preconsolidación, la cual se debe a las presiones de confinamiento aplicadas a las muestras antes de ejecutar el ensayo DMT dentro de la CC. En la Tabla 6-10 se presentan los valores de referencia para los parámetros de rigidez y resistencia (obtenidos por medio del ensayo CID) y los valores de éstos obtenidos gracias a la interpretación de las lecturas de presión provenientes de las simulaciones y las conseguidas al realizar el ensayo DMT dentro de la CC, en donde se destaca lo siguiente:

- Ángulo de fricción (ϕ): Debido a que no se cuenta con ensayos CPT en las muestras ensayadas dentro de la CC se debe utilizar la fórmula (2-27), la cual depende sólo del parámetro K_D . Al revisar Tabla 6-10 se aprecia que el valor de las estimaciones son bastantes cercanas para el caso de la muestra densa sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa]; para la muestra suelta sometida a un esfuerzo de 50 [kPa] las predicciones de los ángulos de fricción se encuentran sobrestimadas; y para el caso de la muestra suelta sometida a un esfuerzo de 100 [kPa], se considera

el ensayo realizado a la profundidad de 0,5 [m], se obtienen estimaciones bastante sobrestimadas.

- Ángulo de dilatación (Ψ): Se calculan a partir de D_r utilizando la formula que depende exclusivamente de K_D . Al revisar tabla se aprecia que el valor de las estimaciones son bastantes cercanos para el caso de la muestra densa sometida a un esfuerzo de confinamiento de 50 [kPa]; para la muestra suelta sometida a un esfuerzo de 50 [kPa], las predicciones de los ángulos de dilatación son sobrestimadas; y para el caso de la muestra suelta sometida a 100 [kPa], se considera el ensayo realizado a la profundidad de 0,5 [m], se obtienen estimaciones bastante sobrestimadas.
- Módulo de rigidez (E): Los valores obtenidos en la interpretación de datos, en todos los casos son menores a los que se obtuvieron en laboratorio gracias al ensayo CID.

Al examinar estos resultados provenientes de la interpretación de datos, se eligen las lecturas de presiones obtenidas por el método continuo, desarrollado en esta memoria, ya que estas conducen a los resultados más cercanos a los valores considerados como referentes. Sin embargo, se debe destacar que ni las presiones obtenidas por Balachowski ni las obtenidas por los métodos propuestos en esta memoria entregan resultados muy similares a los obtenidos por los ensayos triaxiales CID. Esto podría deberse a que se están comparando resultados de dos ensayos distintos, además, el ensayo DMT es ejecutado dentro de una cámara de calibración. Cabe mencionar que una cámara de calibración de radio 0,6 [m] permite evitar los efectos de tamaño cuando se ejecuta el ensayo DMT dentro de la CC en laboratorio, no obstante, las mediciones de presiones que se cuentan fueron tomadas con una cámara de calibración que tiene un radio de 0,265 [m], por lo tanto, estos resultados sí poseen efectos del tamaño de la cámara.

En esta memoria se obtuvieron resultados satisfactorios para los casos estudiados, pero se debe mencionar que esta simulación aún debe ser mejorada para poder finalmente ser empleada como un ensayo virtual en terreno, queda pendiente: la incorporación una base mayor de datos, que posea tanto muestras granulares como muestras cohesivas; trabajar con muestras heterogéneas; considerar la presencia del agua y trabajar sin condiciones de borde. También existen algunos detalles que no son posibles considerarlos en la simulación por limitaciones del software, tales como: la velocidad de inserción y de la expansión de la membrana; imponer desplazamientos puntuales de gran magnitud como los asociados a la inserción, ya que tampoco la opción de malla actualizada permite tales deformaciones. Se debe destacar que para representar de la mejor manera la deflexión de la membrana se utilizó un modelo del tipo de deformaciones planas, pero la cámara de calibración debe ser definida por un modelo axisimétrico, ya que su sección transversal es radial, por lo tanto, para evitar estas incompatibilidades lo óptimo sería realizar una simulación 3D. La expansión de una membrana circular genera menos deformación que la deformación asociada a la expansión de la membrana modelada en condiciones de deformaciones planas en 2D. Se aplicaron deformaciones de membrana mayores a las reales en el análisis numérico (amplificadas 3,5 veces), con el objetivo de aproximarse a la respuesta axisimétrica de la membrana circular. Finalmente, se debe decir que la penetración de la cuchilla induce menos distorsión del suelo que cuando se modela esta fase en 2D.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

Para conocer en más detalle todo lo relacionado con el ensayo DMT se recomienda revisar los siguientes textos:

Normas e Informes Técnicos:

ASTM Standards: D 6635-01. (2007) "Standard Test Method for Performing the Flat Dilatometer Test." *ASTM C700*, West Conshohocken, PA.

Bond, A., & Harris, A. (2008). *Decoding eurocode 7*. CRC Press.

Eurocode 7 (1997). Geotechnical design - Part 3: Design assisted by field testing, Section 9: Flat dilatometer test (DMT). Final Draft, ENV 1997-3, Apr., 66-73. CEN - European Committee For Standardization.

Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., & Calabrese, M. (2006). The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations-A report by the ISSMGE committee TC16. In *2nd International Conference on the Flat Dilatometer* (pp. 7-48). Reprint official version approved by the ISSMGE Technical Committee TC16 (May 2001).

US DOT - Briaud, J.L. & Miran, J. (1992). "The Flat Dilatometer Test". Departm. of Transportation - Fed. Highway Administr., Washington, D.C., Publ. No. FHWA-SA-91-044, Feb., 102 pp.

Paguinas web:

<http://www.marchetti-dmt.it/>

[http://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/ service%20files/html/index.htm](http://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/service%20files/html/index.htm)

Referencias

ASTM Subcommittee D 18.02.10 - Schmertmann, J.H., Chairman (1986). "Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test". *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 9, No. 2, June, 93-101

Andrus, R.D. and Stokoe, K.H., II. (2000). "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity". *Jnl GGE*, ASCE, 126(11), 1015-1025.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S. & Pasqualini, E. (1986). "Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers". Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 431-446.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. & Jamiolkowski, M. (1988). "Stiffness of sands from CPT, SPT and DMT – A critical review". ICE Proc. Conf. Penetration Testing in the UK, Univ. of Birmingham, July, Paper No. 42, 299-305

Balachowski, L. (2006). "Numerical Modelling of DMT Test in Calibration Chamber." *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXVIII, No. 2-4.

Balachowski, L., & Gotteland, P. (2007). Characteristics of tyre chips-sand mixtures from triaxial tests. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 54(1), 25-36.

- Baligh, M.M. & Scott, R.F. (1975). "Quasi Static Deep Penetration in Clays". ASCE Jnl GE, Vol. 101, No. GT11, 1119-1133.
- Bolt, A. F., & Dembicki, E. (1995). The Uplift Capacity of Anchors Embedded in Loose Sand.
- Brinkgreve, R. B. J. (2002). PLAXIS (version 8) user's manual. *Delft University of Technology and PLAXIS BV, Netherlands*.
- Burghignoli, A., Cavallera, L., Chieppa, V., Jamiolkowski, M., Mancuso, C., Marchetti, S., Pane, V., Paoliani, P., Silvestri, F., Vinale, F. & Vittori, E. (1991). "Geotechnical characterization of Fucino clay". Proc. X ECSMFE, Florence, Vol. 1, 27-40.
- Campanella, R.G., Robertson, P.K., Gillespie, D.G. & Grieg, J. (1985). "Recent Developments in In-Situ Testing of Soils". Proc. XI ICSMFE, S. Francisco, Vol. 2, 849-854
- Carter, J.P., Randolph, M.F. & Wroth, C.P. (1979). "Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity". Int. Jnl Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 3, 305-322.
- Dembicki, E., & Duszynski, R. The capacity of reinforced subsoil loaded by uplifted foundation.
- Durgunoglu, H.T. & Mitchell, J.K. (1975). "Static Penetration Resistance of Soils, I - Analysis, II - Evaluation of the Theory and Implications for Practice". ASCE Spec. Conf. on "In Situ Measurement of Soil Properties", Raleigh, NC, Vol. 1.
- Failmezger, R. A., & Bullock, P. J. (2011). Owner Involvement—Choosing Risk Factors for Shallow Foundations. In *GeoRisk 2011: Geotechnical Risk Assessment and Management* (pp. 1098-1108). ASCE.
- Fretti, C., & Lo Presti, D. C. E, and Salgado, R., 1992," The Research Dilatometer: In Situ and Calibration Chamber Test Results,". *Rivista Italiana di Geotecnica [Italian Geotechnical Review]*, 26(4), 237-243.
- Hayes, J.A. (1990). "The Marchetti Dilatometer and Compressibility". Seminar on "In Situ Testing and Monitoring", Southern Ont. Section of Canad. Geot. Society, Sept., 21 pp.
- Jamiolkowski, M. (1995). "Opening address". Proc. Int. Symp. on Cone Penetration Testing CPT '95, Swedish Geot. Soc., Linköping, Vol. 3, 7-15.
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., & Manassero, M. (2003). Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. *Soil behavior and soft ground construction*, 7(119), 201-238.
- Jendeby, L. (1992). "Deep Compaction by Vibrowing". Proc. Nordic Geotechnical Meeting NGM-92, Vol. 1, 19-24
- Lacasse, S. (1986). "In Situ Site Investigation Techniques and Interpretation for Offshore Practice". Norwegian Geotechnical Inst., Report 40019-28, Sept.
- Lancellotta R. (1983) "Analisi di Affidabilità in Ingegneria Geotecnica" *Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni*, No 625, Politecnico di Torino.

- Lawter Jr, R. S., & Borden, R. H. (1990). Determination of Horizontal Stress in Normally Consolidated Sands by Using the Dilatometer Test: A Calibration Chamber Study. *Transportation Research Record*, (1278).
- Lesniewska, D. (2009). Air trapping phenomenon and cracking-model tests on flood embankment. IBW-PAN Poland.
- Marchetti, S. (1980). "In Situ Tests by Flat Dilatometer". ASCE Jnl GED, Vol. 106, No. GT3, Mar., 299-321.
- Marchetti, S. & Crapps, D.K. (1981). "Flat Dilatometer Manual". Internal Report of G.P.E. Inc
- Marchetti, S. (1985). "On the Field Determination of K_0 in Sand". Discussion Session No. 2A, Proc. XI ICSMFE, S. Francisco, Vol. 5, 2667-2673
- Marchetti, S., Totani, G., Calabrese, M. & Monaco, P. (1991). "P-y curves from DMT data for piles driven in clay". Proc. 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, DFI, Stresa, Vol. 1, 263-272.
- Marchetti, S. (1997). "The Flat Dilatometer: Design Applications". Proc. Third International Geotechnical Engineering Conference, Keynote lecture, Cairo University, Jan., 421-448
- Mayne, P.W., 2001, Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-Situ tests, Proceedings, International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, pp. 27-47.
- Mayne, P.W., Coop, M.R., Springman, S.M., Huang, A.B. and Zornberg, J.G. (2009). Geomaterial behaviour and testing. State of the art Paper. Proceedings of the 17th ICSMGE, Alexandria, Egypt, Vol. 4: 2777-2872.
- Mayne P.W.(2015). "Peak friction angle of undisturbed sands using DMT". *Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15*. Roma, Italy.
- Monaco et al. (2014). "Overconsolidation and stiffness of Venice Lagoon Sands and Silts from SDMT and CPTU". *Jnl Asce GGE*. Jan 2014 : 215-227
- NCh, N. 433. Of 96 (1996). Diseño sísmico de edificios.
- Nº, D. S. (61). MINVU (2011), Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga Decreto Nº 117, de 2010 (in Spanish), Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Diario Oficial*, 13.
- Panda, T. C., Omre, P. K., & Kumbhar, B. K. (2008). Effect of different parameters on clarification efficiency of mechanical clarifier. *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, (11), 1-10.
- R. B. J. Brinkgreve, "Selection of soils models and parameters for geotechnical engineering application.," *Soils constitutive models, Evaluation, selection and calibration (GSP 128)*, J. Yamamuro and V. Kaliakin, eds.: ASCE, 2005.
- Reyna, F. & Chameau, J.L. (1991). "Dilatometer Based Liquefaction Potential of Sites in the Imperial Valley". Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geot. Earthquake Engrg. and Soil Dyn., St. Louis, May.
- Robertson, P.K. & Campanella, R.G. (1986). "Estimating Liquefaction Potential of Sands Using the Flat Plate Dilatometer". ASTM Geotechn. Testing Journal, Mar., 38-40.

- Robertson, P.K., Davies, M.P. & Campanella, R.G. (1987). "Design of Laterally Loaded Driven Piles Using the Flat Dilatometer". *Geot. Testing Jnl*, Vol. 12, No. 1, Mar., 30-38.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. & By, T. (1988). "Excess Pore Pressures and the Flat Dilatometer Test". *Proc. ISOPT-1*, Orlando, FL, Vol. 1, 567-576.
- Robertson, P.K. (2012). Interpretation of in-situ tests – some insights. The James K. Mitchell lecture. Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, Porto de Galinhas, Brasil, Coutinho & Mayne (eds.), Taylor & Francis, Vol. 1, 3 -24.
- Schmertmann, J.H. (1976) "An Updated Correlation between Relative Density D_R and Fugro-Type Electric Cone Bearing, q_c ." *Contract Report DACW 39-76 M 6646 WES*, Vicksburg, Miss., 19767
- Schmertmann, J.H. (1983). "Revised Procedure for Calculating K_o and OCR from DMT's with $I_D > 1.2$ and which Incorporates the Penetration Measurement to Permit Calculating the Plane Strain Friction Angle". DMT Digest No. 1. GPE Inc., Gainesville, FL
- Schmertmann, J.H. (1986). "Dilatometer to compute Foundation Settlement". *Proc. In Situ '86*, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 303-321.
- Schmertmann, J.H. (1988). "Guidelines for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design". Rept. No. FHWA-PA-87-022+84-24 to PennDOT, Office of Research and Special Studies, Harrisburg, PA, in 4 volumes with the 3 below concerning primarily the DMT: Vol. I - Summary (78 pp.); Vol. III - DMT Test Methods and Data Reduction (183 pp.); Vol. IV - DMT Design Method and Examples (135 pp.).
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Jnl GED ASCE*, 97(9), 1249-1273.
- Segal, G. (2000). SEPRAN introduction, user's manual, programmer's guide and standard problems. *Ingenieursbureau SEPRAN, Leidschendam*.
- Tanaka, H. & Tanaka, M. (1998). "Characterization of Sandy Soils using CPT and DMT". *Soils and Foundations*, Japanese Geot. Soc., Vol. 38, No. 3, 55-65.
- Totani, G., Calabrese, M., Marchetti, S. & Monaco, P. (1997). "Use of in situ flat dilatometer (DMT) for ground characterization in the stability analysis of slopes". *Proc. XIV ICSMFE*, Hamburg, Vol. 1, 607-610.
- Vermeer, P.A., de Borst, R. (1984). Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, 29(3).

ANEXO A. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Paso a paso del procedimiento del ensayo: el ensayo consiste básicamente en la siguiente secuencia de operaciones:

- 1) El operador debe asegurarse que la válvula de flujo esté cerrada y las válvulas de descarga estén abiertas, luego le da una señal al operador del equipo de perforación para que empiece su trabajo (los dos operadores deberán estar en una posición que asegure un buen control y comunicación visual).
- 2) El operador del equipo de perforación empuja la paleta verticalmente hasta la profundidad deseada, ya sea desde la superficie del suelo o del fondo de una perforación. Durante el avance la señal audiovisual se encuentra normalmente encendida debido a la presión del suelo que rodea la paleta, la señal se enciende generalmente siempre bajo los primeros 20 a 40 [cm] de superficie.
- 3) Tan pronto se alcance la profundidad deseada el operador del equipo de perforación deja de ejercer empuje al sistema DMT y le da una señal al otro operador para que realice su trabajo.
- 4) El operador del DMT cierra las válvulas de descarga y lentamente abre la válvula de flujo para comenzar a presurizar la membrana. Durante este tiempo él escucha la señal audiovisual en la unidad de control y en el instante en que ésta se detiene (cuando la membrana se levanta de la superficie del sensor y comienza su movimiento lateral) el operador lee la presión en el manómetro y registra la lectura A.
- 5) Sin parar el flujo, el operador continúa inflando la membrana estando la señal audiovisual apagada hasta que ésta se reactive, en ese instante el operador lee en el manómetro y registra la lectura B.
- 6) El operador abre inmediatamente la válvula de descarga rápida y cierra la válvula de flujo cortando el suministro de gas y evitando un posible daño en la membrana, ya que ésta podría expandirse más allá de lo habitual, generando deformaciones plásticas irreversibles en la membrana, cambiando además los valores de calibración del ensayo, por esta razón este procedimiento debe realizarse de inmediato una vez registrada la lectura B.
- 7) El operador le da la señal al operador del equipo de perforación que continúe avanzado dentro del suelo hasta la siguiente profundidad deseada, generalmente 20 [cm] más abajo (la válvula de descarga rápida debe seguir abierta durante la penetración para evitar empujar la paleta con la membrana expandida).

Este procedimiento del ensayo se repite en cada detención de la paleta hasta el final del sondaje. Luego de conseguir el perfil completo del suelo, cuando la paleta es extraída, se realiza la calibración final y compara con los valores de la calibración inicial.

Si se desea tomar la lectura C el procedimiento es el mismo, solo que en el paso 6 en vez de abrir la válvula de descarga rápida se utiliza la válvula de descarga lenta y se espera aproximadamente un minuto hasta que la presión disminuya aproximándose al cero del manómetro, en el momento que la señal audiovisual vuelva se debe registrar la lectura C.

ANEXO B. COMPRENSIÓN INSTRUMENTAL

La paleta del DMT trabaja como un interruptor eléctrico que se enciende y apaga durante el ensayo. La Figura B-1 muestra donde se ubica este interruptor eléctrico dentro de la cuchilla del DMT y la Figura B-2 muestra las componentes de este interruptor. La caja aislante impide el contacto eléctrico entre el sensor con el cuerpo metálico subyacente del dilatómetro. El sensor no se mueve y se mantiene en su lugar gracias a la caja aislante, el sensor está conectado a tierra y la unidad de control emite un pitido constante bajo las siguientes circunstancias:

- Cuando la membrana descansa sobre el sensor, antes de que se inicie la expansión de la membrana.
- El centro de la membrana se ha movido 1,1 [mm], ocurriendo esto al mismo tiempo en el que el cilindro de metal toca la cara interna del sensor.

El contacto eléctrico es indicado mediante una señal audiovisual, la desactivación y reactivación del pitido indica al operador tomar las lecturas A y B respectivamente. Cuando no hay contacto eléctrico, por lo tanto, tampoco se emite la señal audiovisual en la posición intermedia a las señaladas anteriormente.

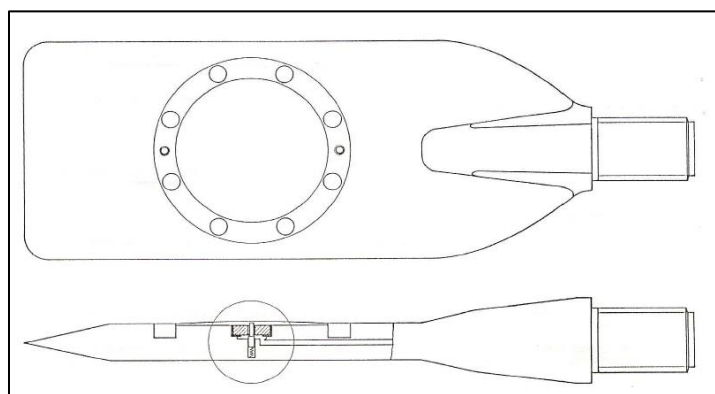


Figura B-1: Vista en planta y corte transversal de la paleta DMT (Gil Mejia, 2004).

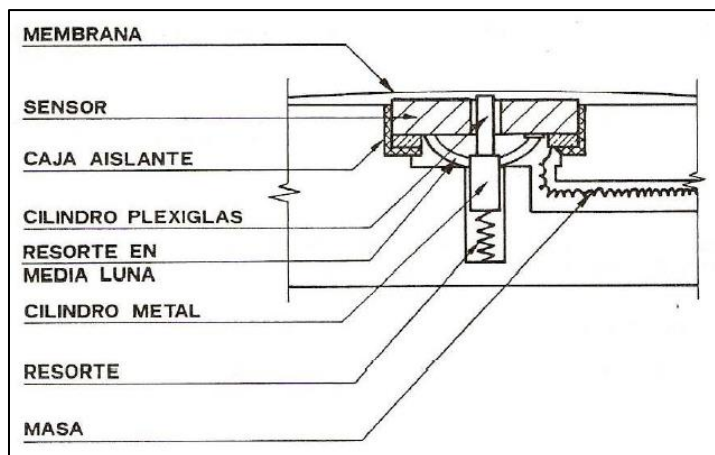


Figura B-2: Detalle de los componentes presentes en el corte transversal (Gil Mejia, 2004).

ANEXO C. APLICACIONES A PROBLEMAS DE INGENIERÍA

Aunque el diseño geotécnico debería preferentemente ser realizado basado en métodos analíticos o numéricos respaldados por parámetros derivados por medio de ensayos en terreno o laboratorio, el ensayo DMT posee una gran cantidad de aplicaciones útiles para solucionar problemas prácticos, tales como diseño de fundaciones y de pilotes, estabilidad de pendientes, potencial de licuefacción y control de compactación de la subrasante. El diseño de pilotes lateralmente cargados, el establecimiento de los asentamientos de fundaciones superficiales y la evaluación del potencial de licuefacción, son consideradas las tres aplicaciones más útiles del ensayo DMT.

En esta memoria se presentarán las tres aplicaciones más importantes, con el fin de evitar que ésta se convierta en un documento demasiado extenso se sugiere al lector interesado revisar la bibliografía propuesta si éste desea mayor información sobre las demás aplicaciones antes mencionadas.

PILOTES LATERALMENTE CARGADOS

Para diseñar pilotes cargados lateralmente es necesario conocer la curva $p - \gamma$, donde p corresponde a la carga horizontal sobre el pilote e γ es el desplazamiento horizontal del pilote; los resultados de sondajes utilizando el equipo DMT permiten trazar las curvas $p - \gamma$ en el caso pilotes simples cargados monolíticamente por primera vez, permitiendo representar el comportamiento no lineal del suelo a lo largo del pilote. Existen dos métodos para encontrar la curva $p - \gamma$ utilizando la información obtenida con el DMT uno propuesto por Robertson et al. (1987) y el otro por Marchetti et al. (1991).

Robertson propuso un método que es una adaptación de métodos anteriores que estimaban las curvas $p - \gamma$ con información de laboratorio. En este método los parámetros que se obtenían antes en laboratorio ahora son obtenidos utilizando los resultados del DMT y además utiliza la siguiente expresión adimensional parabólica:

$$\frac{P}{P_u} = 0,5 \left(\frac{y}{y_c} \right)^{0,33} \quad (C-1)$$

P/P_u : Razón de la resistencia del suelo.

y/y_c : Razón de la deflexión del pilote.

En arcillas, el valor de la deflexión del pilote y_c está en función del esfuerzo de corte no drenado c_u , rigidez del suelo y el esfuerzo efectivo en el terreno:

$$y_c = \frac{23,67 c_u D^{0,5}}{F_c E_D} \quad (C-28-1)$$

y_c : Deflexión del pilote [cm]

D : Diámetro del pilote [cm]

F_c : 10 (como primera aproximación).

La evaluación de la resistencia estática lateral última P_u [kPa].

$$P_u = N_p s_u D \quad (C-3)$$

N_p es un coeficiente de resistencia última adimensional, que puede ser expresado como:

$$N_p = 3 + \frac{\sigma'_{v0}}{s_u} + \left[J \frac{X}{D} \right] \quad (C-4)$$

$$N_p \leq 9$$

X: Profundidad [m].

σ'_{v0} : Esfuerzo vertical efectivo dado en la profundidad X [kPa].

J: Coeficiente empírico igual a 0,5 para arcillas suaves y 0,25 para arcillas duras.

En suelos sin cohesión (arenas), la deflexión de referencia del pilote es calculada considerando el ángulo de fricción, el esfuerzo vertical efectivo, el diámetro del pilote y el módulo del dilatómetro:

$$y_c = \frac{4,17 \sin \phi' \sigma'_{v0}}{E_D (1 - \sin \phi')} D \quad (C-5)$$

La resistencia estática última lateral del suelo es determinada siguiendo dos ecuaciones:

$$P_u = \sigma'_{v0} [D(K_p - K_a) + x K_p \tan \phi' \tan \beta] \quad (C-6)$$

$$P_u = \sigma'_{v0} D [K_p^3 + 2K_0 K_p^2 \tan \phi + \tan \phi - K_a] \quad (C-7)$$

Siendo

σ'_{v0} : Esfuerzo vertical efectivo dado en la profundidad X [kPa].

$K_a: \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$ (Coeficiente activo de empuje lateral de tierra)

$K_p: \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$ (Coeficiente pasivo de empuje lateral de tierra)

$\beta: 45 + \phi'/2$

Marchetti desarrollo un simple y efectivo método para determinar las curvas $p - \gamma$ en arcillas, el cual resulta ser un método de aplicación más directa en relación a los resultados obtenidos con el DMT, ya que no es necesario utilizar las correlaciones para obtener los parámetros geotécnicos del suelo. Proponiendo una ecuación hiperbólica adimensional para relacionar ambas variables:

$$\frac{P}{P_u} = \tanh \left(\frac{E_{si} \gamma}{P_u} \right) \quad (C-8)$$

$$P_u = \alpha K_1 (p_0 - u_0) D \quad (C-9)$$

$$E_{si} = \alpha K_2 E_D \quad (C-10)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{z}{7D} \leq 1 \quad (C-11)$$

E_{si} : Módulo inicial del suelo [MPa].

D : Diámetro del pilote [m].

α : Factor de reducción no dimensional para la profundidad $z < 7D$ ($\alpha = 1$ para $z = 7D$)

K_1 : Coeficiente empírico para resistencia del suelo, asumido como 1,24

K_2 : Coeficiente empírico para la rigidez del suelo $K_2 = 10 \left(\frac{D}{0,5m} \right)^{0,5}$

La Figura C-1 compara los resultados estimados por ambos métodos y con los resultados medidos experimentalmente, donde es posible concluir que ambos métodos entregan buenos resultados y ambos son sensibles a cambios en la rigidez del suelo.

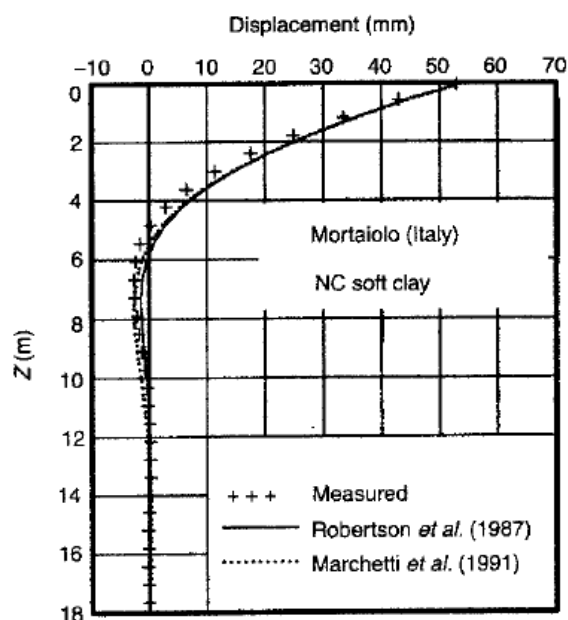


Figura C-1: Comparación entre desplazamientos laterales medidos y estimados para pilotes lateralmente cargados (Marchetti, 1991).

ASENTAMIENTOS DE FUNDACIONES SUPERFICIALES

El DMT ha probado ser útil en la predicción de asentamientos de fundaciones superficiales tanto en arena como en arcilla. En el caso de la arena esta estimación es especialmente provechosa ya que la toma de muestras inalteradas en arenas es prácticamente imposible y la estimación de su compresibilidad es poco precisa. Aunque en teoría los asentamientos pueden ser calculados usando fórmulas unidimensionales o tridimensionales, Burland et al. (1977) sugiere que la fórmula unidimensional debe ser utilizada en todos los casos. Esta recomendación está basada en que las fórmulas unidimensionales y tridimensionales entregan resultados similares la mayoría de las veces; por otra parte, uno de los objetivos del DMT es la determinación precisa de parámetros geotécnicos del suelo, los cuales se utilizan directamente en la compresión unidimensional, que es lograda con simples cálculos (Marchetti 1997), por lo tanto el cálculo de asentamiento utilizando la ecuación

(C-12) es un cálculo directo que no tiene ningún grado de subjetividad ni necesita del juicio o experiencia de quien lo calcula.

Los asentamientos son simplemente calculados como un problema unidimensional:

$$S_{1-DMT} = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{M_{DMT}} \Delta z \quad (C-12)$$

$\Delta\sigma_v$: Incremento de esfuerzo calculado por Boussinesq.

Δz : Incrementos de profundidad asociados a la ejecución del ensayo DMT.

La fórmula anterior está basada en la elasticidad lineal y entrega un asentamiento proporcional a la carga aplicada, no está dentro de su alcance entregar una predicción no-lineal. El esfuerzo aumenta de acuerdo a la formulación de Boussinesq que asume al suelo como un semi-espacio elástico e infinito, donde el cálculo para cada $\Delta\sigma_v$ se discretiza para las n mediciones de M_{DMT} , como muestra la Figura C-2 a continuación:

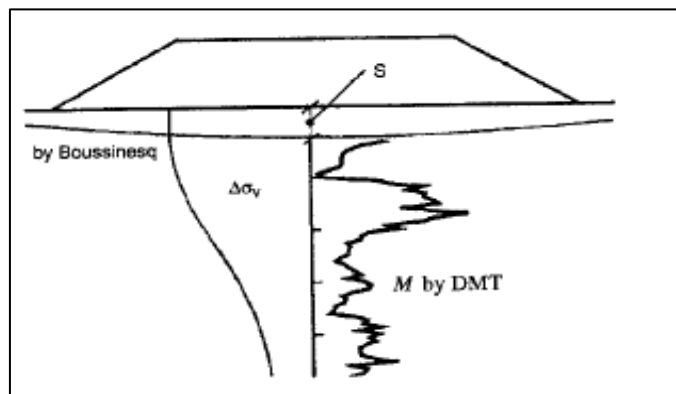


Figura C-2: Cálculo de asentamiento para un suelo cargado por un terraplén, donde es posible apreciar la variación de $\Delta\sigma_v$ y M_{DMT} con la profundidad.

La ecuación (C-12) calcula el asentamiento considerado bajo condiciones de servicio, para un factor de seguridad (F.S.=2,5 a 3,5), ya que M_{DMT} ha sido correlacionado con módulos determinados por retro-análisis para zapatas y losas de fundación.

La validez del método ha sido confirmada por un gran número de concordancias observadas entre los asentamientos medidos y los predichos con el DMT. Schmertmann (1986) compiló medidas de 16 diferentes lugares y varios tipos de suelos, incluyendo arena, limo, arcilla y suelos orgánicos; con asentamientos medidos entre 3 a 2850 [mm]. Este trabajo se observa en la Tabla C-1 en donde se observa que la relación entre asentamientos medidos y asentamientos calculados es aceptable, con un promedio de asentamiento observado/calculado de 1,18 y una desviación estándar de 0,38

Tabla C-1: Comparación entre asentamientos calculados y asentamientos observados, 16 casos documentados (Schmertmann, 1986).

No.	Location	Structure	Compressible soil	Settlement (mm)			Ratio DMT/Measured Settlement
				DMT	**	Measured	
1	Tampa	Bridge pier	Highly OC clay	*25	b, d	15	1.67
2	Jacksonville	Power plant (3 structures)	Compacted sand	*15	b, o	14	1.07
3	Lynn Haven	Factory	Peaty sand	188	a	185	1.02
4	British Columbia	Test embankment	Peat & organic soils	2030	a	2850	0.71
5a	Fredrickton	Surcharge	Sand	*11	a	15	0.73
5b	"	3' plate load test	Sand	*22	a	28	0.79
5c	"	Building (raft foundation)	Quick clayey silt	*78	a	35	2.23
6a	Ontario	Road embankment	Peat	*300	a, o	275	1.09
6b	"	Building	Peat	*262	a, o	270	0.97
7	Miami	4' plate load test	Peat	93	b	71	1.31
8a	Peterborough	Apartment building	Sand & silt	*58	a, o	48	1.21
8b	"	Factory	Sand & silt	*20	a, o	17	1.18
9	Peterborough	Water tank	Silty clay	*30	b, o	31	0.97
10a	Linkoping	2x3 m plate	Silty sand	*9	a, o	6.7	1.34
10b	"	1.1x1.3 m plate	Silty sand	*4	a, o	3	1.33
11	Sunne	House	Silt & sand	*10	b, o	8	1.25

* Ordinary Method used (1-D settlement, no adjustment of M for vertical effective stress during loading)

** b Settlements calculated before the event

o Settlements calculated by other than the Author

a Settlements calculated after the event

d Dilatometer advanced by driving with SPT hammer

Hayes (1990) confirmo esta buena relación entre asentamiento calculado/medido para un amplio rango de asentamientos, propuso un gráfico en donde los datos observados se encuentran dentro de una banda cuyos límites son $\pm 50\%$ del valor esperado utilizando la fórmula unidimensional, la Figura C-3 presenta el trabajo de Hayes.

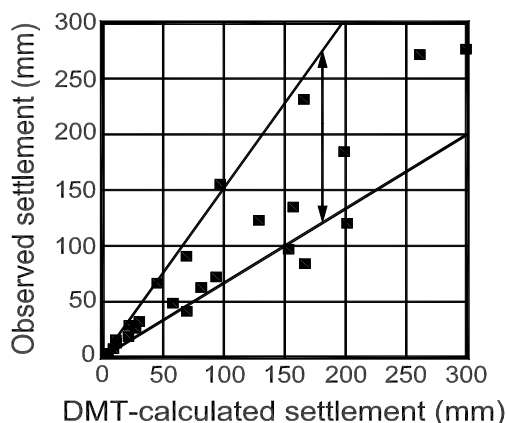


Figura C-3: Asentamientos observados vs calculados por DMT (Hayes, 1990).

MÓDULO M_{DMT} EN EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS

La compresión del módulo de rigidez del ensayo DMT es fundamental para entender el tipo de asentamiento obtenido de acuerdo al tipo de suelo. En arenas al utilizar la ecuación (C-12) se obtiene la componente inmediata de asentamiento, la cual es la más importante para este tipo de suelos. En el caso de arcillas el asentamiento calculado por la ecuación (C-12) representa una primera estimación para calcular el asentamiento primario por consolidación (no incluye alguna componente

del asentamiento inmediato ni del asentamiento secundario) si M_{DMT} se toma como el promedio de E_{oed} derivado de la curva edométrica en el rango esperado de esfuerzos.

Es importante destacar que, en arcillas altamente sobreconsolidadas, las curvas edométricas muestran un pico o una reducción de pendiente dramática alrededor del punto de presión de preconsolidación p'_c , como se aprecia en la Figura C-4. En estos casos M_{DMT} podría ser un promedio inadecuado si la sobrecarga vertical supera a p'_c , por lo tanto el modulo promedio a ser usado debería ser escogido como el modulo promedio en el intervalo entre el valor inicial y el valor final del esfuerzo vertical, esto podría hacerse si se contará con la curva e-log p del edómetro, pero no puede hacerse si sólo se cuenta con el módulo (M_{DMT}) confinado a la tensión geoestática (σ'_{v0}), dado que M_{DMT} entrega información de la curva e-log p sólo en el punto de tensión, por lo tanto, cualquier predicción de asentamiento a niveles de esfuerzos mayores implica ciertas imprecisiones. Sin embargo, en muchas arcillas comunes y en la mayoría de las arenas, la fluctuación de M_{DMT} alrededor de p'_c es moderada, por lo tanto, el error de asumir a M_{DMT} constante es a menudo relativamente aceptable para propósitos prácticos

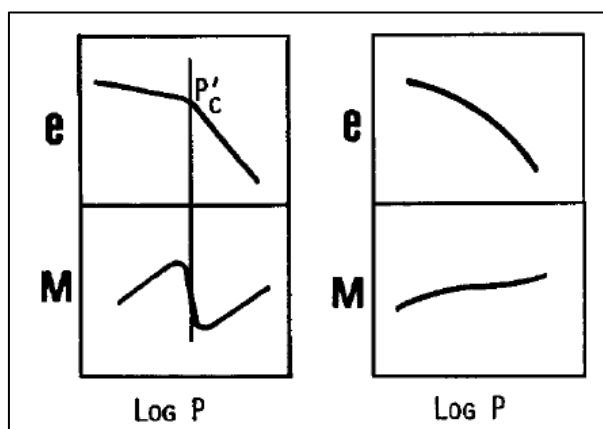


Figura C-4: Variación esquemática del módulo con la carga vertical aplicada en un edómetro, (Marchetti, 2015).

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

Los procedimientos utilizados para estimar el potencial de licuefacción en depósitos de suelos, están basados esencialmente por conceptos desarrollados por Seed e Idriss (1971), en donde éste depende directamente de la Relación de Resistencia Cíclica (CRR). Existen dos enfoques paralelos independientes para encontrar la resistencia a la licuefacción utilizando el DMT y SDMT, uno viene de K_D para arenas limpias ($CF < 5\%$) y el otro de v_s , usando correlaciones $CRR - K_D$ y $CRR - v_s$.

La correlación $CRR - K_D$ ha sido sugerida debido a la evidente sensibilidad de K_D frente a la historia de tensiones, envejecimiento, estructura del suelo, cementación y densidad relativa. La capacidad de K_D de reflejar el depósito estructurado de arena es un elemento clave en la correlación $CRR - K_D$, ya que el efecto de la estructura es considerado como un factor importante en el fenómeno de licuefacción. Varios métodos fueron desarrollados para evaluar el potencial de licuefacción en arenas limpias con bajo contenido de finos, diferenciándolos entre los que son suelos licuables y los que no lo son. Al revisar la Figura C-5 es posible notar que los potenciales de licuefacción sugeridos

por Robertson & Campanella (1986) y Marchetti (1982) muestran grandes diferencias; pero al fijarse en los métodos restantes, tales como aquellos derivados de procedimientos basados en ensayos CPT y SPT, el método de Reyna & Chameau (1991) y Monaco et al. (2005) es posible notar que todos entregan predicciones consistentes.

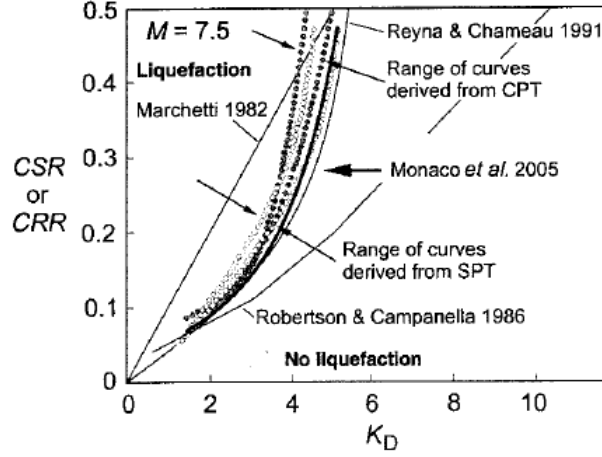


Figura C-5: Correlaciones existentes entre CRR- K_D para evaluar el potencial de licuación.

Estos métodos presentan una pequeña diferencia y pueden ser usados para evaluar el potencial de licuefacción para un terremoto de magnitud $M_w = 7,5$ en arenas limpias. Para otras magnitudes de terremotos se deberán aplicar factor de escala. La fórmula de Monaco es presentada a continuación:

$$CRR_{7,5} = 0,0107K_D^3 - 0,0741K_D^2 + 0,2196K_D - 0,1306 \quad (C-13)$$

Marchetti sugiere a partir de la experiencia disponible que, para terremotos de ciertas magnitudes, una arena limpia (natural o relleno de arena) se encuentra adecuadamente a salvo de la licuefacción para los siguientes valores de K_D :

- Áreas no sísmicas: $K_D > 1,7$
- Áreas de baja sismicidad ($a_{max}/g=0,15$): $K_D > 4,2$
- Áreas de mediana sismicidad ($a_{max}/g=0,25$): $K_D > 5,0$
- Áreas de alta sismicidad ($a_{max}/g=0,35$): $K_D > 5,5$

Por otro lado, el uso de v_s para obtener CRR es conocido, en donde la velocidad de la onda de corte es obtenida para pequeñas deformaciones para terremotos de magnitud $M_w = 7,5$. Para estimar CRR a partir de v_s es el gráfico de Andrus y Stokoe (2000).

$$CRR_{7,5} = \left[0,022 \left(\frac{K_{\alpha 1} v_{s1}}{100} \right)^2 + 2,8 \left(\frac{1}{v_{s1}^* - K_{\alpha 1} v_{s1}} - \frac{1}{v_{s1}^*} \right) \right] K_{\alpha 2} \quad (C-14)$$

v_{s1} : Velocidad de ondas de corte estandarizada para una sobrecarga de 1 [kg/cm²] (presión atmosférica p_a de 100 [kPa]).

$$v_{s1} = v_s \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,25} \quad (C-15)$$

v_{s1}^* : Valor máximo de v_{s1} para que ocurra licuefacción, de acuerdo al gráfico de Andrus y Stokoe (2000) $v_{s1}^* \approx 200$ [m/s] para suelos con contenido de fino de 20 % (ver Figura C-6).

$K_{\alpha 1}$ y $K_{\alpha 2}$: son factores de corrección, que toman el valor 1 cuando los suelos son no cementados del holoceno (12000 años de antigüedad hasta el presente).

Algunos datos experimentales y un programa comparativo con estanques de ensayos de la Universidad de Corea (Lee et al. 2010) han demostrado que K_D es considerablemente más sensible que q_c respecto a la historia de tensiones (incluyendo el envejecimiento), además q_c es casi independiente del estado de deformaciones histórico a lo largo de la línea K_0 . La historia de tensiones es un importante factor en el fenómeno de licuefacción debido a su apreciable influencia en el valor de CRR, no es de extrañar que, en ausencia de ésta, la estimación de CRR a partir del ensayo CPT resulte en una amplia dispersión, por lo tanto, la mayor sensibilidad de K_D a la historia de tensiones sugiere que K_D pudiera tener una relación más estrecha con CRR que q_c .

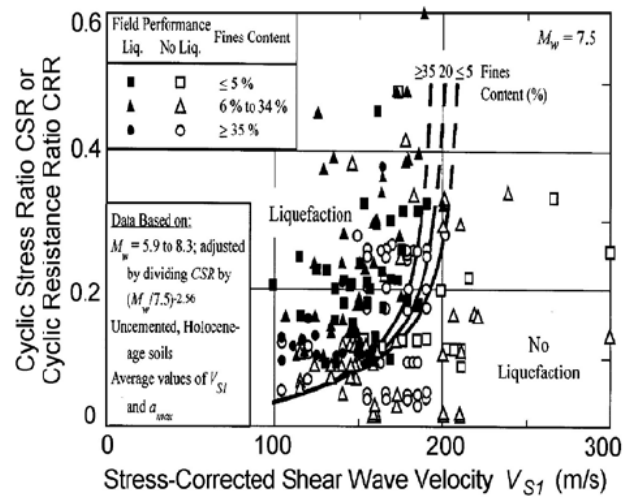


Figura C-6: Potencial de licuefacción determinado a partir de v_s (Andrus & Stokoe, 2000).

Marchetti enfatiza el uso de la aproximación $CRR - K_D$ destacando que K_D es más sensible que v_s en factores tales como la historia de tensiones y el envejecimiento, por ejemplo, Las crestas OCR (las cuales improbablemente sufrirían licuefacción) son certeramente reconocidas por K_D , pero casi no se perciben usando el método asociado con v_s , por otro lado, K_D es sensible a la densidad relativa y a parámetros de estados los cuales mejoran el CRR. Además, v_s es una medición correspondiente a una deformación muy pequeña y se correlaciona desfavorablemente con un fenómeno de deformaciones mucho más grandes como es el caso de la licuefacción.

ANEXO D. RESULTADOS PARA DISTINTOS GRADOS DE REFINADO Y ÁREAS DE DOMINIO

Tabla D-1: Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y áreas de dominio para una muestra densa confinada a 50 [kPa].

Radio CC Gr. Refinado		GC=Fine; RC=0; RL=0				GC=Fine; RC=1; RL=0				GC=Fine; RC=1; RL=1				GC=Fine; RC=1; RL=2			
		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm	
Lectura presión		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
X=13 [mm]	265 cm	-57,98	-536,35	-58,95	-495,29	-45,70	-571,22	-51,70	-533,05	-49,32	-570,76	-53,71	-556,28	-39,72	-596,63	-37,63	-578,53
	53 cm	-74,25	-823,96	-73,48	-782,99	-59,90	-812,44	-772,84	-788,23	-57,33	-886,45	-54,11	-874,07	-46,22	-861,33	-47,48	-826,70
	100 cm	-77,30	-957,76	-77,52	-950,58	-95,47	-944,79	-83,43	-822,22	-87,95	-1068,13	-85,39	-991,68	-68,23	-1065,37	-70,49	-995,84
	150 cm	-92,52	-1038,56	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	-79,05	-1048,67	-90,91	-987,60	-69,24	-989,12	-78,67	-883,73
X=10 [mm]	265 cm	-59,22	-552,90	-60,37	-507,45	-44,84	-528,12	-51,70	-499,13	-50,26	-578,77	-54,67	-560,82	-39,54	-595,41	-37,35	-570,80
	53 cm	-76,32	-804,48	-75,73	-717,64	-59,67	-770,10	-56,65	-704,94	-57,21	-905,24	-52,99	-889,27	-46,15	-845,58	-47,28	-811,20
	100 cm	-77,17	-828,64	-77,40	-800,97	-97,74	-1017,15	-85,47	-863,04	-88,51	-1115,25	-85,24	-1061,11	-68,25	-1069,58	-70,05	-994,07
	150 cm	-93,20	-920,29	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	-79,62	-1076,71	-91,88	-1033,67	-68,37	-1011,82	-78,72	-935,48
X=6,5 [mm]	265 cm	-59,47	-574,55	-61,12	-530,33	-46,08	-558,27	-52,13	-524,94	-49,85	-545,27	-53,42	-516,80	-39,32	-594,28	-37,32	-579,80
	53 cm	-67,78	-311,83	-71,61	-656,05	-59,49	-804,86	-58,41	-740,68	-57,77	-822,73	-54,07	-804,09	-46,59	-836,72	-47,82	-807,93
	100 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-97,60	-1051,68	-86,42	-891,21	-89,43	-1059,78	-87,19	-935,13	-67,90	-1098,03	-70,20	-1025,72
	150 cm	No aplica	No aplica	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	-80,54	-988,96	-92,10	-919,88	-69,70	-956,24	-78,35	-881,69
X=6 [mm]	265 cm	-59,47	-302,02	-58,01	-208,73	-47,10	-558,19	-53,00	-524,63	-50,77	-596,74	-55,38	-564,20	-39,56	-600,04	-37,33	-580,06
	53 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-60,05	-925,15	-58,84	-901,22	-59,47	-843,90	-55,13	-794,13	-46,51	-864,63	-47,19	-831,42
	100 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-87,95	-543,56	-76,02	-344,55	-87,85	-1000,27	-87,79	-925,89	-69,53	-1019,12	-71,85	-929,26
	150 cm	No aplica	No aplica	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	No es posible calcular	-78,76	-1192,95	-90,58	-1173,84	-71,35	-954,90	-79,20	-879,34

Tabla D-2: Esfuerzos promedios calculados utilizando el método continuo para distintos grados de refinamientos, radios y áreas de dominio para una muestra suelta confinada a 50 [kPa].

Radio CCGr. Refinado		GC=Fine; RC=0; RL=0				GC=Fine; RC=1; RL=0				GC=Fine; RC=1; RL=1				GC=Fine; RC=1; RL=2			
		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm		15 mm		200 mm	
Lectura presión		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
X=13 [mm]	265 cm	-23,47	-345,92	-23,11	-336,12	-22,29	-370,94	-22,29	-361,19	-20,47	-370,90	-21,41	-360,95	-20,24	-393,52	-19,78	-381,29
	53 cm	-31,02	-502,06	-31,77	-439,50	-27,10	-508,07	-26,92	-472,72	-24,40	-555,65	-24,72	-521,58	-23,56	-545,97	-23,90	-509,32
	100 cm	-31,56	-463,75	-31,44	-454,43	-31,70	-465,55	-41,66	-415,52	-37,65	-523,12	-38,59	-491,07	-36,48	-529,76	-36,19	-493,31
	150 cm	-40,70	-512,42	-43,54	-450,19	-37,43	-486,77	-37,33	-461,71	-32,46	-511,25	-32,54	-491,00	-35,98	-503,22	-35,93	-453,86
X=10 [mm]	265 cm	-22,96	-358,61	-22,57	-352,95	-22,13	-351,24	-22,17	-335,77	-20,30	-374,75	-21,26	-364,32	-20,27	-390,45	-19,80	-377,06
	53 cm	-32,00	-501,40	-32,81	-418,91	-26,71	-511,85	-26,45	-467,07	-23,58	-556,04	-23,93	-524,54	-23,53	-540,21	-23,92	-502,53
	100 cm	-31,44	-385,75	-31,38	-383,29	-31,30	-495,13	-42,40	-434,19	-36,82	-542,64	-37,71	-519,95	-36,05	-530,47	-35,76	-493,08
	150 cm	-39,16	-447,44	-41,66	-345,01	-37,94	-423,26	-37,84	-396,37	-32,77	-517,76	-32,82	-506,10	-35,70	-507,36	-36,24	-465,46
X=6,5 [mm]	265 cm	-22,39	-364,73	-21,99	-359,17	-22,20	-358,06	-22,24	-352,53	-20,11	-356,79	-21,05	-340,64	-20,08	-392,02	-19,61	-379,48
	53 cm	-28,47	-338,11	-26,04	-481,91	-28,03	-505,13	-24,45	-472,60	-23,89	-518,30	-24,29	-484,06	-23,48	-536,04	-23,99	-499,65
	100 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-31,96	-505,03	-38,76	-438,36	-37,51	-522,26	-39,92	-465,15	-35,68	-542,55	-35,41	-503,76
	150 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-39,40	-489,58	-39,29	-459,77	-32,18	-483,29	-32,25	-466,93	-36,72	-473,74	-36,73	-447,42
X=8 [mm]	265 cm	-23,18	-228,46	-23,01	-170,60	-22,45	-358,37	-22,52	-352,72	-20,88	-380,12	-21,77	-364,48	-20,22	-396,82	-19,70	-382,13
	53 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-27,50	-572,38	-27,22	-538,83	-23,72	-532,69	-24,70	-480,05	-23,93	-549,93	-24,41	-517,91
	100 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-29,18	-329,99	-43,92	-230,75	-37,84	-483,83	-38,98	-457,06	-36,01	-507,34	-35,64	-467,64
	150 cm	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	-33,51	-582,21	-33,44	-555,96	-36,35	-472,00	-37,62	-443,52