



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE ESTÉRIL MINERO MEDIANTE ENSAYO TRIAxIAL DE MATERIAL PREVIAMENTE CONSOLIDADO A ALTAS PRESIONES

Memoria de Título presentada por

Pablo Emilio Galleguillos Morchio

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba

Octubre 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE ESTÉRIL MINERO
MEDIANTE ENSAYO TRIAXIAL DE MATERIAL PREVIAMENTE
CONSOLIDADO A ALTAS PRESIONES**

AUTOR:

PABLO EMILIO GALLEGUILLOS MORCHIO

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía		
Miembro 1 Comisión		
Miembro 2 Comisión		

Valparaíso, Chile, Octubre de 2024

Agradecimientos

Primero, gracias con un abrazo al cielo a mis abuelos Ángel Morchio D. y Ana Tello G., partieron con las ganas de verme con un título, esto va dedicado especialmente a ustedes. Agradecer a mi madre, Paulina Morchio T., por estar en todo momento a mi lado, apoyándome en cada proceso de la vida y educación, por todos los consejos y retos que nos llevan a estas instancias, nada de esto sería posible sin ti. A mi padre, Pablo Galleguillos S., mi tía-madrina, Ana Morchio T., y a toda mi familia por siempre estar presente con amor, preocupación y apoyo. A mis hermanos y hermanas de la vida, los que fui encontrando durante estos años de universidad, sin los cuales no hubiera superado todos los altos y bajos vividos, en especial a Jorge Moya, Nicolás Bustamante, Gerson Aguilera, Jorge Rubio, Catalina Gonzales, Javiera Soto, Constanza Hernández, Cristóbal Pino y muchos más. A todo el equipo de LEMCO que estuvo siempre dispuesto a enseñarme, ayudarme y acompañarme en el proceso de ensayos de la memoria, gracias don René, Jaime, don Jorge, Michael, Cristian, Jean. Gracias a mi profesor guía Gonzalo Suazo, quien siempre me estuvo apoyando, dando oportunidades de crecer y principalmente con quien descubrí esta área de la ingeniería civil que tantas alegrías me ha traído. No pueden faltar las gracias a todos mis ayudados Rafita, Christopher, Zuleta, Gus, entre tantos que fueron dejando huella generación tras generación y fueron una parte esencial en la motivación para perfeccionarme en el área geotécnica. Y como no, un especial agradecimiento a mi pareja Camila Sereño D., quien me dio la motivación y ese empujoncito que me faltaba para darle con todo a sacar mi título de una vez por todas, gracias por todo el amor, apane y compañía.

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE ESTÉRIL MINERO MEDIANTE ENSAYO TRIAXIAL DE MATERIAL PREVIAMENTE CONSOLIDADO A ALTAS PRESIONES

Pablo Emilio Galleguillos Morchio¹, Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Palabras claves: Estéril minero, altas presiones, ensayo triaxial, consolidación, rotura de partículas.

Resumen

En Chile, la industria minera genera grandes volúmenes de roca estéril, que se depositan en estructuras geotécnicas a gran escala, donde el diseño adecuado de estas estructuras es esencial para evitar desastres ambientales y económicos, especialmente considerando la actividad sísmica del país y la susceptibilidad del estéril a la rotura de partículas bajo altas presiones de confinamiento.

La presente memoria se enfoca en la caracterización de la respuesta al corte del estéril minero mediante ensayos triaxiales en material previamente consolidado a altas presiones y propone una nueva metodología para analizar la resistencia al corte del estéril, combinando ensayos de consolidación unidimensional con ensayos triaxiales a una presión de referencia. Este enfoque permite acondicionar la granulometría del material a la esperable bajo un determinado confinamiento, y por ende, se modifica su respuesta ante esfuerzos de corte de manera que se ensaye una muestra representativa. Este estudio busca responder interrogantes dejadas por investigaciones anteriores, que estaban limitadas a menores presiones de confinamiento dadas las capacidades de los equipos disponibles.

Se ejecutaron ensayos a estéril de roca clasificada como pórfido cuarzo-monzonítico de la mina Antamina en Perú, utilizando una distribución granulométrica sintética para simular escenarios desfavorables para el fenómeno de rotura de partículas. Los resultados muestran que el material experimenta dos bandas de presión donde ocurre una significativa rotura de partículas, en las cuales se reduce la resistencia al corte y disminuye bruscamente el volumen de las probetas ensayadas. Los hallazgos evidencian que la resistencia al corte disminuye a medida que aumenta la presión de confinamiento, y el comportamiento del material se vuelve más estable bajo presiones mayores debido a la rotura de partículas y el consiguiente reacomodo de estas. Obteniendo además los parámetros resistentes de diseño para el rango de 0 a 600 [kPa], antes de la primera banda de rotura.

En conclusión, el estudio resalta la importancia de realizar ensayos a altas presiones para caracterizar acertadamente la respuesta del estéril minero ante esfuerzos, y así mejorar el diseño de estructuras geotécnicas. Aunque el método propuesto no representó completamente el comportamiento real del material, los resultados aportan información valiosa para futuras construcciones de pilas de estéril a gran escala.

1 Contextualización

En Chile la industria minera es uno de los sectores con mayor impacto en el producto interno bruto, con alrededor de un veinte por ciento de participación (Cardemil Magdalena, 2023). La explotación de cobre es el mayor aportante, con una producción de 5.251 miles de toneladas para el año 2023 (Consejo Minero, 2024). Del material extraído, sólo se aprovecha el 0.7 por ciento en promedio según datos de la Comisión Chilena del Cobre (2023). El otro 99.3 por ciento corresponde a desechos de roca, lo que se conoce como estéril minero, y a relaves que son depositados en estructuras que deben ser estables, ambientalmente sustentables y económicamente factibles (Bard et al., 2012).

Errores en el diseño de las estructuras de acopio provoca susceptibilidad a fallar y, por consiguiente, impactar significativa y negativamente al medio ambiente. Dentro de estos efectos se encuentra la contaminación de aguas y suelos de manera irreversible, la pérdida de vidas y pérdidas monetarias (Islam & Murakami, 2021). En el estudio realizado por Islam y Murakami (2021) se analiza este impacto recopilando información de fallas de presas de relaves a nivel histórico y global. Dentro de estas predominan las gatilladas por terremotos, donde Chile tiene la mayor cantidad de casos, por lo tanto, es de suma relevancia proponer soluciones y conocimiento que permita evitar esto.

En estudio anteriormente citado concluyen que uno de los métodos constructivos más seguros es el denominado “Dry stack”, o pila seca en español, el cual consiste en depositar el relave mediante estado seco en pilas autosoportantes. La desventaja de este método es el alto costo y la complejidad de colocación y compactación cuando se utiliza equipos de construcción convencionales lo que limita la aplicación de este a minas de pequeña o mediana escala (Burden & Wilson, 2023). En el estudio realizado por Burden & Wilson (2023) se demuestra que la adición de estéril de roca, almacenando el material como commingling de estéril y relave, permite un apilamiento más rápido, sin compactación y con mejor desempeño geotécnico, lo que lo convierte en una opción viable para el manejo de residuos en las grandes mineras.

El uso del estéril como componente estructural conlleva el desafío de caracterizar su respuesta al corte bajo esfuerzos confinantes significativos, que representan la altura de la pila o estructura geotécnica en la que se utilice. Según lo señalado por Bard et al. (2012), en el caso particular de Chile y países con geografía de pendientes pronunciadas las estructuras de acopio pueden alcanzar alturas significativas, hasta 1000 metros, lo que implica un confinamiento en la base de alrededor de 10 [MPa]. Además, en ese estudio se indica que ese nivel de confinamiento el suelo sufre rotura de partículas.

Lade et al. (1996) indica que dicho fenómeno corresponde a la fractura de las partículas componentes de un suelo ante esfuerzos mayores a los admisibles por las mismas. Esto afecta a la distribución granulométrica, la resistencia al corte, la capacidad de drenaje. Materiales clasificados como grava, de cantos angulosos y mal graduados, como los estériles de roca, son susceptibles a ello. Por esto, es necesario caracterizar los materiales a utilizar en estructuras geotécnicas en un amplio rango de presiones y así tener el conocimiento necesario para un correcto diseño.

Estudios como los de Linero-Molina et al. (2007) y Bard et al. (2012) han buscado caracterizar estériles de roca a partir de ensayos triaxiales de grandes dimensiones y alto confinamiento para caracterizar la rotura de partículas y sus efectos en la respuesta al corte. Estos se ejecutaron en el laboratorio (IDIEM) de la Universidad de Chile, el cual cuenta con equipos de grandes dimensiones (180x100 [cm]) y sistemas hidráulicos de control de presión de alta resistencia (Hasta 2500 [MPa]), los que son escasos y de alto costo.

En el laboratorio de Geotecnia UTFSM se llevó a cabo la investigación “Mezclas relaves-estériles commingling – BHP” (Universidad Técnica Federico Santa María, 2023), la cual caracteriza la respuesta al corte de distintos materiales hasta los 600 [kPa] de confinamiento. No se alcanzan mayores presiones debido a las capacidades del controlador de presión, el cual tiene como límite de seguridad los 800 [kPa]. También entregan resultados de consolidación unidimensional, realizados entre los 0 y los 2400 [kPa], en los que se observan cambios de pendientes asociados teóricamente a rotura de partículas, pero no se estudia los cambios granulométricos en dichos puntos ni se ejecutan ensayos triaxiales a las muestras consolidadas. De esto surge las interrogantes de cómo varía la granulometría a medida que aumenta el

confinamiento, y si ejecutar ensayos triaxiales a una presión de referencia con el material consolidado a esas presiones puede otorgar resultados representativos que permitan obtener la respuesta para presiones superiores a las alcanzadas en ensayo triaxial.

Bajo este marco, la presente memoria busca estudiar una nueva aproximación para obtener los parámetros resistentes en el rango de presiones de los 0 a 2400 [kPa] y complementar la investigación de Geotecnia USM con una nueva técnica de ensayo que combina ensayos de consolidación con triaxiales. Esta consiste ejecutar ensayos triaxiales a una presión de referencia, de 100 [kPa], utilizando muestras de estéril acondicionado previamente mediante consolidación unidimensional hasta la presión que se quiera conocer la respuesta. El sustento de esta aproximación va en que la resistencia del material está condicionada por la compresibilidad de la matriz granular del material, asociado al fenómeno de rotura de partículas (Bard et al., 2012). Por lo tanto, si se consolida el material a la presión de interés, se induce la fractura y por ende se condiciona su resistencia al corte, lo que permite observar el cambio de esta a lo largo del rango de interés aun cuando se realicen los ensayos triaxiales a bajo confinamiento. Todo esto con la finalidad de explorar nuevas técnicas que, de otorgar resultados concordantes con los antecedentes disponibles, permitan estudiar este tipo de materiales de manera accesible y así ampliar los conocimientos necesarios para un correcto diseño de estructuras.

2 Marco Teórico

2.1 Material en estudio

En la presente memoria se caracteriza estéril proveniente de la minera Antamina ubicada en la provincia de Huari, región de Ancash, Perú. Se dispone de muestras del lote “M1-D/A” (Figura 1) que contienen todo el material bajo 1 y media pulgada proveniente del proceso de chancado. La roca extraída para dicho proceso corresponde a pórfidos cuarzo-monzoníticos, los cuales contienen principalmente minerales de cobre y en menor medida zinc, entre otros (Cueva et al., 2017). Esta roca tiene características geológicas y mineralógicas similares a las rocas que se extraen en las mineras del país (Kotthoff Karen, 2020) por lo cual, las conclusiones y consideraciones del presente estudio son aplicables a material proveniente de mineras de la parte norte en la zona de la cordillera de Los Andes.



Figura 1. Estéril M1-D/A. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Commingling

Uno de los usos para este material es en mezclas de estéril minero con relaves, denominadas commingling, a un razón de mezcla R. Dicha razón hace referencia a la cantidad de masa de estéril respecto a la masa de relave (Wickland et al., 2006). En el estudio realizado por Burden & Wilson (2023), basado en la investigación de Wickland (2006), se ensayan muestras a distintas razones de mezclas desde relave puro hasta estéril puro (Figura 2). En dicho estudio se determina que existe un punto óptimo de mezcla denominado “Just-filled”, llenado justo en español, el cual presenta mejores características geotécnicas. En ese punto el estéril y el relave actúan en conjunto. Concluyen también, que el comportamiento del commingling está controlado por el fenómeno de rotura de partículas que afecta al estéril, por lo que es relevante conocer en detalle el comportamiento de dicho material.

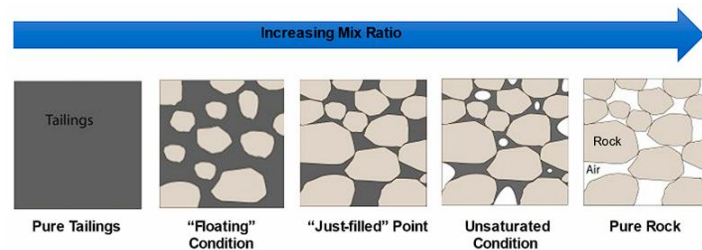


Figura 2. Esquema de razones de mezcla. Fuente: Burden & Wilson (2023).

2.3 Rotura de partículas

Según Lade et al. (1996) este fenómeno corresponde a la falla de las partículas componentes de un suelo cuando el estado tensional al que está sometido supera la resistencia a la compresión de estas. En dicho estudio se indica que las propiedades como el comportamiento tensión-deformación, la resistencia al corte, el cambio volumétrico, la evolución de la presión de poros y la permeabilidad dependen de la integridad de las partículas o cantidad de fractura debido a cambios en la presión de confinamiento.

Además, se indica que este fenómeno aumenta su ocurrencia a medida que aumenta el tamaño de partículas, esto debido a que partículas más grandes contienen más fallas y por ende tienen una mayor

probabilidad que se rompa en dicho punto. Otro factor que influye en la rotura es la angularidad de las partículas, entre más angulosas sean las partículas más fácil se fracturan por la concentración de esfuerzos en su dimensión más estrecha o en los puntos angulares. También afecta el que tan bien graduado y que tan denso está el suelo, suelos mal graduados y con baja densidad tienen a fracturarse con mayor facilidad. Es por esto por lo que los estériles se ven afectados por dicho fenómeno, en general, corresponden a gravas mal graduadas, de grano anguloso y depositados en las pilas por volteo, es decir, a baja densidad. En base a lo anterior, se dice que es necesario estudiar el comportamiento de estériles si se busca diseñar estructuras de gran altura y por ende grandes esfuerzos confinantes.

Para cuantificar este fenómeno, en el presente estudio se utiliza el parámetro de rotura de partículas B_{10} (Ecuación 1) propuesto en el estudio de Lade et al. (1996). Dicho parámetro tiene como valor mínimo 0, indicando que no existe rotura de partículas, y valor máximo 1, indicando infinita rotura de partículas. Se selecciona dicho factor dado a que fue propuesto para el estudio de materiales granulares, junto con la facilidad de aplicación, ya que solo requiere de un análisis granulométrico.

$$B_{10} = 1 - \frac{D_{10f}}{D_{10i}} \quad (1)$$

Donde: B_{10} es el factor de rotura de partículas propuesto por Lade et al. (1996), D_{10f} es el diámetro por el que pasa el 10% de la muestra post-ensayo y D_{10i} es el diámetro por el que pasa el 10% de la muestra pre-ensayo.

2.4 Ensayos previos de IDIEM

El laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile ha ejecutado diversos estudios para estudiar estériles mineros, ya que cuenta con un equipo triaxial de 180 [cm] de altura por 100 [cm] de diámetro y soporta hasta 2500 [kPa] de confinamiento. Equipos como ese permiten ensayar suelos con diámetro nominal superior al limitado en las normas ASTM de ensayos triaxiales estándares pero escasos, de alto costo y los laboratorios que lo poseen tienen largas listas de espera para la ejecución.

Uno de los estudios que se han llevado a cabo es la caracterización del estéril minero de CODELCO división Andina (CAD) de Linero-Molina et al. (2007). En este se determina que el estéril proviene de rocas porfídicas y granodioríticas de alta resistencia, con partículas angulares filosas, gravedad específica de 2.7 [-] sobre la malla número 4 y 2.8 [-] bajo dicha malla. La granulometría original del material clasifica al material como una grava mal graduada, con alrededor de un 6% de arenas y finos, y diámetro máximo nominal (D_n) de 406 [mm]. La granulometría (Anexos A) se ajustó debido a que el equipo admite un valor de D_n máximo de 200 [mm], para ello realizaron 2 métodos: el truncamiento, cortar el material dejando solo las partículas menores al diámetro de interés, y el de granulometría paralela, replicar la granulometría escalando la curva conservando la forma de esta.

Respecto a los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales (Anexos B), se observa que el esfuerzo de corte tiene un comportamiento lineal hasta un 5% de deformación axial, posterior a lo cual la pendiente disminuye hasta alcanzar un valor mínimo al 15 % de deformación. En cuanto a la resistencia al corte, tiene un comportamiento no lineal y va disminuyendo a medida que aumenta el esfuerzo confinante. Esto se observa a partir de la razón del esfuerzo de corte normalizado por la presión de confinamiento, la cual disminuye a medida que incrementa el confinamiento, estabilizándose a partir de los 2 [MPa]. Con esto los valores de ángulos de fricción varían entre los 51° a los 32° en las presiones de confinamiento desde los 0.18 a los 4 [MPa].

Además, se dice que el material tiene un comportamiento contractivo – dilatante bajo los 200 [kPa] y a medida que aumenta el confinamiento este pasa a contractivo. Se observa también que el material sufre rotura de partículas a partir de las granulometrías pre y post ensayos (Anexos C), donde se observa una disminución en la masa retenida en los tamices de mayor diámetro y un aumento en la masa retenida en los tamices más finos.

2.5 Ensayos previos de Geotecnia UTFSM

También, el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Técnica Federico Santa María ha investigado estériles de roca con la finalidad de determinar la razón de mezcla óptima R a utilizar en proyectos de la mina Antamina. En dicho estudio se caracterizaron los materiales componentes en ensayos de propiedades índices, resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad. En particular para la presente investigación son relevantes los resultados y conclusiones acerca del estéril, ya que se utilizan como valores esperables de los resultados experimentales.

El material utilizado corresponde a una muestra de granulometría truncada a 1 pulga de diámetro máximo nominal, no se dispone de la granulometría original. A partir de la distribución granulométrica del material (Anexos D) se dice que clasifica como grava mal graduada (GP), no plástica, con 83.3% de grava, 12.3% de arena y 4.4% de fino. Además el material tiene una gravedad específica de 2.73, una densidad mínima de $1.50 \text{ [T/m}^3\text{]}$ y una densidad máxima de $1.75 \text{ [T/m}^3\text{]}$.

Los ensayos triaxiales consolidados drenados se realizaron a 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 [MPa], donde se observa un comportamiento contractivo. En cuanto al ángulo de fricción (Anexos E), si se consideran todas las presiones de ensayo tiene un valor de 36° , pero si se consideran solo las primeras 2 presiones tiene un valor de 41° con lo que se evidencia deterioro a medida que aumenta el esfuerzo confinante.

Finalmente, a partir de los ensayos de consolidación unidimensional se observa que la curva de compresibilidad (Anexos E) sufre un quiebre al pasar los 0.4 [MPa] debido al reacomodo de las partículas asociado a la rotura de estas, lo cual se comprueba por los análisis granulométrico pre y post ensayo (Anexos F).

2.6 Caso de estudio

Las interrogantes que queda sin resolver en la investigación presentada en el punto anterior son:

- ¿Qué tanto más decae la resistencia al corte si aumenta el esfuerzo confinante pasado el rango cubierto?
- ¿Cuál es el grado de rotura de partículas del material y cómo varia si aumenta el esfuerzo confinante?
- ¿Cómo caracterizar el material a presiones mayores con los equipos limitados disponibles?

La presente memoria surge como respuesta a estas interrogantes y plantea una nueva aproximación a la caracterización de la respuesta al corte combinando el ensayo de consolidación unidimensional con el ensayo triaxial basados en la teoría de rotura de partículas y la de consolidación de los suelos. Esta técnica será validada comparando los resultados experimentales con los valores y tendencias obtenidos en las investigaciones realizadas en el IDIEM y la Universidad Técnica Federico Santa María.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Caracterizar la respuesta a corte de estéril minero, a partir de ensaye de muestras con distintos niveles de rotura de partículas asociados a niveles de confinamiento, para obtener los parámetros a utilizar en el diseño de estructuras geotécnicas de mezclas commingling.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la granulometría sintética, propiedades gravimétricas y volumétricas del material.
- Determinar las presiones a las que se fractura el material y los correspondientes grados de rotura de partículas en dichos puntos.
- Determinar los parámetros de respuesta al corte de muestras de material a distintos grados de rotura.
- Determinar la variación de los parámetros de respuesta al corte en función del confinamiento.
- Validar la técnica de ensayo utilizada mediante comparación de la caracterización del material respecto a los resultados de ensayos anteriores de estériles similares.

4 Metodología

Para caracterizar la respuesta al corte del estéril minero a distintos niveles de rotura de partículas, se desarrolla un programa de ensayos consistente en una consolidación unidimensional, una consolidación isotrópica, dos ensayos triaxiales consolidados drenados (CID) a muestras sin alterar y dos ensayos triaxiales CID a muestras previamente consolidadas. La investigación se divide en 5 etapas que buscan completar cada uno de los objetivos específicos (Figura 3) que se resumen en: determinar la granulometría y propiedades índice a utilizar, estudio de la ruptura ante consolidación, caracterización de la respuesta a corte, estudio de la relación esfuerzo de corte resistente respecto a esfuerzo confinante aplicado, y validación de las técnicas de ensayo propuestas.

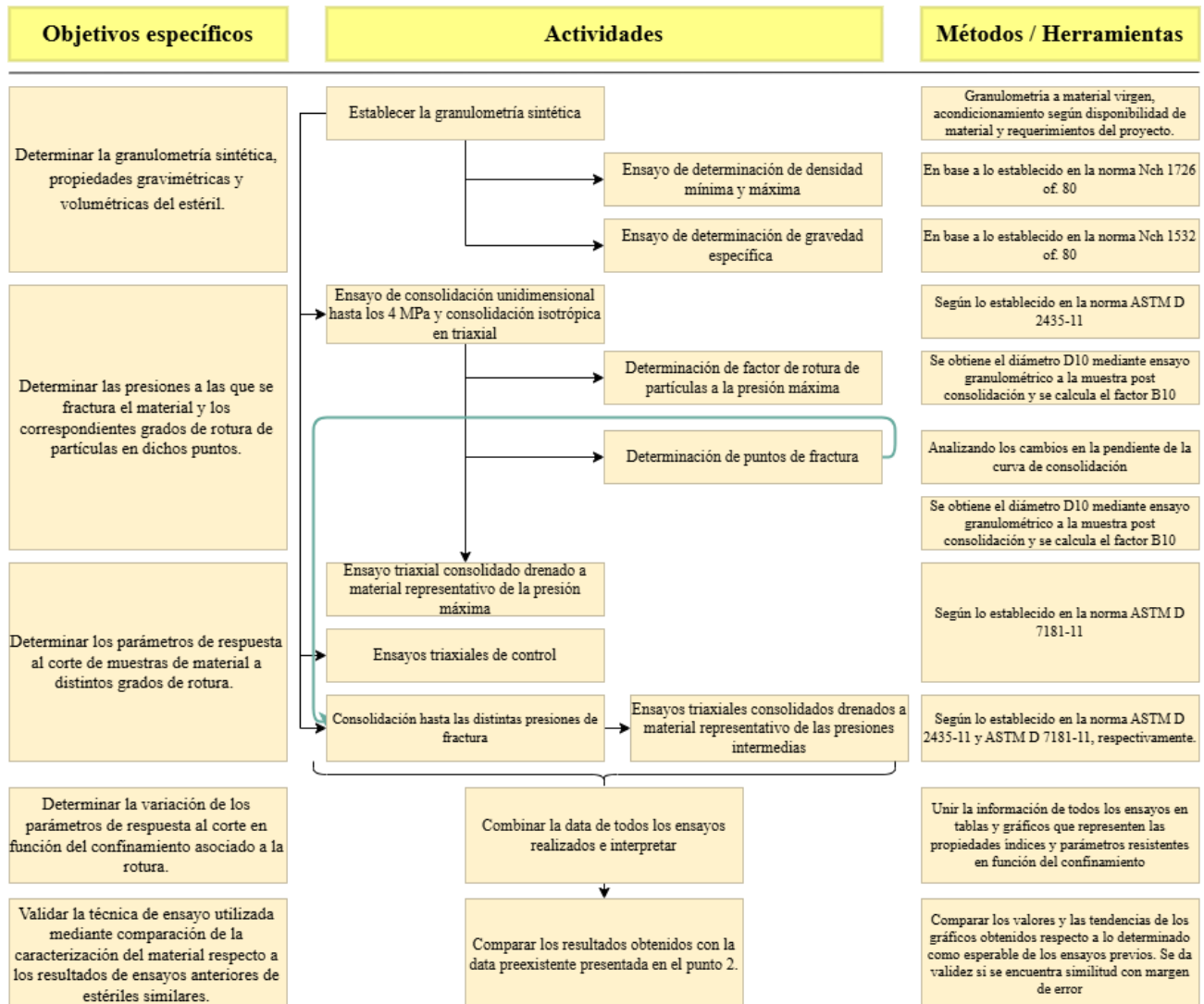


Figura 3. Diagrama de la metodología de investigación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se presentan las distintas actividades necesarias para cumplir los objetivos propuestos juntos con los métodos y herramientas que a utilizar. La mayoría de estas corresponden a ensayos de laboratorio que se rigen por distintas normativas validas en Chile, sin embargo, el de consolidación unidimensional y el triaxial se llevan a cabo en dimensiones mayores a las reglamentarias, escalados de forma tal que respeten las proporciones entre las dimensiones según lo normado, por lo que tienen consideraciones particulares. Para describir de mejor manera la metodología específica de esta investigación, a continuación se detallan los procedimientos y consideraciones para cada etapa.

4.1 Ensayos granulométricos y gravimétricos

Los ensayos para determinar granulometrías en el presente estudio se rigen por lo establecido en la sección 8.102.1 del volumen n°8 del Manual de Carreteras 2023 con la consideración especial que se añaden los tamices 1/2" y número 18 a la serie de tamices preferentes, para mejorar la precisión de los ensayos y facilitar el posterior proceso de confección de muestras sintéticas.

Para determinar la granulometría sintética a utilizar se tamiza una muestra representativa de 10 [kg] de estéril. Con ello se establece los porcentajes de masas disponibles entre tamices de la serie, a partir de los cuales se establece una granulometría que: permita estudiar una condición crítica de rotura de partículas, es decir, una granulometría mal graduada y con bajo contenido de finos; y que la proporción grava – arena similar a los estudios que se utilizaran para comparar resultados. Dicha granulometría se utiliza en todos los ensayos del estudio.

Posteriormente se establecen las densidades límites y gravedad específica de las muestras sintéticas según las normativas Nch.1726 of.80 y Nch. 1532 of.80 sin consideraciones especiales.

4.2 Consolidación

4.2.1 Preparación de probetas

Toda probeta a utilizar en la presente investigación es confeccionada siguiendo la metodología establecida por Figueroa, et al., (2024) para la segunda etapa de ensayos de grandes dimensiones de material grueso, diseñada para ensayos triaxiales pero aplicable al ensayo de consolidación. Se resume en 3 fases: establecer una granulometría objetivo y las correspondientes masas retenida en cada uno de los tamices de interés; prepara la cantidad de material para cumplir con la granulometría; y preparar la probeta a una densidad objetivo en capas. En cada capa se coloca la masa total requerida de cada tamiz dividida por la cantidad de capas, se inicia colocando el material retenido en el tamiz mayor, siguiendo con la serie de tamices utilizada hasta el tamiz por el que no pasa material, esto con el fin de evitar segregación del material fino. El material a utilizar se encuentra en estado seco debido a la baja cantidad de finos presente en el estéril y que el material se planea utilizar para pilas secas de commingling, las probetas se elaboran con 0% de humedad.

En particular, para las probetas de consolidación unidimensional se utilizan 3 capas de 4 [cm] de altura y para las probetas de consolidación isotrópica se utilizan 6 capas de 5.0 [cm] de altura.

4.2.2 Consolidación unidimensional

Para estudiar el fenómeno de rotura de partículas y la variación del comportamiento de estéril, el cual cuenta con un diámetro nominal de 1", es necesario escalar el equipo tradicional de consolidación unidimensional cumpliendo la normativa ASTM D-2435-11. Para ello se utiliza un molde cilíndrico de acero macizo con dimensiones 20.5 [cm] de altura y 30.5 [cm] de diámetro, en el que es posible ensayar probetas de 12.2 [cm] de altura y mismo diámetro una vez colocado los discos porosos y sobrecarga, lo que cumple con el ratio diámetro – altura de 2.5. El molde se sitúa sobre un plato base con una cañería de evacuación de agua en la parte central que permite el drenaje, para evitar el paso de material fino se coloca un disco poroso y papel filtro tanto en la parte inferior como superior de la probeta. En cuanto a la carga, esta se realiza utilizando un gato hidráulico apoyado contra una prensa de reacción y se mide utilizando una celda de carga que soporta hasta 200 [kN].

Respecto a la deformación axial, esta se mide como el desplazamiento vertical promedio de 3 sensores LVDTs solidarios al equipo y dispuestos cada 120 [°] en la parte superior, estos sensores poseen un ruido en la señal equivalente ± 10 [μm]. La adquisición de las mediciones de la celda de carga y sensores de desplazamiento se realizan cada un segundo utilizando un programa diseñado en LabVIEW por el equipo de LEMCO especialmente para este equipo.

Para la lectura de la celda de carga se coloca un valor inicial de fuerza tal que el primer registro sea lo aplicado por el equipo y la sobrecarga. Para los LVDTs se coloca un valor inicial de desplazamiento tal que la deformación axial medida oscile dentro del ruido del sensor.

El ensayo inicia con la saturación de la probeta con agua corriente para replicar las condiciones de los estudios en los que se basa la investigación. Una vez que el agua que sale sin burbujas por la manguera de salida, se dice que la probeta se encuentra totalmente saturada. Posteriormente, se aplican una serie de cargas buscando distintas presiones de interés, considerando el área de aplicación, partiendo de la carga que aplica todo el equipo colocado por encima de la probeta (Tabla 1). El paso de una carga a la siguiente se realiza una vez que el desplazamiento vertical permanezca constante considerando la existencia de ruido en la medición.

Tabla 1. Plan de cargas para el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Fuerza aplicada [kN]	σ_v objetivo [kPa]
0.54	7.4
2.92	40
5.48	75
10.96	150
21.92	300
43.84	600
87.67	1200
131.51	1800
175.35	2400

Los registros que entrega el programa son los desplazamientos de cada uno de los LVDTs y la carga aplicada en un archivo de texto separado por comas, el cual se procesa en Excel para obtener la relación de vacíos en función del esfuerzo aplicado.

4.2.3 Consolidación isotrópica

Para validar los resultados obtenidos de la consolidación unidimensional se considera como parte del set de ensayos una consolidación isotrópica con los siguientes incrementos de carga: 10, 25, 50, 100, 200, 400 y 600 [kPa] en equipo triaxial. El primer esfuerzo corresponde a la presión a la que se realiza la saturación de la probeta y el último corresponde al esfuerzo de ensayo de la prueba de corte de control. Cada esfuerzo aplicado se mantiene hasta que el cambio volumétrico medido por los controladores de presión de cámara y el de contrapresión tenga una variación menor a 100 milímetros cúbicos en 2 minutos.

Los resultados a obtener deben ser corregidos, ya que en este ensayo se registran grandes volúmenes desplazados por el controlador de la contrapresión asociado al fenómeno de penetración de membrana (Bustamante, et al., 2024). Para lograr esto se utiliza la corrección propuesta por Bustamante, et al. (2024), la cual establece que el cambio de volumen en la etapa de consolidación (Ecuación 2) corresponde a la resta del volumen medido en la consolidación (ΔV_c) a una determinada presión (V_m) con el cambio volumétrico medido en la consolidación de una probeta cementada a igual presión (V_c). Los valores de V_c se obtienen a partir de los resultados del estudio anteriormente mencionado, con los cuales se genera una regresión lineal (Anexos G) para obtener el delta volumen en función del esfuerzo confinante medio (p').

$$\Delta V_c = V_m - V_c > 0 \quad (2)$$

Donde los volúmenes anteriormente explicados están en centímetro cúbicos.

4.2.4 Rotura de partículas

Se estudia el cambio de distribución de tamaño en las muestras mediante la comparación de las granulometrías previas y posteriores a cada ensayo utilizando el parámetro B10 de Lade et al. (1996). La granulometría previa al ensayo corresponde a la establecida al momento de preparar las probetas. Para determinar la granulometría posterior al ensayo primero se retira el material de la probeta, se coloca

en una paila y le lleva a secado por 24 horas, para posteriormente realizar el análisis según lo establecido en el punto Ensayos granulométricos y gravimétricos

4.3 Caracterización de la respuesta al corte

En el presente estudio se ejecutan 4 ensayos triaxiales consolidados drenados los que se rigen por la normativa ASTM D-7181-11. Sin embargo, debido a que el tamaño máximo nominal del estéril es de una pulgada (2.54 [cm]), según los antecedentes de ensayos del mismo material, las probetas estandarizadas en la norma no son compatibles. Por esto se utilizan probetas de 15 [cm] de diámetro, lo que garantiza un ratio óptimo mayor a 1:5 entre el diámetro máximo nominal y el diámetro de probeta (Linero-Molina et al., 2007). La altura de la probeta es de 30 [cm] para respetar el ratio altura – diámetro de 2 según lo establecido normativa. El equipo utilizado corresponde a los mismos controladores utilizados con las probetas estándares, una cámara comercial Gilson HMA-519 HS, un controlador de presión limitado a 800 [kPa] por seguridad, un LVDT de 40 [mm] de extensión y un adquisidor de datos GSD Instrument con su software asociado. Respecto a las membranas, se utilizan dos como medida de seguridad para evitar roturas de las mismas producto del contacto con los bordes angulosos del material. Los grosores de estas varían entre 0.07, 0.1 o 0.15 según disponibilidad y presión de ensayo, mayores presiones requieren mayor grosor total de membrana.

Para preparar las probetas se inicia por colocar ambas membranas en un molde hecho a medida y se apegan al mismo utilizando una bomba de vacío. Estas se confeccionan siguiendo lo establecido anteriormente en el punto Preparación de probetas considerando las mismas capas que la consolidación isotrópica y las densidades se detallan en los siguientes puntos. En caso de que al colocar una capa la altura supere a la objetivo se procede a compactar el material con un pisón. Por el contrario, en caso de que una capa tenga una altura inferior a la objetivo, se debe sacar todo el material del molde y reiniciar el proceso de confección. La cantidad de masa de material a utilizar corresponde al valor obtenido al multiplicar la densidad de ensayo por el volumen del molde y debe repartirse en igual masa por capa. La colocación de filtros, cabezal superior e instalación en la cámara sigue los procedimientos normados.

Una vez montada la probeta en el equipo se llena la cámara de agua corriente y se procede a saturar la probeta con agua. Se elimina la etapa de saturación con CO₂ debido a que estudios previos indican que el material posee una gran cantidad de vacíos, los que se llenan fácilmente con agua. Para evitar que queden burbujas de aire al interior, la saturación se realiza con mínima carga hidráulica, es decir, con flujo lento de agua y finaliza cuando no haya flujo de burbujas hacia el tanque receptor en un periodo continuo de 5 minutos. Completada la saturación manual se procede a realizar una rampa de saturación automática controlada por el software GDSLab, donde se busca que el parámetro B de Skempton tenga un valor mínimo de 0.98.

Con la probeta completamente saturada se procede a consolidar la probeta hasta la presión que se quiere realizar el ensayo de corte. Debido a la naturaleza del material, la etapa no se realiza por 24 horas si no que se finaliza cuando el volumen varíe menos de 1 [cc] en un periodo de dos minutos.

Finalmente se procede a la etapa de corte siguiendo la normativa y considerando una velocidad de carga de 0.2 [mm/min]. El ensayo finaliza cuando se alcanza una deformación axial del 15%, esto para comparar con los estudios realizados por Linero-Molina, et al. (2007). Los datos son registrados por el programa GDSLab se procesan en planillas Excel tipo confeccionadas por laboratoristas de LEMCO para cada ensayo realizado. Las presiones de confinamiento y condiciones de ensayo para cada grupo de probetas se detallan a continuación.

4.3.1 Ensayos de control

Se denominan ensayos de control a los realizados siguiendo todas las etapas establecidas en la norma correspondiente. Para este estudio se ejecutan 2 ensayos, a 100 [kPa] y 600 [kPa] de confinamiento respectivamente. A partir de esos resultados se construye la línea de estado crítico de control, considerando también que esta debe pasar por el origen de los espacios a graficar debida a que el material no presenta cohesión verdadera al ser de tipo granular (Das Braja, 2014). La densidad de preparación para la probeta se busca una densidad relativa cercana al 50%.

4.3.2 Ensayos previamente consolidados

La caracterización de la respuesta a corte en el rango de interés y sobre el límite de 600 [kPa] tolerable por el controlador de presiones disponible, se logra al realizar ensayos triaxiales consolidados drenados a 100 [kPa] de confinamiento con muestras de material con granulometría representativa de la presión que se requiere caracterizar. La granulometría se acondiciona sometiendo previamente al material a la presión objetivo en el equipo de consolidación unidimensional, ya que esto fractura el material y por consiguiente condiciona su respuesta (Lade et al., 1996). La densidad de la preparación de la probeta corresponde a alcanzada en la consolidación.

Para la investigación se estudian 2 muestras cada una consolidada a esfuerzos verticales de 600 y 2400 [kPa] respectivamente, la última corresponde a la resultante del ensayo de consolidación unidimensional. Estos puntos se seleccionan a partir de los resultados del estudio de la Universidad Técnica Federico Santa María (2023), ya que en ellos ocurren cambios de pendientes en la curva de consolidación.

4.3.3 Estudio de resistencia al corte en función del confinamiento

Para determinar la variación que sufre la resistencia cortante del estéril a medida que aumenta el confinamiento se construyen las líneas de estado crítico para las muestras de control y muestras de material previamente consolidado a partir de todos los resultados de ensayos triaxiales correspondientes. En particular se estudia en los espacios de esfuerzo cortante promedio (q) en función del confinamiento medio (p'), cambio volumétrico en función de la deformación axial y relación de vacíos (e) en función del confinamiento medio (p'), considerando los parámetros de Lambe.

4.3.4 Validación del estudio

La caracterización del material utilizando muestras previamente consolidadas es una técnica innovadora, y por ende debe ser validada. Esto se realiza mediante 2 métodos: primero comparando los valores de parámetros resistentes determinados a partir de los resultados de ensayos triaxiales con previa consolidación respecto a los obtenidos a partir de los ensayos de control; y segundo comparando las relaciones de esfuerzo en función del confinamiento y parámetros obtenidos con lo establecidos por los estudios realizados por Linero-Molina, et al. (2007) y la Universidad Técnica Federico Santa María (2023).

5 Resultados

5.1 Granulometría y propiedades índice

A partir del ensayo de granulometría se determina la clasificación del estéril según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS). Las curvas para el material en estudio, el material usado en la investigación anterior de LEMCO y la granulometría sintética a utilizar se presentan en la Figura 4.

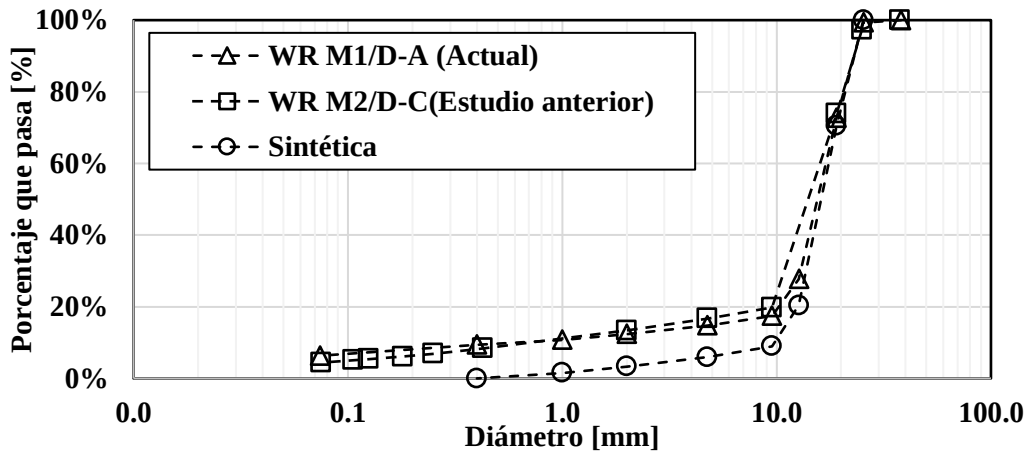


Figura 4. Granulometrías de los estériles. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que la granulometría del estéril utilizado en este estudio es similar a la del estéril del estudio que se está continuando (WR M2/D-C), con la salvedad que el material M1/D-A tiene un contenido de finos del 6%, por lo que clasifica como grava mal graduada con limo (GP-GM) a diferencia del otro material que clasifica como grava limpia mal graduada (GP).

Para estudiar un caso desfavorable para la rotura de partículas, y para tener la misma razón arena-grava del material estudiado en IDIEM se ajusta la granulometría denominada sintética. Esta se logra lavando el estéril M1/D-A en la malla número 40, descartando el material que pasa por la misma. Los diámetros característicos y propiedades índice de dicha granulometría se presentan en las Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

Tabla 2. Diámetros característicos y parámetros granulométricos. Fuente: Elaboración propia.

D60 [mm]	D50 [mm]	D30 [mm]	D10 [mm]	Cu [-]	Cc [-]	Grava [%]	Arena [%]
17.47	16.12	13.72	9.76	1.79	1.11	94.0	6.0

Tabla 3. Propiedades índice de la muestra sintética. Fuente: Elaboración propia

Gs grava [-]	Gs arena [-]	Gs global [-]	D mín. [g/cm ³]	D máx. [g/cm ³]
2.65	2.71	2.65	1.35	1.54

Con los parámetros de la Tabla 2 se clasifica el material con granulometría sintética como grava mal graduada, igual a los materiales de los estudios que se utilizan como comparación. Debido a la eliminación de material fino, este material tiene gravedad específica, densidades mínima y máxima menores a la del estéril M2/D-C (Anexos H). Por lo anterior se espera que la resistencia al corte sea similar, al ser del mismo origen, pero el comportamiento del cambio volumétrico en la etapa de corte sea diferente, al tener distintas densidades límites y densidades de sólidos. Además, dado a que el rango entre las densidades límites es acotado, se dice que la densidad relativa presenta una alta sensibilidad a los cambios volumétricos. Respecto a la gravedad específica del suelo, esta es la esperable para rocas cuarzosas (Lambe Whitman & Whitman Robert, 1972), lo que concuerda con la geología y mineralogía

de la mina de origen (Cueva et al., 2017). Se espera que la roca va a tender a ser frágil y fracturarse ante esfuerzos de compresión.

5.2 Consolidación unidimensional

Se ensaya una probeta de material con granulometría sintética (Tabla 4) a una densidad relativa del 48%, misma que los ensayos anteriormente ejecutados en LEMCO para permitir la comparación. Para ello primero se colocan 12.768 [kg] de material en el molde del edómetro con una altura de 12.2 [cm], antes de colocar la sobrecarga (Figura 5).

Tabla 4. Granulometría de la muestra. Fuente: Elaboración propia

Tamiz	Porcentaje que pasa	Masa retenida [g]	Masa por tamiz [g]
1"	100.0	12768.0	0.0
3/4"	70.5	8995.1	3772.9
1/2"	20.3	2598.2	6396.9
3/8"	9.0	1143.6	1454.6
n°4	6.0	760.6	383.0
n°10	3.3	426.5	334.1
n°18	1.5	196.4	230.1
n°40	0.0	0.0	196.4



Figura 5. Probeta previo al ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que el material se encuentra en estado suelto y que existen huecos entre las partículas de mayor tamaño. También, se dice que la segregación del material es mínima debido al método de preparación.

Una vez colocados todos los equipos necesarios para el ensayo la altura disminuye a los 11.66 [cm] debido a la sobrecarga que esto implica. Con esto se tiene una condición inicial de ensayo de 7.4 [kPa] de sobrecarga y una relación de vacíos de 0.768 [-].

5.2.1 Curva de compresión

Para construir la curva de compresión (Figura 6) se grafica la relación de vacíos promedio (e) medida para cada esfuerzo aplicado. Se utiliza el parámetro de esfuerzo medio de Lambe (p') para representar el estado tensional de la probeta, esto considerando el esfuerzo mayor (σ_1) como el esfuerzo vertical

aplicado y se calcula el esfuerzo menor radial (σ_3) como la multiplicación entre el coeficiente de empuje en reposo del suelo (K_0) por el esfuerzo mayor. Para obtener el factor K_0 se utiliza la ecuación para grano grueso de Jacky (1994) presentada a continuación:

$$K_0 = 1 - \tan(\phi) \quad (3)$$

Donde: ϕ es el ángulo de fricción del suelo, para el caso se considera un ángulo de fricción de 36° correspondiente al valor estimado en el estudio de la Universidad Técnica Federico Santa María (2023) para el rango completo de presiones en estéril similar.

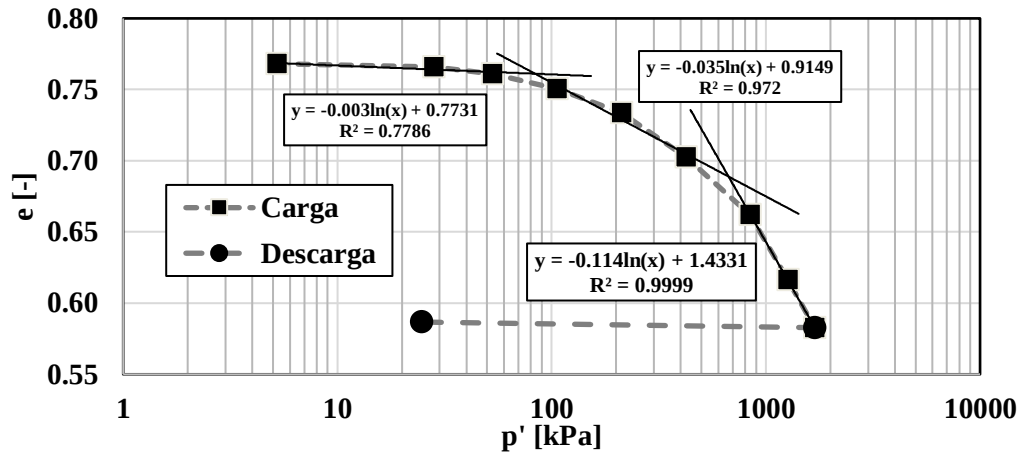


Figura 6. Curva de compresión del estéril. Fuente: Elaboración propia

Al ser un suelo clasificado como grava, la pendiente de la curva de compresión tiende a ser constante, asociado a la baja compresibilidad y alto drenaje (Terzaghi et al., 1996). En cambio, en la figura anterior se observan 2 cambios de pendientes notorios: el primero entre los 50 y 100 [kPa], y el segundo entre los 400 y 800 [kPa], asociados a puntos en cambio de la granulometría del material por rotura de partículas. Con esto se validan los puntos de interés a analizar a corte con muestras representativas y de control. También, se establece que la pendiente se estabiliza a medida que aumenta el esfuerzo confinante debido que la variación de la misma entre puntos tiende a cero. Lo anterior implica que a los 800 [kPa] la fractura del material alcanza su máximo potencial y posterior a ello la tasa de ruptura se mantiene constante.

Para determinar el índice de compresión (C_c) del material se calcula dicho factor para cada incremento de carga y grafica en función del esfuerzo promedio entre los límites del intervalo (Figura 7).

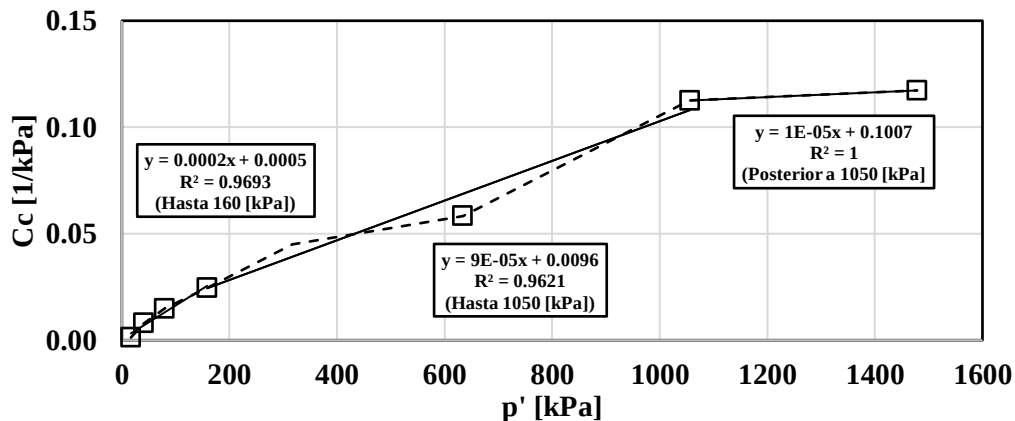


Figura 7. Índice de compresión versus esfuerzo vertical. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura se determina que el índice de compresión varía linealmente según el esfuerzo aplicado dentro de intervalos sin rotura. Cuando ocurre fractura del material cambia la tendencia de variación de C_c . También, se observa que este índice tiende a estabilizarse a medida que aumenta el

confinamiento. Con este gráfico se ratifican los puntos de fractura determinados con la curva de compresión. Los valores de las relaciones de vacíos, densidades e índices de compresión para cada esfuerzo se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados ensayo de consolidación unidimensional. Fuente: Elaboración propia.

p' [MPa]	e [-]	γ [g/cm ³]	σ promedio [kPa]	C_c [1/kPa]
5	0.77	1.50	-	-
28	0.77	1.50	17	0.001
53	0.76	1.50	40	0.008
106	0.75	1.51	79	0.015
211	0.73	1.53	158	0.025
422	0.70	1.56	317	0.045
845	0.66	1.59	634	0.058
1267	0.62	1.64	1056	0.113
1690	0.58	1.67	1478	0.117
25	0.59	1.67	857	0.001

La densidad y granulometría a 1690 [MPa] corresponden a los parámetros iniciales a utilizar en el ensayo triaxial representativo de dicha presión. Estos valores y ecuaciones solo son válidos sólo para el rango estudiado.

Una vez finalizada la consolidación se retira cuidadosamente los aparatos de medición y la sobrecarga (Figura 8) , se extrae el material en una paila y se lleva a secar para realizar un análisis granulométrico con el que estudiar el fenómeno de interés.



Figura 8. Probeta posterior al ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En la probeta se observa un aumento de la compacidad, presencia de partículas con fractura evidente (Figura 9) y aumento de partículas finas.



Figura 9. Partícula fracturada retirada de la probeta. Fuente: Elaboración propia.

Se logran retirar 12.669 [kg] de material del molde, lo que significa una pérdida de 99 [g] respecto a la masa colocada inicialmente, esto debido a que el material más fino se filtra en el sistema de drenaje de agua y los discos porosos. La pérdida representa 0.8% de la masa inicial, lo que se considera tolerable. La masa de material retirada se considera como masa inicial en el análisis granulométrico que se presenta a continuación en la Figura 10 y la Tabla 6.

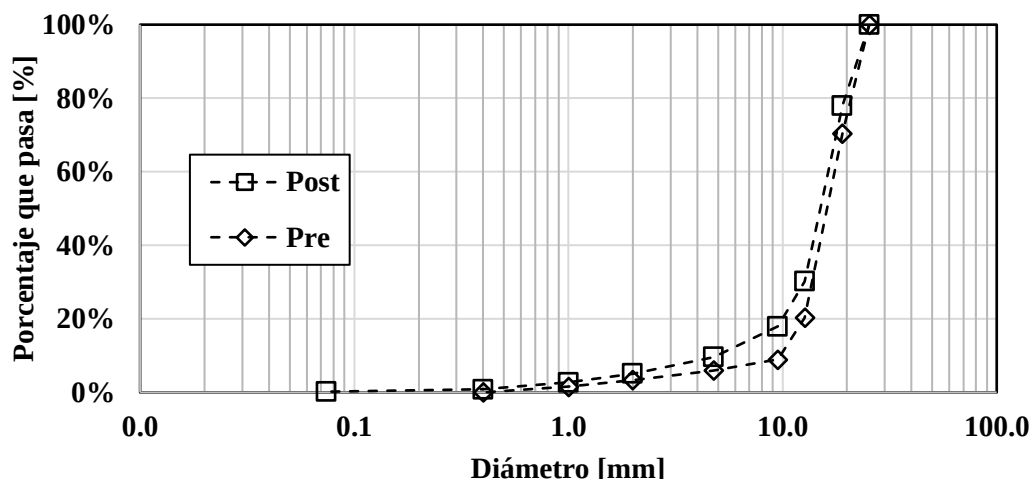


Figura 10. Curvas granulométricas pre y post ensayo de consolidación unidimensional. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa un aumento de 100% en la masa que pasa en los tamices 3/8" y 60% en el número 4, es decir, la fractura se concentra en los tamices 3/4 y 1/2 pulgada principalmente. Lo anterior queda en evidencia al analizar el cambio de masa por 3/4 y 1/2 pulgada donde se pierden 985 [g] y 338 [g], respectivamente. La masa en el resto de los tamices aumenta posterior a la consolidación. Los diámetros característicos y coeficientes de la curva granulométrica se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de las granulometrías pre y post ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Pre	Post	Unidad
D60	17.47	16.33	[mm]
D50	16.12	15.01	[mm]
D30	13.72	12.65	[mm]
D10	9.76	4.91	[mm]
Cu	1.791	3.3	[-]
Cc	1.105	2.0	[-]
Grava	94.0	90.4	[%]
Arena	6.0	9.4	[%]
Finos	0	0.2	[%]

Estudiando la rotura de partículas B10 se determina que existe un 50% de fractura al consolidar el material hasta 2400 [kPa]. En cuanto a la clasificación del material, esta no varía y el estéril mantiene una clasificación de grava mal graduada.

5.3 Consolidación isotrópica

Se ensaya una probeta cilíndrica de estéril con granulometría sintética con doble membrana, una interior de 1.5 [mm] y otra exterior de 1 [mm]. Las dimensiones efectivas del espécimen son 14.78 [cm] de diámetro, 30.50 [cm] de altura. Con el fin de replicar las condiciones iniciales de la consolidación unidimensional se utilizan 7824 [g] de material, logrando así una relación de vacíos inicial de 0.772 [-], la cuál es un uno por ciento menor a lo esperado y aceptable. El contenido de humedad de la probeta es de 0%.

El cambio volumétrico en cada incremento de carga se determina como la resta entre el volumen final e inicial del controlador de contra presión. El valor obtenido se resta al volumen de vacíos inicial, con lo que se obtiene el correspondiente índice de vacíos. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de consolidación isotrópica. Fuente: Elaboración propia.

p' [kPa]	ΔV [cc]	ΔV acumulado[cc]	V vacíos [cc]	e [-]
10	0.0	0.0	2279.6	0.772
25	-45.0	-45.0	2234.6	0.757
50	-77.8	-122.8	2156.8	0.731
100	-90.9	-213.7	2065.9	0.700
200	-112.6	-326.3	1953.3	0.662
400	-137.4	-463.7	1815.9	0.615
600	-132.3	-596.0	1683.6	0.570

Se evidencia el fenómeno de penetración de membrana ya que los cambios volumétricos son excesivos para suelos clasificados como gravas, por lo que procede a corregir para cada intervalo.

Tabla 8. Resultados corregidos. Fuente: Elaboración propia.

p [kPa]	ΔV corrección [cc]	V corregido [cc]	V vacíos [cc]	e corregido [-]
10	0	0.0	2279.6	0.772
25	43.4	1.6	2278.0	0.772
50	121.3	1.5	2278.1	0.772
100	199.2	14.5	2265.1	0.767
200	277.1	49.2	2230.4	0.755
400	355.0	108.7	2170.9	0.735
600	400.5	195.5	2084.1	0.706

De la tabla anterior se dice que el fenómeno de penetración de membrana altera hasta en un 24% la medición del cambio volumétrico que experimenta la probeta. En las Figura 11 Figura 12 se presentan las comparativas de los distintos ensayos y correcciones.

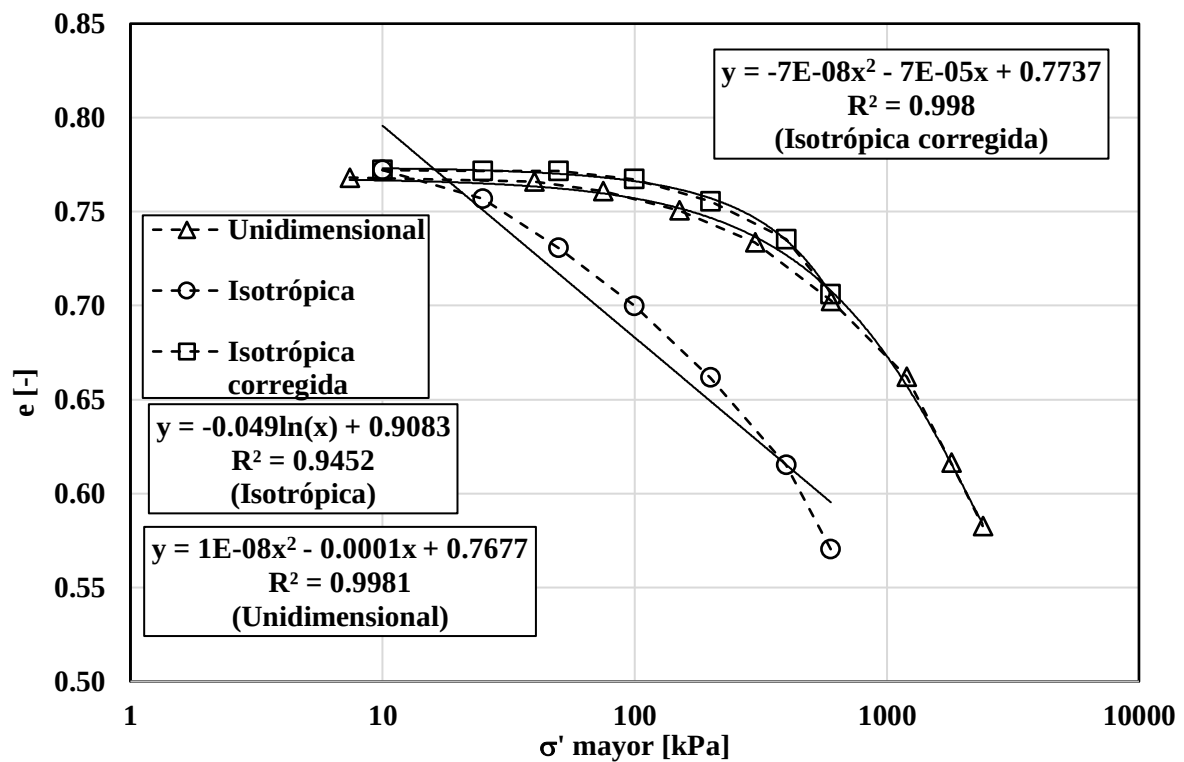


Figura 11. Comparativa de relaciones de vacíos en función del esfuerzo mayor. Fuente: Elaboración propia.

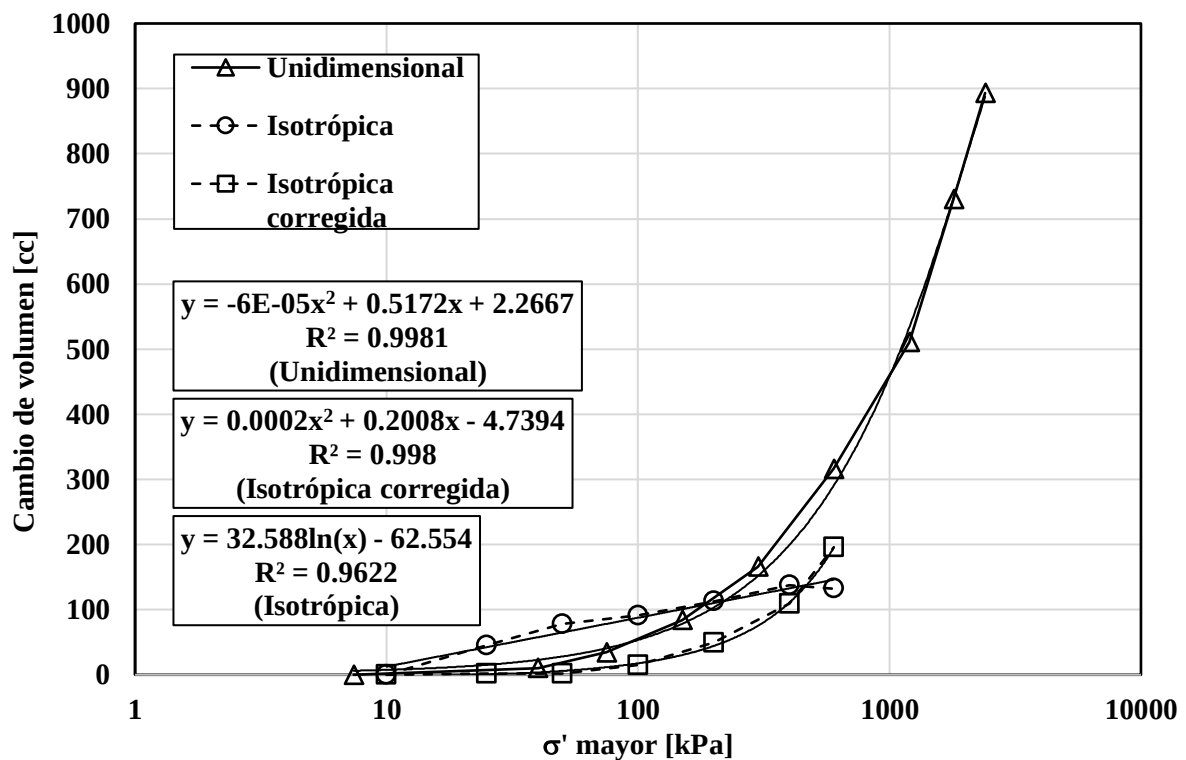


Figura 12. Comparativa de cambios volumétricos en función del esfuerzo mayor. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que tanto la relación de vacíos y los cambios volumétricos en función del esfuerzo siguen tendencias cuadráticas, con valores de R^2 cercanos a la unidad. Se determina que cual los cambios volumétricos se presentan en mayor medida a presiones sobre los 400 [kPa], es decir, posterior a la segunda fractura según lo determinado en el punto 4.2.2. Por lo tanto, a presiones bajo dicho punto, el cambio volumétrico medido en ensayo triaxial está controlado por la penetración de membrana. Esto se confirma al observar la tendencia que presentan los valores sin corrección, los cuales aumentan linealmente en el espacio semilogarítmico, con una pendiente mayor que los otros resultados y posterior a los 400 [kPa] la pendiente cambia bruscamente, siguiendo la tendencia del valor corregido.

Además, se observa que el coeficiente lineal es mayor en la consolidación unidimensional que en la isotrópica, pero el coeficiente cuadrático es menor. Lo anterior implica que este material sufre mayores cambios volumétricos en ensayo triaxial a medida que se aumenta el esfuerzo confinante.

Como este ensayo corresponde a una etapa previa al corte en el equipo triaxial el análisis de la rotura de partículas se realiza en secciones posteriores.

5.4 Relación entre ensayos de consolidación

En vista que ambas curvas de consolidación siguen una tendencia similar se plantea una correlación (Figura 13 y Figura 14) entre el cambio volumétrico medido en ambos ensayos con el fin de plantear un método que permita ejecutar ensayos de consolidación unidimensional que sometan al material a las mismas condiciones a las que se sometería en una isotrópica y viceversa, y así ejecutar estudios de consolidación, rotura o acondicionar muestras cuando hay limitaciones en los equipos.

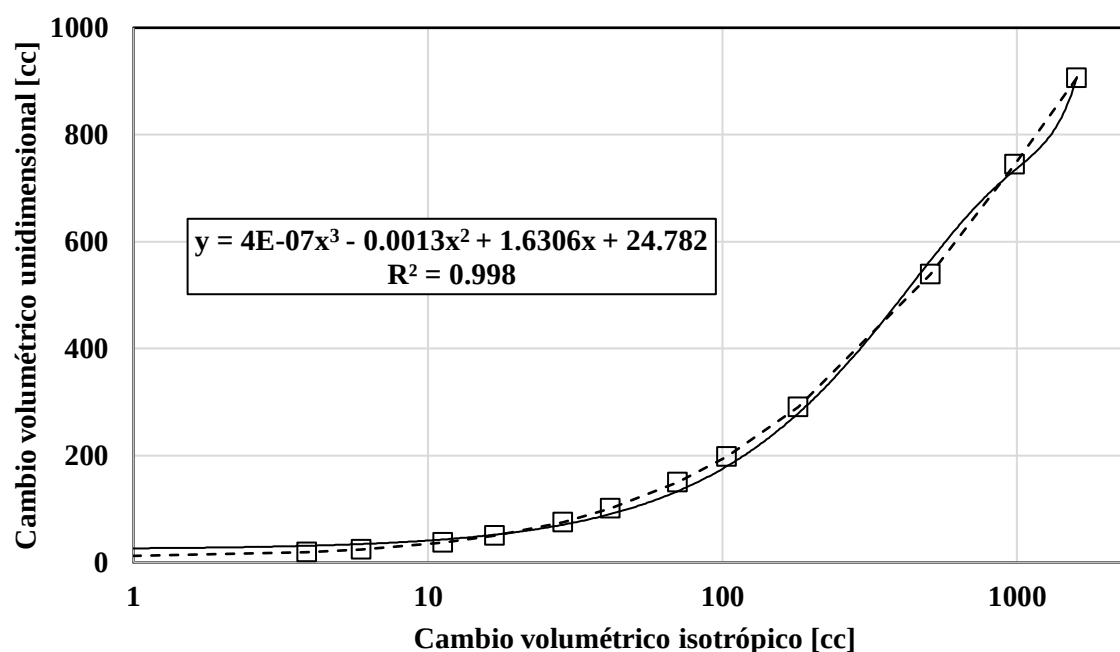


Figura 13. Relación (A) entre ensayos de consolidación. Fuente: Elaboración propia.

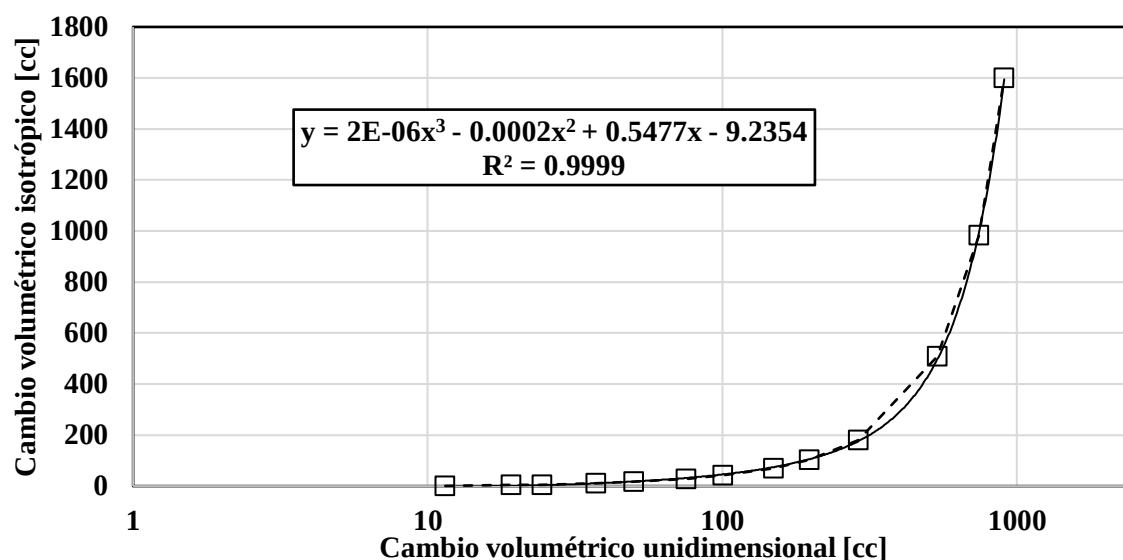


Figura 14. Relación (B) entre ensayos de consolidación. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras anteriores, se observa que los cambios volumétricos medidos en los ensayos unidimensional e isotrópico presentan una relación cúbica entre sí. Basado en esta observación, se propone el siguiente procedimiento para determinar la presión a la cual ensayar una probeta en un ensayo de consolidación unidimensional, con el objetivo de replicar la consolidación isotrópica hasta una presión de interés o viceversa.

Primero se ingresa en el gráfico presentado en la Figura 12 con la presión de interés y se determina el cambio volumétrico en el ensayo que se quiere representar. Con dicho valor se ingresa en la Figura 13 si se busca representar una consolidación isotrópica, o la Figura 14 en el caso de la unidimensional, para determinar el cambio volumétrico esperable en el ensayo a ejecutar. Finalmente, se ingresa en la Figura 12 y se determina la presión en la que ocurre el valor esperado en el ensayo a ejecutar. La presión obtenida es la presión hasta la cual se ejecuta el ensayo. Con esto se obtendrá unas condiciones de relación de vacíos y nivel de rotura esperables en el ensayo que se está representando.

5.5 Resistencia al corte

5.5.1 Ensayos de control

Se prepararon las 2 probetas (Figura 15) a partir de material sin ensayar y de granulometría sintética. Para la probeta a ensayar a 100 [kPa] de confinamiento se utilizan 2 membranas de 0.7 [mm] de espesor, con lo que se tiene un diámetro interior de 15.02 [cm], 7851 [g] de material y al momento de confeccionar se logra una altura 30.3 [cm], logrando así una relación de vacíos inicial de 0.81. Esto constituye un error cercano al 5% respecto a los parámetros iniciales del ensayo de consolidación, por lo cual se acepta la probeta. Los parámetros de la probeta de 600 [kPa] se encuentran detallados en la sección anterior.



Figura 15. Probetas de ensayo triaxial a 100 [kPa] (a) y a 600 [kPa] (b). Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan los resultados entregados por el software de forma gráfica en los distintos espacios que constituyen la línea de estado crítico (CSL) en función de los parámetros de Lambe, relación de vacíos y deformaciones.

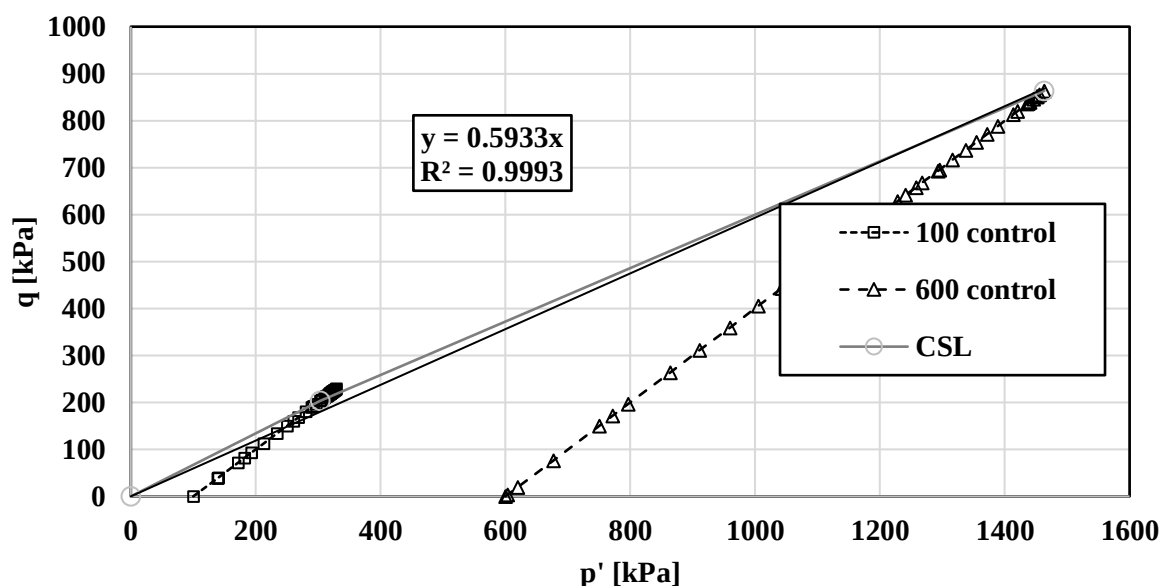


Figura 16. Envolvente de falla en espacio p'- q. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se presenta la trayectoria de tensiones con la que se determina el ángulo de fricción del suelo mediante una regresión lineal utilizando los puntos finales de ambos ensayos e imponiendo el intercepto en el punto (0,0). Así se establece que el ángulo en el rango de 0 a 600 [kPa] es de 36.4 [°], en cambio, si sólo se considera el ensayo a 100 [kPa], el ángulo aumenta a 42.1 [°]. Además, los valores del esfuerzo de corte máximo normalizado por el esfuerzo de consolidación son de 2.04 y 1.44, respectivamente, estableciendo así que la resistencia del material se degrada a medida que aumenta el confinamiento. Los valores obtenidos son un 1 y 3% superior a los obtenidos en el estudio de la Universidad Técnica Federico Santa María, por lo que se dan por válidos.

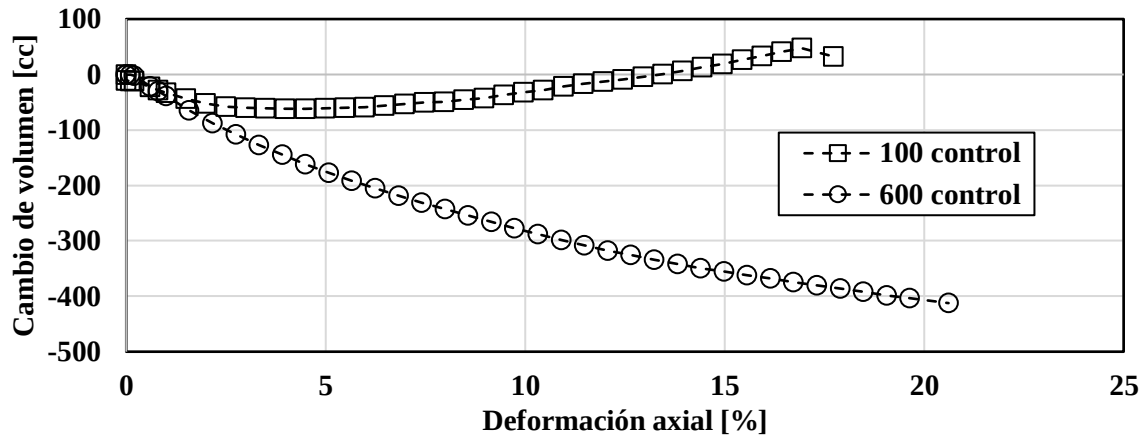


Figura 17. Cambio volumétrico en función de la deformación axial. Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo presentado en la Figura 17 se determina que el material confinado a 100 [kPa] tiene un comportamiento contractivo – dilatante, en cambio, cuando se confina a 600 [kPa] el comportamiento es exclusivamente contractivo. Esto concuerda con lo establecido por Linero-Molina et al. (2007).

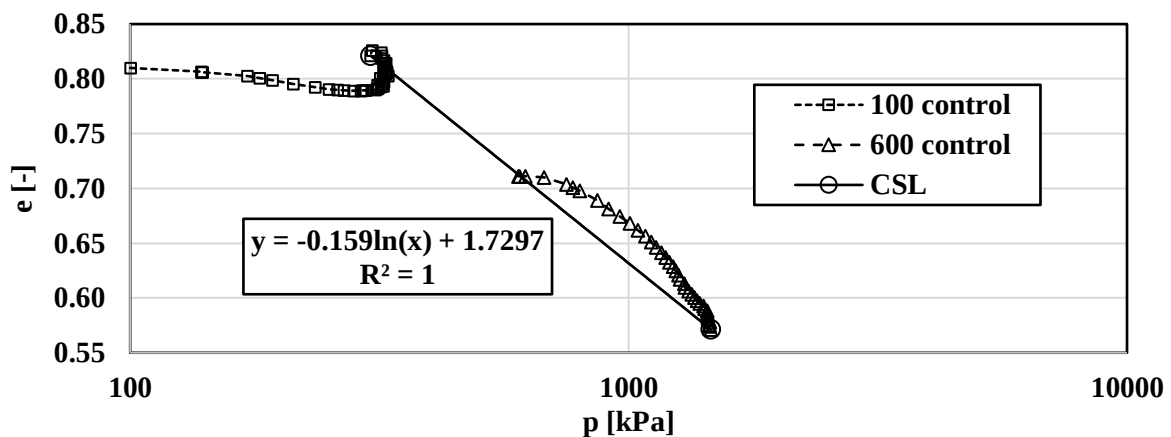


Figura 18. Envolvente de falla en espacio e-p'. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la regresión lineal de la figura anterior, se determina la pendiente de la línea de estado crítico. Esta tiene un valor de 0.159 [1/kPa] y debe ser igual a la pendiente de la curva virgen del ensayo de consolidación. Si se compara con la máxima pendiente obtenida en el ensayo unidimensional, es 40 [%] superior al obtenido, pero dentro del orden de magnitud de este.

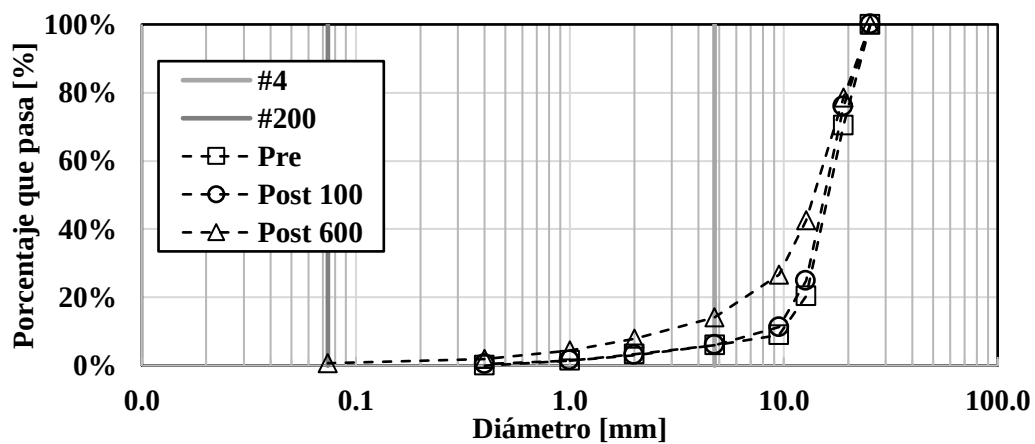
Posterior al ensayo se extraen las probetas de la cámara y se registran las condiciones finales de cada una, cabe destacar que ambas terminan con forma de barril. La probeta de ensayo de 100 [kPa] (Figura 19.a) alcanza una altura de 25.2 [cm] y un diámetro en la zona más ancha de 17.6 [cm]. En cuanto a la probeta de 600 [kPa] (Figura 19.b), esta finaliza con una altura de 24.5 [cm] y un diámetro en la zona más ancha de 16.5 [cm].



Figura 19. Probetas de ensayo triaxial a 100 [kPa] (a) y a 600 [kPa] (b) post ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que la probeta ensayada a 100 [kPa] presenta una penetración de membrana mayor, esto debido a que posee un menor espesor total de membrana. En ambos ensayos se alcanza la máxima deformación impuesta sin presentar un plano de falla evidente, esto asociado que el tamaño de grano estudiado permite el reacomodo de las partículas conservando estructura, lo que implica que la probeta no falla por corte si no que sólo alcanza la deformación máxima tolerable.

Finalmente, se estudia el fenómeno de rotura de partículas a partir de ensayos granulométricos a los materiales posterior al corte. Los resultados se presentan en las curvas granulométricas (Figura 20) y gráficos de variación de masas (Figura 21).



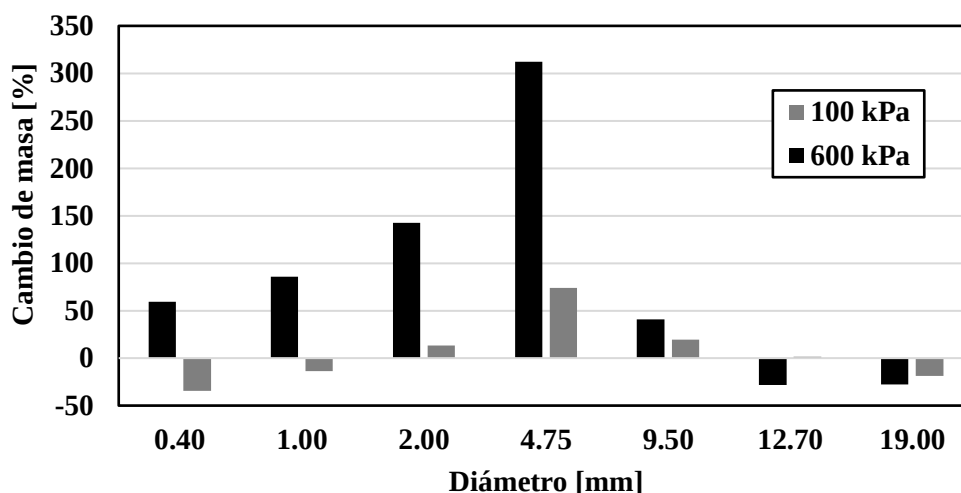


Figura 21. Variaciones en las masas por tamiz. Fuente: Elaboración propia.

De las figuras anteriores se determina que la rotura de partículas se concentra en los tamices de 3/4 y 1/2 pulgada, debido a que son los tamaños con mayor superficie de contacto y con borde agudos (Figura 22). Partículas menores presentan igualmente fractura pero la masa es compensada con la pérdida tamices superiores. Cabe destacar que la pérdida de masa en los tamices de menor diámetro en el ensayo a 100 [kPa] es debida a la pérdida por manipulación del material.



Figura 22. Partículas con rotura evidente. Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar la rotura del material se calculan los diámetros característicos, coeficientes de uniformidad y coeficientes de curvatura de cada curva (Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros granulométricos pre y post ensayo de corte. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	D60 [mm]	D50 [mm]	D30 [mm]	D10 [mm]	Cc [-]	Cu [-]	Clasificación
Sintética	17.47	16.12	13.72	9.76	1.11	1.8	GP
Control 100	16.76	15.49	13.22	8.04	1.30	2.1	GP
Control 600	15.43	13.79	10.11	2.69	2.46	5.7	GW

Con estos valores se establece que posterior al corte a 100 [kPa] de confinamiento se tiene que el valor del parámetro B_{10} es de 0.18 [-] y no se presentan cambios en la clasificación del suelo. Por otro lado el material del segundo ensayo presenta un valor de B_{10} de 0.72 [-] y el suelo cambia de clasificación a grava bien graduada. La rotura en ambos casos considera el efecto de las etapas de consolidación y corte en conjunto.

5.5.2 Ensayos con consolidación previa

Para realizar los ensayos representativos de esfuerzos verticales de 600 y 2400 [kPa] se consolidan 2 muestras de granulometría sintética mediante consolidación unidimensional. Para lograr una muestra representativa de la primera presión, según el método propuesto en 5.4, se aplica un esfuerzo vertical cercano a 602 [kPa]. En cuanto la probeta sometida a un esfuerzo vertical de 2400 [kPa] representa un confinamiento isotrópico de 2580 [kPa]. Las granulometrías (Figura 23) y parámetros iniciales (Tabla 10) finales de la consolidación se utilizan en la confección de las probetas a ensayar en el equipo triaxial.

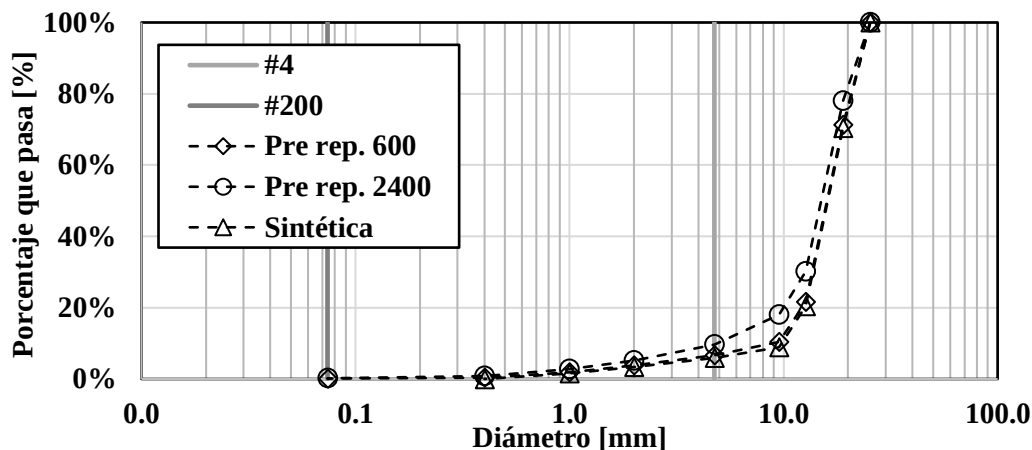


Figura 23. Granulometrías post consolidación previa al corte. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Parámetros granulométricos post consolidación previa al corte. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	D60 [mm]	D50 [mm]	D30 [mm]	D10 [mm]	Cc [-]	Cu [-]	e [-]
Rep. 600	17.34	15.99	15.78	8.73	1.64	2.0	0.67
Rep. 2400	16.33	15.01	12.65	4.90	2.00	3.3	0.59

En cuanto a la rotura de partículas en la consolidación a 600 [kPa], se determina que el valor del parámetro B_{10} es de 0.11 [-]. La rotura de la consolidación a 2400 [kPa] corresponde a la asociada a la consolidación unidimensional tratada anteriormente. Cabe destacar que ambas muestras mantienen la clasificación de grava mal graduada.

Para repilar los parámetros anteriores se confecciona la probeta representativa de 600 [kPa] (Figura 24.a) con una altura de 30.5 [cm], una membrana interior de 0.7 [mm] y una membrana exterior de 1.5 [mm] dando un diámetro de 14.8 [cm], y una relación de vacíos de 0.71 [-], la cual es un 6% mayor a la condición esperada pero es la misma que al inicio de la etapa de corte de control, por lo cual se acepta la probeta. En cuanto a la probeta representativa de 2400 [kPa] (Figura 24.b) con una altura de 30.8 [cm], una membrana interior de 0.7 [mm] y una membrana exterior de 1 [mm] dando un diámetro de 15.0 [cm], y una relación de vacíos de 0.59 [-].



Figura 24. Probetas de ensayo triaxial representativo de 600 [kPa] (a) y representativo de 2400 [kPa] (b). Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan los resultados entregados por el software de forma gráfica en los distintos espacios que constituyen la línea de estado crítico (CSL) en función de los parámetros de Lambe, relación de vacíos y deformaciones.

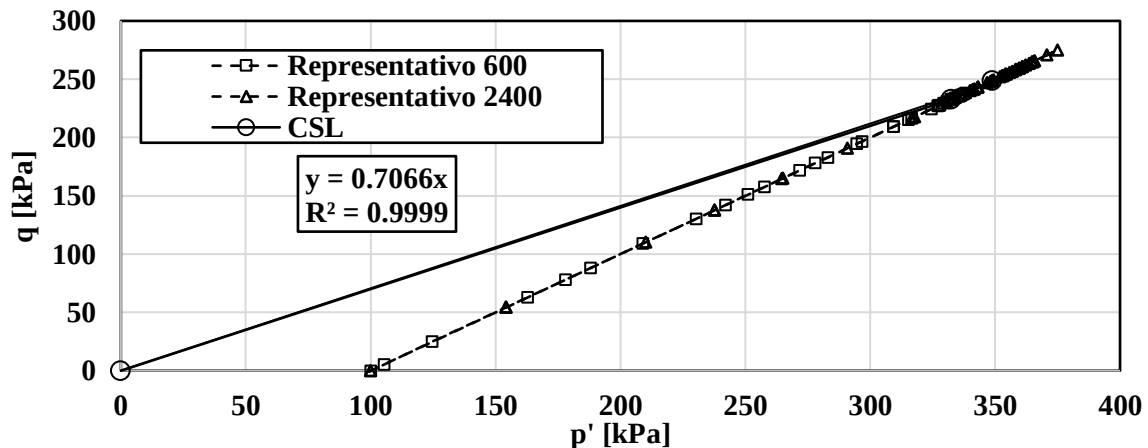


Figura 25. Envolvente de falla en espacio p'-q. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se presenta la trayectoria de tensiones con la que se determina el ángulo de fricción del suelo mediante una regresión lineal utilizando los puntos finales de ambos ensayos e imponiendo el intercepto en el punto (0,0). Así se establece que el ángulo de fricción de las muestras representativas es de 45 [°], lo que es un 24% mayor que el ángulo de fricción degradado. Con esto se determina que el ensayo a corte de material pre consolidado no otorga valores representativos del compartimento real del material. Se establece también que, a la misma presión de ensayo, mientras mayor rotura de partículas se tiene mayor resistencia al corte.

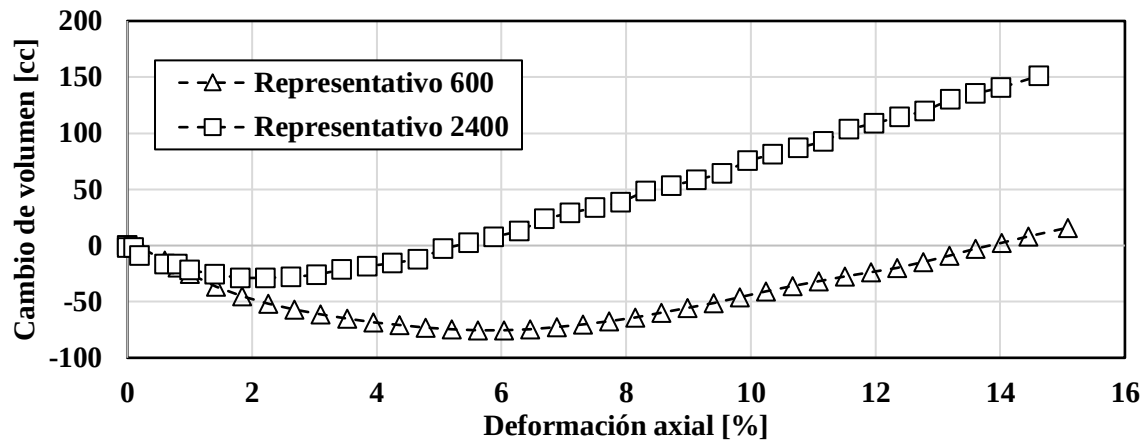


Figura 26. Cambio volumétrico en función de la deformación axial. Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo presentado en la Figura 26 se observa que el comportamiento en ambos ensayos es contractivo – dilatante, pero a medida que aumenta el pre-confinamiento el comportamiento tiende a ser dilatante. Con esto se determina que el ensayo a corte de material pre consolidado no refleja el comportamiento real del material, pero si presenta la tendencia a determinar el comportamiento ya sea a contractivo, como los ensayos de control, o dilatante a medida que aumenta el confinamiento.

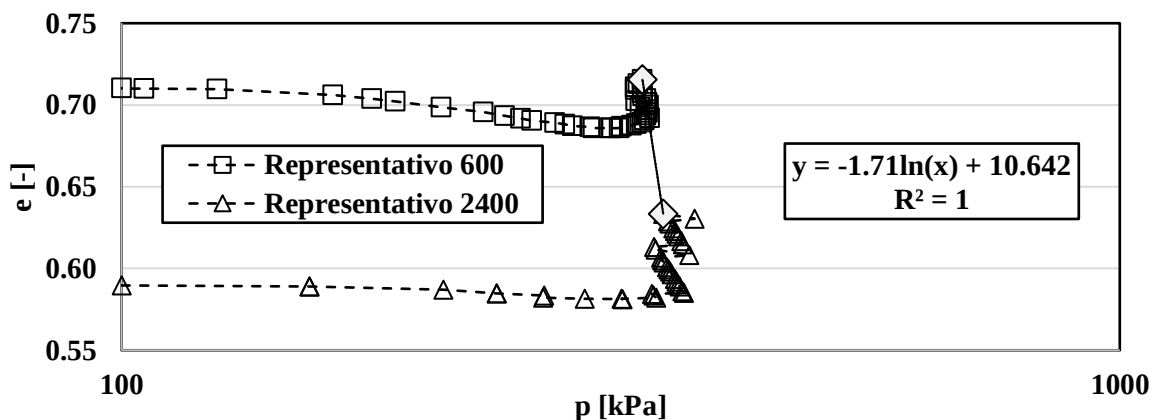


Figura 27. Envolvente de falla en espacio e-p'. Fuente: Elaboración propia.

Respecto del cambio en la relación de vacíos, en base a la regresión lineal planteada en la Figura 18 se determina que la pendiente de la curva de consolidación del material es de 1.71. Este valor no concuerda con lo obtenido en los ensayos de control ni con los de consolidación, por ende, el ensayo a corte de material pre consolidado no permite obtener la línea de estado crítico.

Posterior al ensayo se extraen las probetas de la cámara y se registran las condiciones finales de cada una, cabe destacar que ambas terminan con forma de barril. La probeta de ensayo representativo de 600 [kPa] alcanza una altura de 25.9[cm] y un diámetro en la zona más ancha de 17.4 [cm]. En cuanto a la probeta de 2400 [kPa] , esta finaliza con una altura de 26.3 [cm] y un diámetro en la zona más ancha de 17.2 [cm]. Considerando que ambos ensayos se realizan a 100 [kPa] de confinamiento en el equipo triaxial, se determina que el cambio volumétrico de la probeta es menor a mayor rotura de partículas en la etapa de consolidación. Lo anterior se asocia a que al ir aumentando el contenido de partículas de menor diámetro, los vacíos son ocupados por dicho material, lo que disminuye el reacomodo de las partículas y aumenta la resistencia de la probeta.

Finalmente, se estudia el fenómeno de rotura de partículas a partir de ensayos granulométricos a los materiales posterior al corte. Los resultados se presentan en las curvas granulométricas (Figura 28) y gráficos de variación de masas (Figura 29).

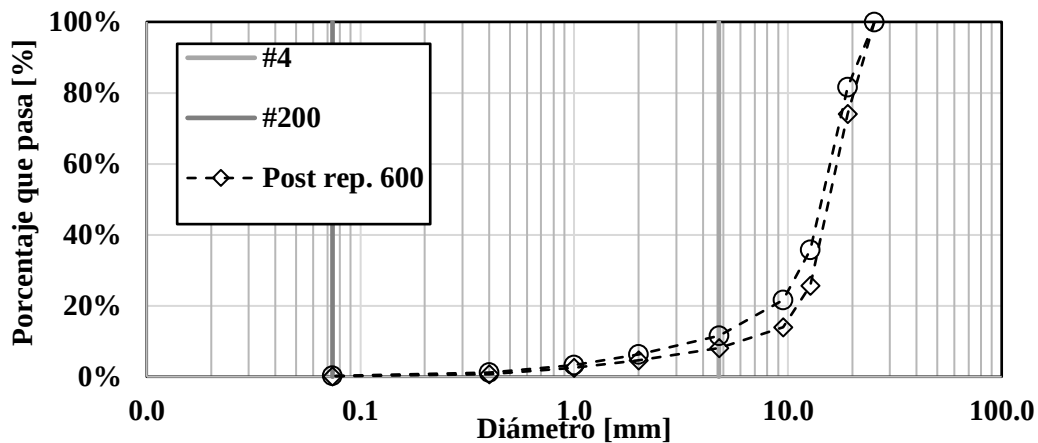


Figura 28. Granulometrías pre y post ensayo de corte. Fuente: Elaboración propia.

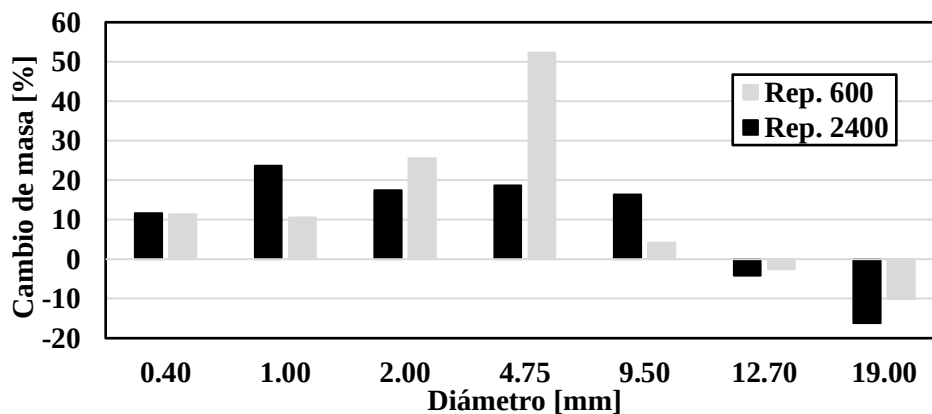


Figura 29. Variaciones en las masas por tamiz. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la curva granulométrica se determina que se presentan las mismas tendencias de aumento en el porcentaje que pasa por cada tamiz y de pérdida de masa que se da en los ensayos de control. Para cuantificar la rotura del material se calculan los diámetros característicos, coeficientes de uniformidad y coeficientes de curvatura de cada curva (Tabla 11 Tabla 9).

Tabla 11. Parámetros granulométricos post ensayo de corte representativo. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	D60 [mm]	D50 [mm]	D30 [mm]	D10 [mm]	Cc [-]	Cu [-]	Clasificación
Rep. 600	16.90	15.55	13.16	5.92	1.73	2.85	GP
Rep. 2400	15.72	16.12	13.72	3.65	3.29	4.31	GP

Con estos valores se determinan los parámetros de rotura entre la etapa de consolidación y corte de las muestras, y la rotura considerando ambas etapas.

Para el material representativo de 600 [kPa] presenta una rotura por corte de 0.32 [-] y total de 0.39 [-]. Estos valores de rotura son un 46% inferior a la rotura presentada en el ensayo de control a 600 [kPa] por lo que se dice que no se logra representar este fenómeno. Además, la fractura por corte es un 78% superior a la calculada para el ensayo de control a la misma presión de confinamiento. Lo anterior se asocia a que el material posterior a la consolidación (Figura 30) presenta grietas en formación que fallan al momento de ser sometidas a esfuerzos cortantes.



Figura 30. Partículas del material consolidado unidimensionalmente a 600 [kPa]. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al material representativo de 2400 [kPa], este presenta un parámetro de rotura de 0.26 [-] posterior al corte y de 0.63 [-] en total. Estos valores son inferiores a los del otro ensayo representativo, ya que este se encuentra en el máximo potencial de fractura al estar en la recta de consolidación con pendiente similar a la de la línea de estado crítico en el espacio $e - p'$. Lo anterior se respalda con la Figura 31, en la que se observa un decaimiento en la tasa de crecimiento del parámetro B_{10} a medida que aumenta el esfuerzo confinante en ensayos de corte realizados a la misma presión (100 [kPa]).

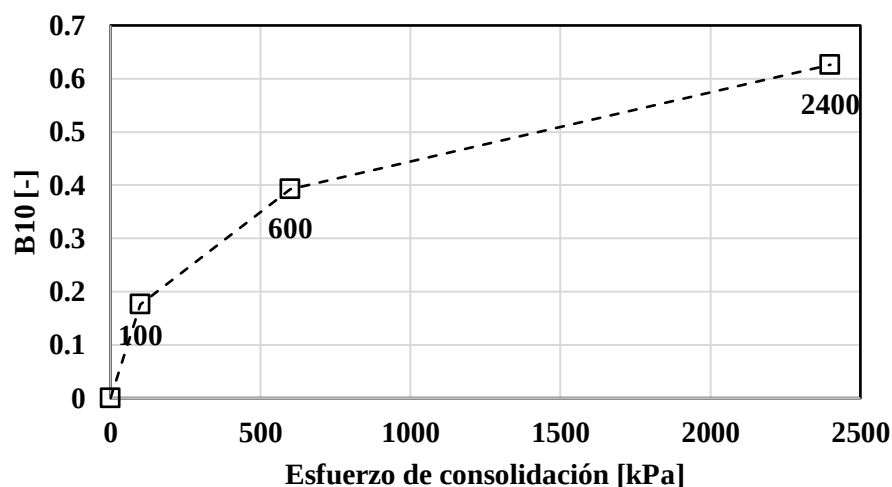


Figura 31. Rotura de partículas en función del confinamiento. Fuente: Elaboración propia.

5.6 Verificación de ecuaciones de ajuste

Se verifica la validez de las ecuaciones de predicción del cambio volumétrico propuestas determinando la tendencias de los cambios volumétricos medidos en las consolidaciones isotrópicas y unidimensional previas a las etapas de corte (Anexos I).

Se establece que el ajuste para el primer tipo de consolidación otorga valores representativos, ya que la regresión calculada difiere un 0 por ciento en el coeficiente cuadrático, un 1 por ciento en el coeficiente lineal y un 5 por ciento en la constante.

Para la unidimensional, el coeficiente cuadrático y la constante del ajustes varían significativamente, mientras que el coeficiente lineal varia un 12 por ciento. Esto se asocia al error experimental y la poca cantidad de data disponible.

6 Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se buscó caracterizar los parámetros gravimétricos y la respuesta de estéril confinado a presiones entre los 0 a los 2400 [kPa] utilizando técnicas de ensayo tradicionales y una técnica propuesta de combinación de ensayo de consolidación unidimensional con triaxial.

Se determina que material estudiado corresponde a una grava mal graduada con limo, la cual se ajusta a grava mal graduada para los ensayos de caracterización con la finalidad de representar un caso desfavorable para el fenómeno de rotura de partículas. La gravedad específica es de 2.65 [-], asociada a la mineralogía rica en cuarzo. La densidad mínima es 1.35 [g/cm³] y la máxima es 1.54 [g/cm³], lo que indica un rango acotado de densidad relativo, es decir, cambios bajos de masa o volumen cambian significativamente la densidad relativa.

Se somete al estéril con granulometría sintética a una serie de ensayos de caracterización a partir de los cuales se determina lo siguiente:

- A partir de los resultados y gráficos del ensayo de consolidación unidimensional, en el rango completo de presiones se observan 3 pendientes entre los 0 y los 2400 [kPa], cuando se espera que exista un valor único y constante al ser un material de grano grueso. Esto permite concluir que existen dos bandas de presiones en las que se presenta rotura de partículas: entre los 50 y los 100 [kPa] y entre los 400 y los 800 [kPa]. En cuanto al índice de compresión, se determina que el valor depende de la presión de confinamiento y el grado de rotura de partículas, para presiones: inferiores a los 75 [kPa] se obtuvo un valor de 0.003 [1/kPa], entre los 75 y los 600 [kPa] se obtuvo un valor de 0.035 [1/kPa] y sobre los 600 [kPa] se obtuvo un valor de 0.114 [1/kPa].
- La consolidación isotrópica de control permite validar tanto los resultados de la consolidación unidimensional, como la corrección de membrana propuesta por Bustamante et al., (2024). Esto ya que las variaciones del índice de vacío respecto al confinamiento para ambos ensayos, considerando la corrección, tienen valores y tendencias similares, con una diferencia mínima asociada a la variabilidad experimental. Además, permite proponer un método de equivalencia entre ensayos de consolidación, posibilitando así estudiar los comportamientos y condiciones finales de la probeta de ambos ensayos realizando el que sea más viable en lo económico y lo técnico. El cual queda validado con los resultados de las consolidaciones previas a los ensayos de corte ejecutados.
- En cuanto a la respuesta al corte del material, se logra la caracterización sólo para el rango de los 0 a 600 [kPa] utilizando los resultados de los ensayos de control, ya que los ensayos representativos otorgan resultados que no son coherentes con los antecedentes disponibles.
- Se determina que el material presenta un ángulo de fricción de 42.1 [°] para presiones entre los 0 y los 100 [kPa]. Además, se determina que este sufre una degradación a medida que aumenta el confinamiento, asociada a la rotura de partículas, hasta un valor de 36.4 [°] cuando se alcanzan los 600 [kPa], lo que concuerda con lo establecido por Linero-Molina et al. (2007).
- Respecto a la pendiente de la línea de estado crítico en el espacio e-p', el valor determinado de 0.159 [1/kPa] concuerda con índice de compresión unidimensional en el rango final de presiones de 0.114 [1/kPa], lo que permite concluir que sobre los 800 [kPa] el comportamiento del material se estabiliza a una condición comparable con el estado normalmente consolidado. Esto se respalda con los estudios del parámetro de rotura B₁₀, realizados tras cortar probetas representativas de distintos grados de rotura. Los resultados muestran que, a medida que aumenta el pre-confinamiento, disminuye la tasa de crecimiento de dicho parámetro. Además, se determina que el material sometido a la primera rotura es más frágil ante esfuerzos que el sometido a la segunda, ya que el parámetro B₁₀ asociado a la etapa de corte es mayor.
- De la dilatancia del material se observa que a 100 [kPa] la respuesta es contractivo – dilatante para la muestra de control y tiende a un comportamiento dilatante a medida que aumenta la rotura de partículas. Para la muestra sometida a 600 [kPa] se observa un comportamiento contractivo. Esto permite concluir que a mayor presión y rotura de partículas, el comportamiento del material tiende a presentar un comportamiento estable.

De los resultados de los ensayos de control y los de consolidación unidimensional se obtiene información valiosa sobre el comportamiento del material y relaciones entre los ensayos realizados, lo que eventualmente facilitaría el diseño de estas instalaciones. Se concluye que el material estudiado es susceptible a la rotura de partículas y que dicho fenómeno condiciona tanto la respuesta al corte como la granulometría. Además, se dice que para presiones superiores a la segunda banda de rotura el material se encuentra en un estado de rotura de partículas constante, estable y en las condiciones más desfavorables para la respuesta al corte.

Mediante estas comparaciones de los resultados respecto a los antecedentes disponibles se concluye que la técnica propuesta no logra representar la respuesta a corte esperable del material debido a que estos indican que el ángulo de fricción aumenta a medida que aumenta el esfuerzo de consolidación unidimensional previo al corte. Esto se asocia a que las probetas ensayadas en el grupo representativo se encuentran en un estado muy denso y las densidades son distintas entre ensayos. Otro factor clave que condiciona la respuesta es la presión de confinamiento de referencia de 100 [kPa], en la cual el material presenta un comportamiento de dilatancia inestable. Por esto, se sugiere realizar los ensayos triaxiales representativos a la máxima presión admisible y a una densidad de referencia, como una nueva forma de aproximación de la técnica propuesta. Por otro lado, se logra establecer que existe relación entre los ensayos de consolidación utilizados, con lo que se puede suplir el ensayo de consolidación isotrópica con el unidimensional o viceversa, permitiendo ejecutar el ensayo con mejor factibilidad y determinar los resultados deseados con el método propuesto.

7 Referencias

- Bard, E., Campaña, J., & Eugenia, M. (2012). *Waste Rock Behavior at High Pressures Comportment*.
- Burden, R., & Wilson, G. W. (2023). Commingling of Waste Rock and Tailings to Improve “Dry Stack” Performance: Design and Evaluation of Mixtures. *Minerals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/min13020295>
- Cardemil Magdalena. (2023). *Impactos socioeconómicos de la minería en Chile*. <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- Comisión Chilena del Cobre. (2023). *Ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile* (Archivo de Excel). Datos Abiertos - Gobierno de Chile. <https://datos.gob.cl/dataset/ley-promedio-de-mineral-de-cobre-en-las-operaciones-mineras-en-chile>
- Consejo Minero. (2024). *Cifras actualizadas de la minería*.
- Cueva, E., Mostacero, J. A., & Aguilar, J. C. (2017). *Geología y Alcances Generales del Yacimiento Minero de Antamina, Perú*.
- Das Braja. (2014). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ta ed.).
- Figuerola Alan, Ahumada César, & Momberg Danae. (2024). Main Considerations for Planning a Large-Scale Triaxial Test on Coarse Granular Materials. *Tailings Management*, 10, 32–37.
- Islam, K., & Murakami, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>
- Lade, P. V., Yamamuro, J. A., & Bopp, P. A. (1996). Significance of Particle Crushing in Granular Materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), 309–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:4\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309))
- Lambe Whitman, & Whitman Robert. (1972). *Mecánica de suelos*.
- Linero-Molina, S., Palma, C., & Apablaza, R. (2007). Geotechnical Characterization of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing. *Slope 2007: 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, 2007 12-14 September, Perth*, 59–75. https://doi.org/10.36487/ACG_REPO/708_2
- Bustamante, N., Suazo, G., Covacevich, J., & Musso, J. (2024). Experimental Study of the Geomechanically Behavior of Waste Rock and Mine Tailings Mixtures. *Tailings Management*, 696–703.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 th).
- Universidad Técnica Federico Santa María. (2023). *Mezclas de Relaves-Estériles Commingling - BHP*.
- Wickland, B. E., Wilson, G. W., Wijewickreme, D., & Klein, B. (2006). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. <https://doi.org/10.1139/T06-058>, 43(9), 928–945. <https://doi.org/10.1139/T06-058>

8 Anexos

A. Granulometría de material utilizado en la investigación de IDIEM

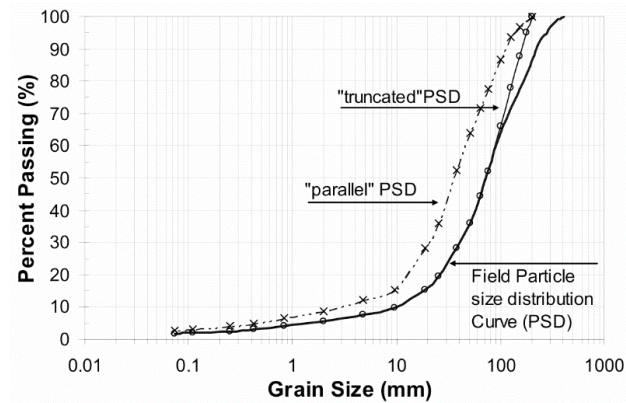


Figura 32. Curvas granulométricas del estéril en terreno (Field PSD), de ensayo ajustada por método de granulometría paralela (Parallel PSD) y de ensayo ajustada por método de truncamiento. Fuente: Linero-Molina et al. (2007).

B. Resultados de ensayos triaxiales de la investigación de IDIEM

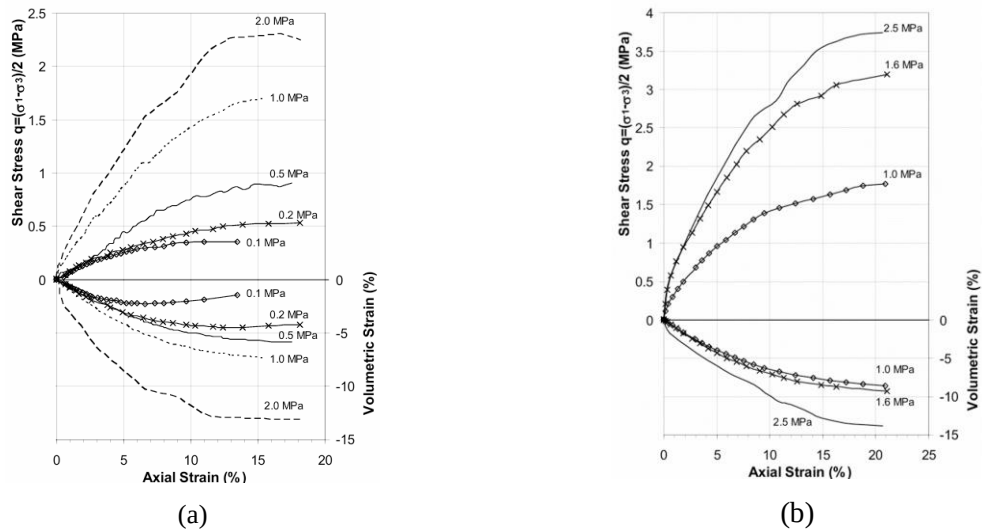


Figura 33. Esfuerzo de corte y deformación volumétrica versus deformación axial para material con granulometría: (a) paralela, (b) truncada. Fuente: Linero-Molina et al. (2007)

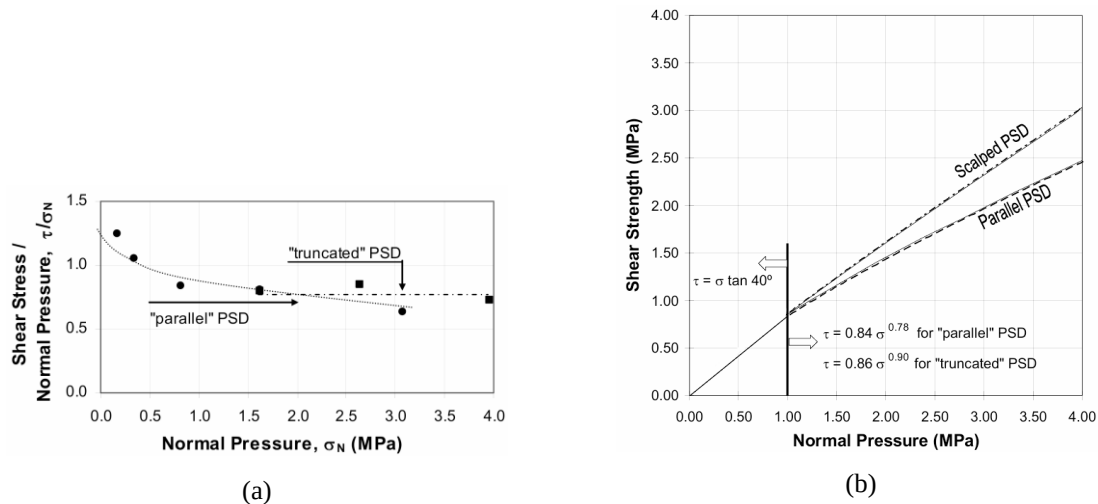


Figura 34. (a) Variación del ratio de esfuerzo de corte normalizado por la presión de confinamiento versus presión de confinamiento. (b) Envolvente de falla del estéril de CAD. Fuente: Linero-Molina et al. (2007)

C. Granulometrías post ensayo triaxial de la investigación de IDIEM

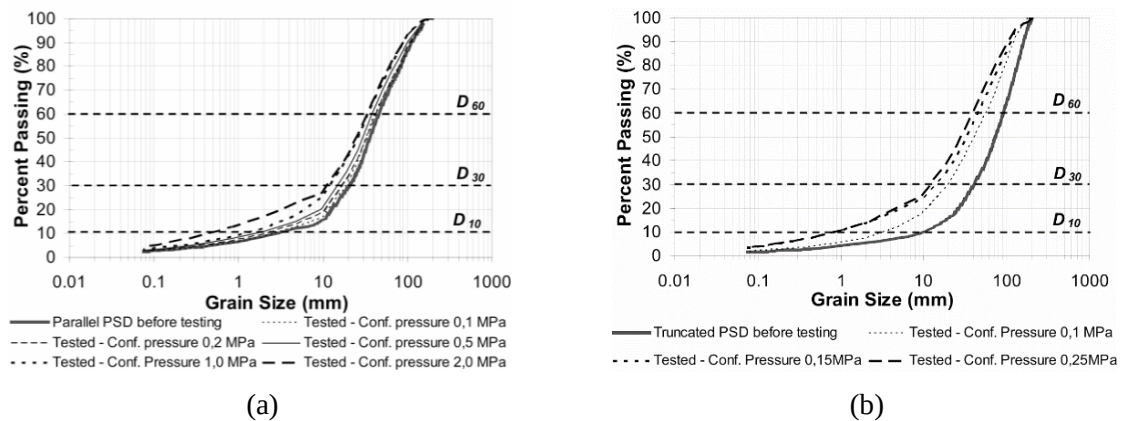


Figura 35. Granulometrías pre y post ensayo triaxial de las probetas con granulometría: (a) paralela, (b) truncada. Fuente: Linero-Molina et al. (2007)

D. Granulometría del material utilizado en la investigación de Geotecnia UTFSM

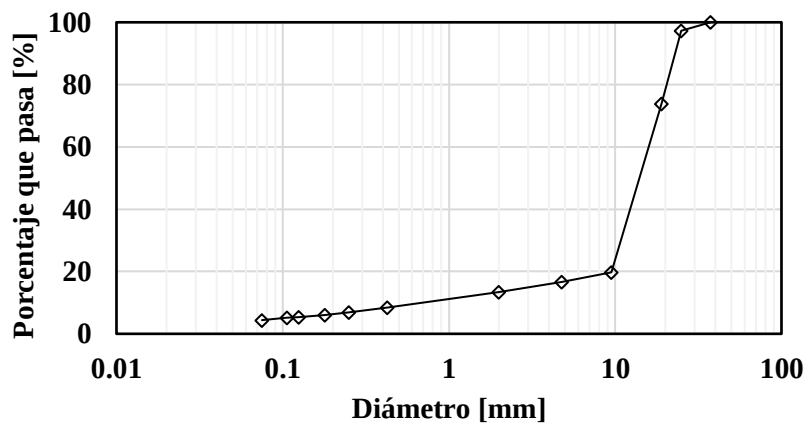


Figura 36. Distribución granulométrica del estéril de Antamina. Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María (2023)

E. Resultados de ensayos triaxiales de Geotecnia UTFSM

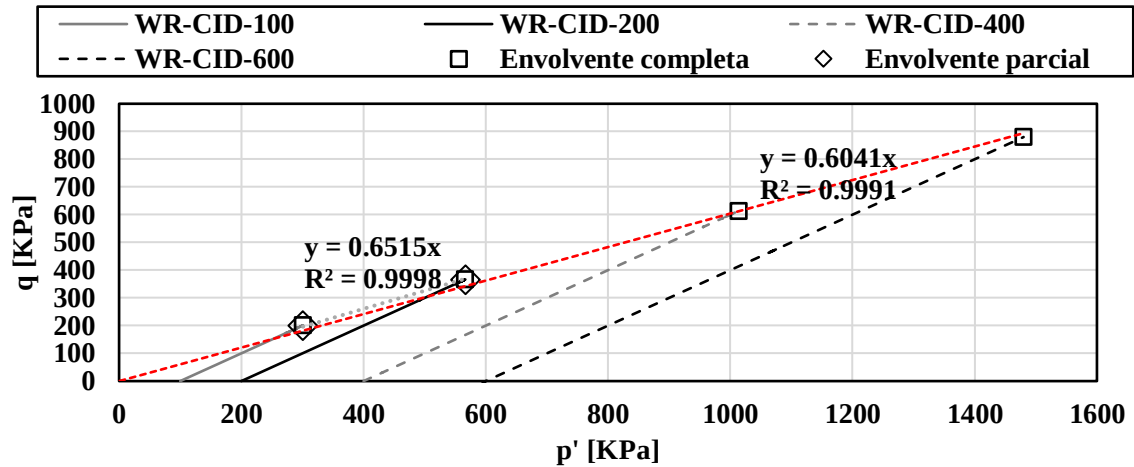


Figura 37. Trayectoria de tensiones en el espacio p' - q . Adaptación de figura 5-1 de Universidad Técnica Federico Santa María (2023)

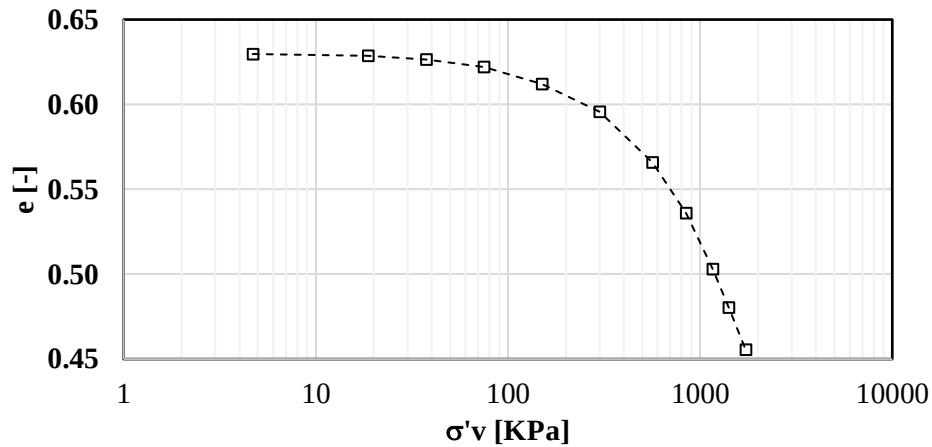


Figura 38. Curva de compresión del estéril. Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María (2023)

F. Granulometría post corte de la investigación de Geotecnia UTFSM

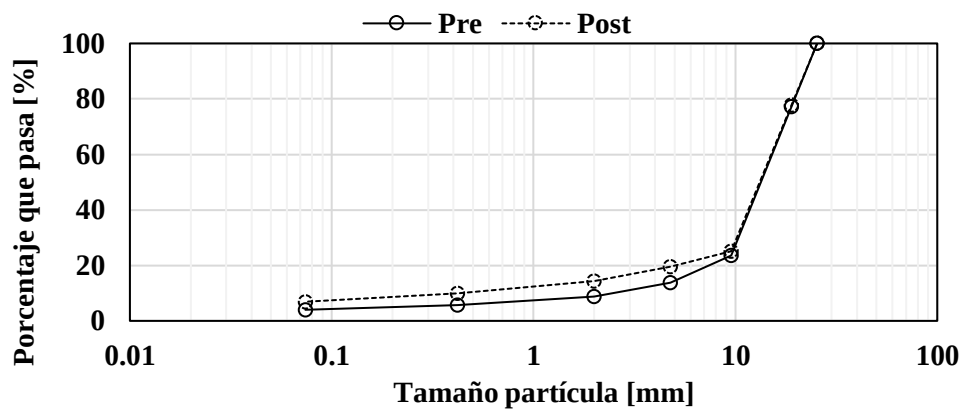


Figura 39. Curva granulométrica del estéril pre y post ensayo de consolidación unidimensional. Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María (2023)

G. Curva de calibración para cambio volumétrico por penetración de membrana

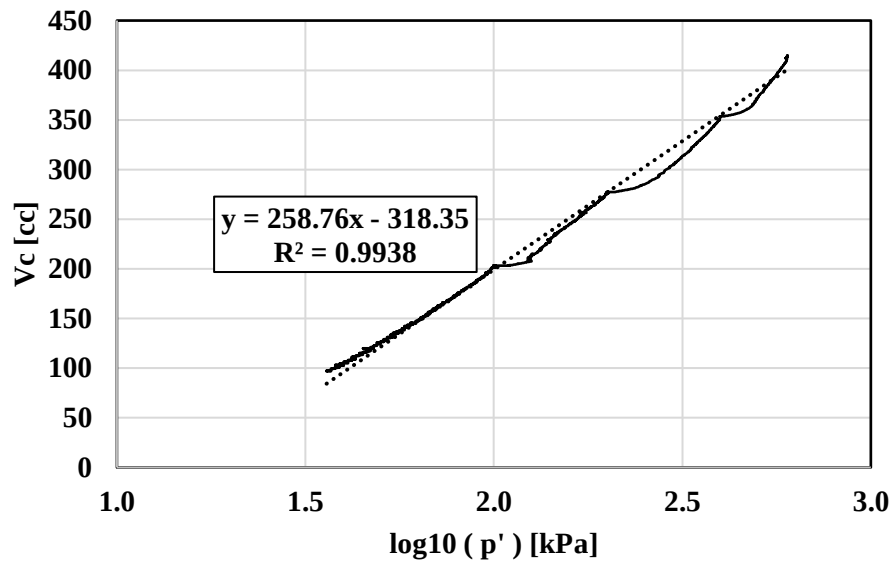


Figura 40. Cambio volumétrico de probeta cementada en función del confinamiento. Fuente: Elaboración propia.

H. Propiedades índice del estéril M2/D-C

Tabla 12. Densidades del estéril M2/D-C. Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María (2023)

Gs global [-]	D mín. [g/cm ³]	D máx. [g/cm ³]
2.732	1.627	1.754

I. Comparación de resultados con ecuaciones propuestas

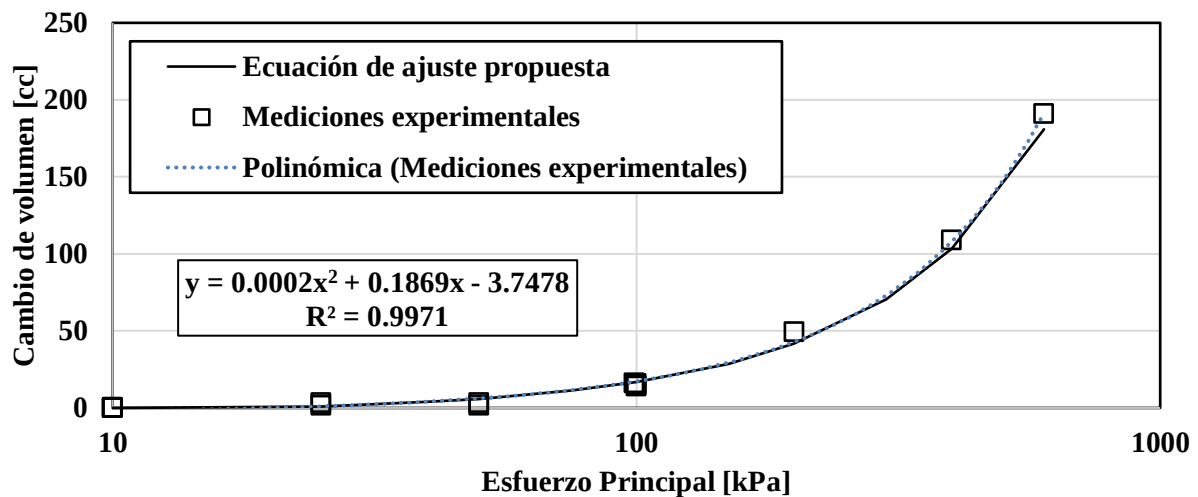


Figura 41. Cambio volumétrico en consolidaciones isotrópicas. Fuente: Elaboración propia.

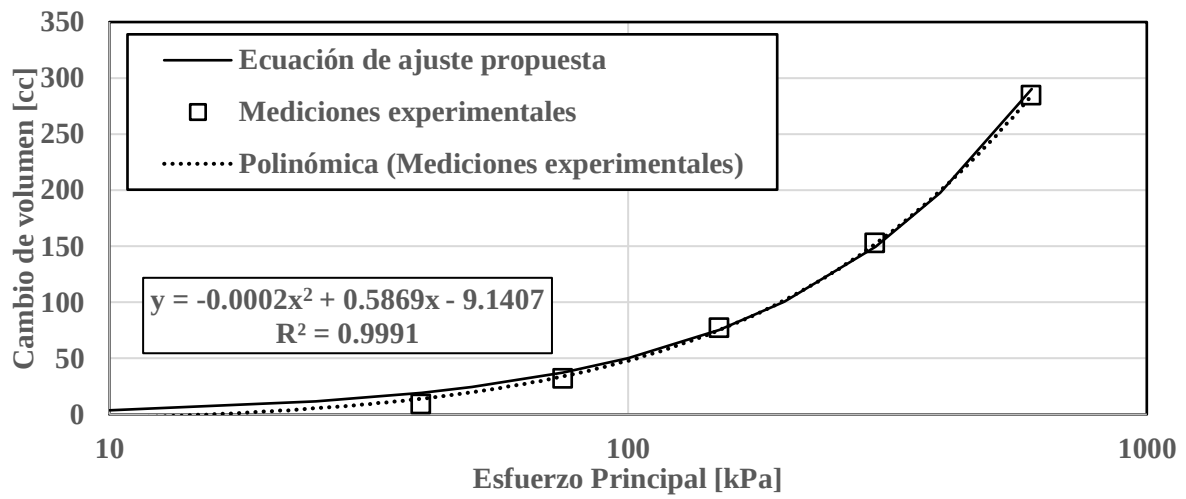


Figura 42. Cambio volumétrico en consolidación unidimensional. Fuente: Elaboración propia.