



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO TRIAXIAL MODIFICADO PARA EL ESTUDIO DE
UNA ARENA DE RELAVES EN CONDICIÓN PARCIALMENTE SATURADA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO IGNACIO HERNÁNDEZ VALLEJOS

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR PASTEN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FELIPE OCHOA CORNEJO

ROBERTO GESCHE SCHULER

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con Mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia
POR: Diego Hernández Vallejos
FECHA: 17/11/2017
PROF. GUÍA: Sr. César Pasten Puchi

IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO TRIAXIAL MODIFICADO PARA EL ESTUDIO DE UNA ARENA DE RELAVES EN CONDICIÓN PARCIALMENTE SATURADA

En el presente trabajo de título se desarrollaron metodologías para determinar propiedades de suelos parcialmente saturados mediante un equipo triaxial fabricado por GDS Instruments. Una vez establecido el procedimiento correcto, se redactaron manuales que detallan el uso del equipo triaxial para implementar tres distintos ensayos geotécnicos: ensayo triaxial convencional, determinación de la curva característica suelo-agua y ensayo triaxial de suelos parcialmente saturados. Inicialmente, se llevaron a cabo ensayos triaxiales convencionales en el equipo GDS Instruments y en un instrumento equivalente marca Humboldt, con el objetivo de establecer el correcto desempeño del primero, y a su vez, analizar el comportamiento saturado de una arena de relaves. Dicho material, corresponde a la fracción gruesa de un relave integral, con un bajo contenido de finos no plásticos. Se utilizaron probetas confeccionadas por el método de apisonamiento húmedo (*wet tamping*), a densidades relativas del 40 % y 60 %; ensayadas a confinamientos isotrópicos efectivos de 1, 2 y 4 kgf/cm², en condición drenada y no drenada. Posteriormente, se ejecutó un primer ensayo parcialmente saturado, correspondiente a la determinación de la curva característica suelo-agua, también denominada curva de succión, que relaciona el contenido de agua en la muestra de suelo, con la succión matricial generada. Se utilizó una probeta fabricada por apisonamiento húmedo, a una densidad relativa del 60 % y confinada isotrópicamente a 1 kgf/cm². Los resultados experimentales fueron comparados con un modelo teórico desarrollado por Fredlund et al. (2002), desarrollado a partir de la curva de distribución granulométrica del material. Por último, se efectuaron ensayos triaxiales parcialmente saturados drenados, utilizando una muestra armada por apisonamiento húmedo a una densidad relativa del 60 %. Las muestras fueron sometidas a confinamientos isotrópicos de 1, 2 y 4 kgf/cm² y a una succión matricial de $u_a - u_w = 0,02$ kgf/cm² y 0,2 kgf/cm², constante durante la etapa de aplicación del esfuerzo desviatorio, cuya duración se estableció en 2 días y 12 hrs, para asegurar el drenaje de las presiones de poro. Los ensayos triaxiales en las muestras parcialmente saturadas de la arena de relave, arrojaron resistencias mayores a las determinadas en las muestras saturadas. Como consecuencia, se puede anticipar que evaluar el comportamiento geomecánico de suelos con saturación parcial, puede resultar favorable para el diseño de tranques de relave.

*“No importa lo que te haya ocurrido en el pasado, no eres tu pasado,
eres los recursos y las capacidades que hayas recogido de él.
Y esa es la base para cualquier cambio...”*

El lobo de Wall Street.

A mis amados padres y hermanos...

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, Guido y Marioly, por darme la oportunidad de llevar a cabo cada uno de mis sueños, y no me refiero solo a mi desarrollo como profesional; por apoyarme y estar siempre presentes cada vez que lo necesité durante este largo proceso, en especial por esas tres llamadas diarias de primer año, por todo el amor que me entregan, infinitas gracias!. A mis hermanos menores Javier y Josefa, no puedo decir pequeños por mi pequeño gigante, gracias por siempre mostrarse orgullosos de mi y ser una gran motivación en mi vida, los amo enormemente.

Mi polola, mi rubia hermosa, gracias por aguantarme tanto tiempo, porque a pesar de la distancia siempre has estado presente, por escuchar mis alegrías y mis penas, por darme ánimo cuando más lo necesité durante mi etapa universitaria. Te has convertido en un pilar fundamental y agradezco a la vida por ponerte en mi camino.

Aunque me cueste escribir este párrafo, quiero agradecer a mis ángeles que partieron hace un tiempo; Mami Ana, Tata Guido, Mama Isolina, sé que me apoyan y se alegran de cada uno de mis logros de donde sea que se encuentren, los llevo siempre en mi corazón. Quiero agradecer también al que la vida me ha permitido retener, mi Tata Pablo, porque sé lo orgulloso que estás y por mostrarte más ansioso que yo de obtener mi título.

Muchas gracias a mis tíos y tías que se han mostrado siempre interesados en mi bienestar y por el cariño que me entregan. A mi madrina y mi tío Marcos, gracias por todo lo que hicieron por mí cuando llegué a Santiago y por la preocupación que mostraron hacia mí en todo momento.

Quiero dar las gracias a mis primos y amigos que me acompañan desde mi infancia; Gera, Leo, Tomás, Pato, Pancho, Felipe, Nacho, Dani, Karla, Horacio, nos separamos hace 7 años cuando me vine a Santiago, pero no desperdiciamos los momentos de reencuentro en nuestro pueblo querido.

Agradezco también a la gente linda que conocí durante mi etapa universitaria, Pipón, Alo, Macaya, Espe, Ro, Pame, Dani, Mauro, Meili, Ele, gracias por todos los momentos que hemos pasado, anécdotas que nunca se olvidan y por esas juntas santiaguinas, se han convertido en mi nueva familia. Espero que esto no acabe jamás y que los lazos sean para siempre.

Gracias a Omar González y Mario Carrillo por todas las enseñanzas, por el buen ambiente que generan y por convertirse en amigos que hicieron más grata mi estancia en el laboratorio de sólidos.

Quiero agradecer al profesor César Pastén por confiar en mí para desarrollar el presente trabajo y por guiar mi investigación. También a los profesores Roberto Gesche y Felipe Ochoa por conformar parte de mi comisión, por los consejos para desarrollar un mejor trabajo, gracias a todos por ser parte de mi formación como Ingeniero Geotécnico.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Organización del Trabajo	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Depósitos de Relave	4
2.1.1. Tranques de relave	4
2.2. Conceptos de Suelos Parcialmente Saturados	7
2.2.1. Fases de un Suelo Parcialmente Saturado	7
2.2.2. Fenómeno de Capilaridad	8
2.2.3. Componentes de la Succión de un Suelo	9
2.2.4. Curva Características Suelo-Agua (SWCC)	10
2.2.5. Estimación de Curva de Succión	15
2.2.6. Ecuaciones para Ajustar la Curva de Succión	21
2.2.7. Variables de Estado Tensional	22
2.2.8. Teoría de Resistencia al Corte	23
2.2.9. Medición de la Resistencia al Corte	27
2.2.10. Ensayo Triaxial Consolidado Drenado (CD)	29
2.2.11. Relación entre Curva de Succión y la Resistencia al Corte	31
3. Manual de Uso de Equipo GDS Instruments	40
3.1. Ensayo Triaxial Saturado	43
3.1.1. Verificaciones Previas al Ensayo	43

3.1.2.	Confección de la Probeta	46
3.1.3.	Aplicación de Dióxido de Carbono CO_2	47
3.1.4.	Montaje de Cámara Triaxial	48
3.1.5.	Saturación	51
3.1.6.	Procedimiento en GDSLab.exe	52
3.2.	Determinación de Curva SWCC	64
3.2.1.	Modificación del Pedestal de la Cámara Triaxial	64
3.2.2.	Confección de la Probeta	65
3.2.3.	Montaje de Cámara Triaxial	65
3.2.4.	Saturación	67
3.2.5.	Procedimiento en GDSLab.exe	68
3.3.	Ensayo Triaxial Parcialmente Saturado	72
3.3.1.	Procedimiento en GDSLab.exe	72
4.	Ensayos de Laboratorio	74
4.1.	Programa de Ensayos	74
4.2.	Equipos Triaxiales	75
4.2.1.	Equipo Humboldt	75
4.2.2.	Equipo GDS Instruments	76
4.3.	Procedimiento de Ensayos	77
4.3.1.	Triaxial Saturado	77
4.3.2.	Determinación de la Curva Característica Suelo-Agua	78
4.3.3.	Triaxial Parcialmente Saturado	80
5.	Resultados de Ensayos	82
5.1.	Ensayos de Caracterización	82
5.2.	Ensayos Triaxiales Convencionales	83
5.2.1.	Ensayos Triaxiales CID	83

5.2.2. Ensayos Triaxiales CIU	85
5.2.3. Resistencia Mecánica del Suelo Saturado	86
5.3. Curva de Succión - SWCC	88
5.3.1. Resultados Experimentales	88
5.3.2. Ajuste de Datos Experimentales	89
5.3.3. Estimación Teórica de SWCC	89
5.4. Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados	91
6. Discusión y Análisis de Resultados	97
6.1. Ensayos Triaxiales Saturados	97
6.2. Curvas Características Suelo Agua	98
6.3. Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados	99
7. Conclusiones y Recomendaciones	101
7.1. Conclusiones	101
7.2. Recomendaciones	102
8. Bibliografía	105
A. Anexos	108
A.1. Ecuaciones Utilizadas por GDSLab.exe	108
A.1.1. Cálculos para Triaxial Estándar	108
A.1.2. Cálculos para Triaxial Parcialmente Saturado	109
A.2. Resultados de Ensayos Triaxiales Saturados	112
A.3. Resultados de Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados	137

Índice de Tablas

1.1. Tranques de relaves activos en Chile con los muros de mayor altura, SER-NAGEOMIN.	2
2.1. Valores de los parámetros que definen n_f y m_f	18
2.2. Esquema del procedimiento para estimar la curva de succión final.	20
2.3. Propiedades de discos porosos fabricados por GDS Instruments.	28
2.4. Ensayos triaxial para suelos parcialmente saturados, Fredlund et al. (2012).	29
3.1. Ejemplo de etapas definidas para determinar la curva SWCC	71
3.2. Ejemplo de etapas definidas para un triaxial parcialmente saturado.	73
4.1. Plan de ensayos de caracterización.	74
4.2. Plan de ensayos triaxiales convencionales.	74
4.3. Plan de ensayo para determinar la curva SWCC.	75
4.4. Plan de ensayos triaxiales parcialmente saturados.	75
5.1. Resumen de propiedades índices de la arena de relave utilizada.	82
5.2. Parámetros de resistencia del material en condición saturada.	87
5.3. Valores típicos de ángulo de fricción interno para relaves, Blight (2013)	87
5.4. Resultados experimentales de la curva característica suelo-agua.	88
5.5. Parámetros para ajustar la curva SWCC según Fredlund y Xing (1994).	89
5.6. Parámetros para ajustar la curva SWCC según Pereira y Fredlund (2000).	89
5.7. Parámetros para ajustar la curva granulométrica.	90
5.8. Parámetros de resistencia de la arena de relave según succión matricial.	92
5.9. Parámetros de resistencia parcialmente saturados según confinamiento.	93

Índice de Figuras

2.1. Esquema de un tranque de relave construido con el método de aguas abajo, adaptado de Blight (2013).	6
2.2. Componentes de un suelo parcialmente saturado, Fredlund et al. (2012).	7
2.3. Modelo físico de capilaridad.	8
2.4. Curva característica suelo-agua típica, Fredlund et al. (2012).	11
2.5. Estado de un suelo en diferentes partes de la curva de succión.	12
2.6. Efecto de la historia de tensiones y método de preparación de la muestra, Fredlund et al. (2012).	13
2.7. Medición de SWCCs en arena <i>Beaver Creek</i> por humedecimiento y secado, Pham (2002).	13
2.8. Medición de SWCCs en limo por humedecimiento y secado, Pham (2002).	14
2.9. Variedad de curvas SWCC, Fredlund et al. (2012).	14
2.10. Variación en el ajuste de la curva granulométrica con los distintos parámetros, Fredlund et al. (2012).	16
2.11. Variación de la curva de succión para distintos valores de n_f y m_f	17
2.12. Determinación de los ajustes que permiten obtener los parámetros n_f y m_f	19
2.13. Criterio de falla Mohr-Coulomb para suelos saturados.	24
2.14. Criterio de falla Mohr-Coulomb extendido para suelos parcialmente saturados.	24
2.15. Diagrama p-q extendido.	26
2.16. Modificaciones en cámara triaxial convencional para ensayos parcialmente saturados, Fredlund et al. (2012).	28
2.17. Condiciones de esfuerzos durante las diferentes etapas de un ensayo triaxial consolidado drenado.	29
2.18. Trayectoria de tensiones seguidas durante un ensayo triaxial consolidado drenado a succión matricial constante.	30
2.19. Trayectoria de tensiones seguidas durante un ensayo triaxial consolidado drenado a confinamiento constante.	31
2.20. Comportamiento no lineal de la envolvente de falla de un suelo parcialmente saturado en el plano τ versus $u_a - u_w$, Gan (1986)	32

2.21. Resultados de una serie de ensayos de corte directo en arenas, adaptado de Donald (1956)	33
2.22. Relación entre la curva característica con la envolvente de resistencia al corte para distintos tipos de suelo, Fredlund et al. (2012).	34
2.23. Clasificación de ecuaciones propuestas en el análisis de la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado, Fredlund et al. (2012).	35
3.1. Marco de carga y cámara triaxial del equipo GDS Instruments.	41
3.2. Modificaciones de la cámara triaxial para ensayo parcialmente saturado. . .	41
3.3. Pistones controladores de presión y volumen de agua.	42
3.4. Pistón controlador de presión y volumen de aire.	43
3.5. Desaireador de agua GDS Instruments	43
3.6. Funcionamiento del desaireador de agua GDS Instruments.	44
3.6. Funcionamiento del desaireador de agua GDS Instruments (cont.).	45
3.7. Llenado de pistones controladores de presión y volumen de agua.	46
3.8. Circulación de dióxido de carbono por el interior de la probeta.	48
3.9. Adquisición de datos - <i>Serial Pad</i>	49
3.10. Conexiones en el pedestal de la cámara triaxial.	49
3.11. Sensor de presión de poros.	49
3.12. Pistones controladores de presión y volumen de agua.	50
3.13. Montaje de la cámara triaxial en el marco de carga.	50
3.14. Proceso de saturación de la muestra de suelo.	51
3.15. Lectura de datos de los distintos dispositivos GDS Instruments.	52
3.16. Barra de opciones para la visibilidad de lecturas.	52
3.17. Opciones en la ventana « <i>Object Display</i> » para dispositivos controladores. .	53
3.18. Estación de trabajo #2.	53
3.19. Formato del archivo de datos.	54
3.20. Intervalo de adquisición de datos.	54
3.21. Nombre y ubicación del archivo de datos.	55
3.22. Tipo de muestra a ensayar.	55

3.23. Ventanas emergentes luego de seleccionar « <i>Setup Sample Details</i> ».	56
3.24. Antecedentes y propiedades del material.	56
3.25. Agregar etapa de ensayo.	57
3.26. Configuración de la etapa « <i>Saturation Ramp</i> ».	57
3.27. Condiciones para finalizar la etapa « <i>Saturation Ramp</i> ».	58
3.28. Verificación del parámetro B.	58
3.29. Condiciones para finalizar la verificación del parámetro B.	59
3.30. Etapa de consolidación isotrópica.	59
3.31. Condiciones para finalizar la consolidación isotrópica.	60
3.32. Selección de interfaz para ensayo triaxial.	60
3.33. Implementación de ensayo triaxial convencional.	61
3.34. Ajuste automático del pistón de carga.	61
3.35. Condiciones para finalizar un ensayo triaxial convencional.	62
3.36. Verificación de las etapas definidas para el ensayo.	62
3.37. Ventana para dar comienzo al ensayo.	63
3.38. Opciones para graficar datos instáneamente.	63
3.39. Visualización de parámetros durante el progreso del ensayo.	64
3.40. Disco poroso saturado.	65
3.41. Sensor de presión atmosférica.	66
3.42. Conexiones en el pedestal de la cámara triaxial.	66
3.43. Pistón controlador de presión y volumen de aire.	67
3.44. Proceso de saturación a través del disco poroso (HAEPD).	68
3.45. Tasa de saturación utilizando el disco poroso.	68
3.46. Agregar etapa de ensayo usando el paquete <i>GDS_tt4DUNSAT</i> .	69
3.47. Opciones para manipular etapas de un ensayo parcialmente saturado.	70
3.48. Condiciones para finalizar cada etapa del ensayo.	71
3.49. Parámetros iniciales de la muestra de suelo ensayada.	72

4.1. Componentes del equipo triaxial Humboldt.	76
5.1. Curva de distribución granulométrica completa.	82
5.2. Resultados de ensayos triaxial CID con muestra a DR=40%.	83
5.3. Resultados de ensayos triaxial CID con muestra a DR=60%.	84
5.4. Resultados de ensayos triaxial CIU con muestra a DR=40%.	85
5.5. Resultados de ensayos triaxial CIU con muestra a DR=60%.	86
5.6. Parámetros de resistencia saturados.	87
5.7. Caracterización del material en el espacio $p-q$	88
5.8. Implementación del modelo propuesto por Fredlund et al. (2002).	90
5.9. Variación en la curva de succión según el parámetro α	90
5.10. Curva de succión obtenida para la arena de relave utilizada.	91
5.11. Resultados de ensayos triaxiales drenado saturados y parcialmente saturados.	92
5.12. Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 1 kgf/cm ²	93
5.13. Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 2 kgf/cm ²	94
5.14. Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 4 kgf/cm ²	94
5.15. Variación de la cohesión aparente con respecto a la succión matricial.	95
5.16. Comparación de modelos para estimar cohesión aparente con datos experimentales.	95
5.17. Variación del índice de vacíos para los distintos ensayos triaxiales parcialmente saturados.	96
A.1. Esquema de cada volumen de aire presente en el sistema.	111

1. Introducción

1.1. Motivación

El desarrollo de la mecánica de suelos clásica, se basa principalmente en tipos específicos de medios particulados; tales como, arenas, limos y arcillas en condición saturadas. Sin embargo, durante el desarrollo de la Ingeniería Geotécnica, se ha determinado que existen materiales, cuyo comportamiento no es consistente con lo establecido por los principios de la mecánica clásica de suelos saturados. Esta categoría, se conforma por los suelos parcialmente saturados, caracterizados por contener agua y aire en los vacíos de su esqueleto granular (Fredlund et al., 2012).

Dada la interacción entre ambos fluidos presentes en un suelo parcialmente saturado, se genera un estado de tensiones conocido como *Succión*, que determina una variación en las propiedades mecánicas e hidráulicas. En particular, se ha demostrado en ciertas investigaciones, que la presencia de succión favorece la resistencia al corte de un material, generando una cohesión aparente entre las partículas (Fredlund et al., 1978).

La tecnología ha permitido una importante evolución en los instrumentos utilizados para el análisis de propiedades que determinan el comportamiento geomecánico, ya sea en laboratorio como en terreno. El departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, posee un equipo triaxial marca GDS Instruments, que permite implementar ensayos en suelos parcialmente saturados, para evaluar los parámetros de resistencia de medios particulados que presentan esta condición.

El Dr. Delwyn G. Fredlund es un importante precursor del comportamiento parcialmente saturado, quien resume sus avances junto a otros autores, en el libro “Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice (Fredlund et al., 2012)”, herramienta fundamental para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En Chile, la industria minera corresponde a una de las principales actividades económicas. Durante los procesos de extracción y producción se genera una gran cantidad de desechos, denominados como “relaves”, cuyo volumen es determinado, además, por las bajas leyes de mineral presentadas actualmente.

La búsqueda del mejoramiento continuo en el diseño de los depósitos que contienen y resguardan este material, ha constituido parte importante del desarrollo de la Ingeniería Geotécnica en el país, con miras a comprender el comportamiento mecánico de los diferentes medios particulados presentes en estas obras.

Los depósitos que tienen como objetivo almacenar los desechos mineros, son implementados siguiendo diversas metodologías. En Chile, la más común corresponde a los tranques de relave, que conforman un 84,4 % del total de obras construidas.

Esta forma de almacenamiento, considera para su construcción y operación, la separación del material a través del proceso de hidrocicloneado. La fracción gruesa de arena se utiliza para la construcción de un muro de contención y la fracción fina resultante, se deposita directamente en la cubeta junto con el relave que no ha pasado por este proceso, este último se denomina “relave integral” (Fell et al., 2015). La Tabla 1.1 muestra los tranques de relave activos, que presentan los muros de contención más altos en Chile.

Tabla 1.1: Tranques de relaves activos en Chile con los muros de mayor altura, SERNAGEOMIN.

Faena	Región	Comuna	Nombre del Depósito	Altura del Muro	Tonelaje Actual
Candelaria	III	Tierra Amarilla	Candelaria	164	484.664.667
División Andina	III	Los Andes	Los Leones	160	192.095.740
Los Pelambres	III	Los Vilos	El Mauro	157	425.028.220
Caserones	III	Tierra Amarilla	Lamas la Brea	107	44.566.667

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Desarrollar y verificar metodologías de uso de un equipo triaxial modificado, para llevar a cabo ensayos geotécnicos que permitan determinar propiedades de suelos parcialmente saturados.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos abarcados en el presente trabajo de título, se detallan a continuación:

- Realizar una caracterización geotécnica de la arena de relave utilizada, y determinar ciertas propiedades índices.
- Verificar el correcto desempeño del equipo triaxial marca GDS Instruments, realizando ensayos triaxiales convencionales CID y CIU, con muestras confeccionadas a dos densidades distintas, tanto en el equipo GDS Instruments como en un equipo Humboldt.
- Establecer la metodología óptima que permita determinar la curva característica suelo-agua, en el equipo triaxial modificado.
- Establecer la metodología óptima para llevar a cabo ensayos triaxiales, a muestras parcialmente saturadas, en el equipo triaxial modificado.

- Desarrollar una serie de manuales, para detallar el uso del equipo GDS Instruments, en la implementación de los diversos ensayos que provee.
- Determinar la curva característica suelo-agua de la arena de relave, con la muestra armada a una cierta densidad y sometida a un confinamiento específico.
- Realizar una serie de ensayos triaxiales drenados, para obtener la resistencia al corte del material en condición parcialmente saturada, y comparar con la resistencia determina de los ensayos triaxiales convencionales.

1.3. Organización del Trabajo

A continuación, se detalla la organización de la información recopilada y resultados obtenidos de la actividad de laboratorio.

El Capítulo 2 presenta una recopilación de antecedentes, relacionados con los depósitos de relave y con el comportamiento parcialmente saturado de un suelo.

El Capítulo 3 recopila los diversos manuales, que detallan las metodologías óptimas para desarrollar los ensayos en el equipo GDS Instruments.

El Capítulo 4 muestra el programa experimental, los equipos de laboratorio utilizados y las metodologías respectivas a cada ensayo implementado.

El Capítulo 5 expone los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio, definidos previamente en el programa experimental.

El Capítulo 6 presenta una discusión y análisis de los resultados obtenidos, con el fin de establecer características que diferencian el comportamiento parcialmente saturado del saturado, enfocado principalmente en la resistencia al corte del suelo.

El Capítulo 7 señala las principales conclusiones del tema estudiado en el trabajo de título. Además de recomendaciones a considerar para futuras investigaciones relacionadas.

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Depósitos de Relave

El relave minero corresponde al producto final de procesos de extracción de minerales, desecho generado posterior a que el contenido valioso ha sido extraído. Un procedimiento de concentración para extraer el material valioso, utilizado en plantas mineras de Chile, se denomina *flotación*. Como resultado se producen residuos sólidos, llamado relave integral, correspondiente a una suspensión fina de sólidos en líquido, constituidos principalmente por el mismo material presente in-situ en el yacimiento, al cuál se le ha extraído la fracción con mineral valioso. Según el sistema de clasificación USCS, este material generalmente clasifica como un limo arenoso, con un índice de plasticidad (IP) bajo a nulo (Ramírez, 2007).

Las características y el comportamiento de la pulpa de relave, dependen fundamentalmente de las propiedades de las partículas sólidas, su reología y de la concentración en peso de los sólidos (C_P), siendo este el último parámetro, que se define en la Ec. 2.1, fundamental para la clasificación de los tipos de relave y su forma de almacenamiento.

$$C_P = \frac{W_{\text{relave}}}{W_{\text{relave}} + W_{\text{agua}}} \quad (2.1)$$

Donde:

W_{relave} = Peso seco del relave.

W_{agua} = Peso de agua.

La disposición y almacenamiento de estos desechos, da lugar a los distintos tipos de depósitos de relave, definidos como obras constructivas que tienen como objetivo, contener estos materiales generados por la actividad minera.

Actualmente en Chile se consideran los siguientes tipos de depósitos: Tranque de relave, embalse de relave, ambos presentan $C_P \approx 50\% - 65\%$, depósito de relave espesado, cuya concentración en peso de sólidos corresponde a $C_P \geq 65\%$, depósito de relave filtrado y depósito de relave en pasta, ambos con $C_P \geq 75\%$. Siendo el primero de ellos en el cuál se centra la presente investigación.

2.1.1. Tranques de relave

Es el método de almacenamiento de relave más utilizado en Chile, debido al bajo costo de inversión en comparación a otros tipos depósitos. Estas obras consideran para la construcción y operación del muro, la parte gruesa o arena, del relave integral. La Fig. 2.1 presenta un esquema básico de como se constituye un tranque de relave contruido con el método de aguas abajo.

La separación de la fracción gruesa de la más fina del relave integral, se lleva a cabo mediante el proceso de hidrocicloneado; el que consiste en alimentar un ciclón con el material completo, el cual mediante rotación permite que por la parte inferior de la estructura, se obtenga el contenido de mayor tamaño de partícula. Por la zona superior del ciclón se expulsa el material más fino, que no califica como competente para el crecimiento del muro y se vierte en la cubeta del depósito (Fell et al., 2015).

Los estándares de operación de este tipo de depósitos, establece que el porcentaje de relave sometido al proceso de hidrocicloneado, depende de la arena necesaria para la construcción del muro, asociado a su vez al nivel de crecimiento y a la inclinación del talud (menores inclinaciones generan aumentos en el volumen de arenas).

La cubeta del tranque se compone mayoritariamente de relave integral no cicloneado, el cual tiene un porcentaje de finos en torno al 50% y su concentración de sólidos varía entre el 50% y 65%, lo que permite transportarlo gravitacionalmente en forma de pulpa. Por otro lado, una menor parte se deposita en la cubeta en forma de lamas provenientes del proceso de hidrocicloneado, las cuales tienen un porcentaje de finos mayor o igual al 80%.

La arena que se utiliza para la construcción del muro de contención, debe tener un porcentaje de finos máximo de 20% y se comienza a depositar sobre un muro de partida construido con material de empréstito, que sirve para dar la estabilidad inicial al muro de arenas. El diseño de este sistema de contención, debe considerar la estabilidad del muro, la disponibilidad de arenas, los costos de operación, el plan minero de producción, la operatividad del sistema, entre otros (Barrera et al., 2011).

El crecimiento de un tranque de relave, en particular el muro de arenas, se lleva a cabo por etapas que dependen del requerimiento de volumen embalsado. Para configurar el muro de contención, se han desarrollado tres diferentes formas de disponer la fracción gruesa del relave integral y se detallan a continuación:

Muro con el método aguas arriba: Consiste en un muro inicial construido con material de empréstito compactado. Las primeras descargas de relave, deben ser controladas con el fin de asegurar que la fracción gruesa del relave integral, quede situada cerca del muro preliminar. Es probable que la fracción gruesa, dispuesta bajo el nuevo muro de contención, quede depositada a una densidad relativa baja a media, por lo tanto, si se encuentra en condición saturada y sujeta a un evento sísmico, da lugar a un fenómeno de licuefacción (Fell et al., 2015). Como consecuencia, este método no es recomendado para zonas sísmicas, no está contemplado aprobar este tipo de proyectos actualmente en Chile.

Muro con el método aguas abajo: Al igual que el método anterior, la construcción se inicia con un muro de partida de material de empréstito compactado. Una vez que se desea aumentar la altura del depósito, se añade la fracción gruesa del relave integral hacia aguas abajo del muro preliminar y se procede a compactar. La fracción fina obtenida del proceso de hidrocicloneado, se vacía aguas arriba del muro, generando la denominada cubeta del tranque. Este método requiere disponer de un gran volumen de arenas; permite generar muros resistentes y estables ante sollicitaciones sísmicas, por lo que es altamente utilizado en países como Estados Unidos, Canadá y Chile (Blight, 2010).

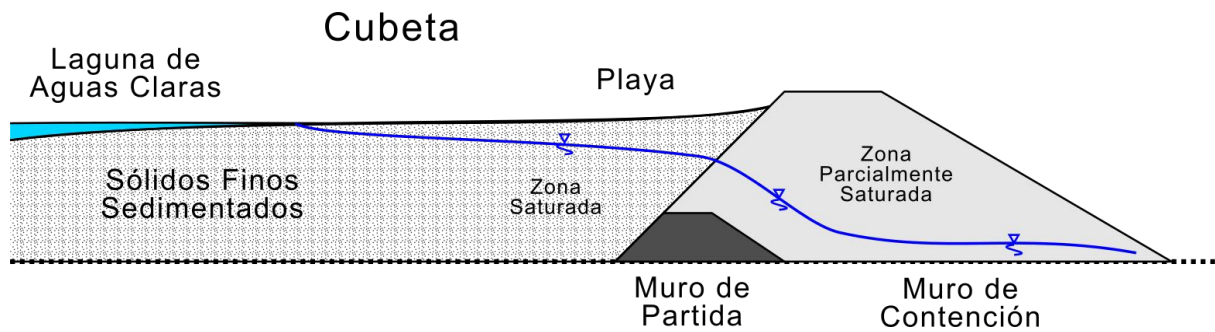


Figura 2.1: Esquema de un tranque de relave construido con el método de aguas abajo, adaptado de Blight (2013).

Muro con el método eje central o mixto: El presente método se inicia, al igual que los anteriores, con un muro de partida constituido por material de empréstito compactado. Cuando es necesario aumentar la altura del muro de contención, se deposita la fracción gruesa del relave hidrocicloneado, hacia el lado de aguas abajo y la fracción fina hacia el lado de aguas arriba; manteniendo el plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Este método, junto al de aguas abajo, son los que contempla la legislación chilena en los proyectos de tranques de relave.

2.2. Conceptos de Suelos Parcialmente Saturados

2.2.1. Fases de un Suelo Parcialmente Saturado

Un suelo parcialmente saturado se define típicamente como una combinación de tres fases: sólido, agua y aire. Sin embargo, es más correcto reconocer la existencia de una cuarta fase, denominada interfaz aire-agua o capa contráctil (Fredlund y Morgenstern, 1977). En términos prácticos, esta cuarta componente corresponde al menisco que se configura al disponer agua en algún elemento específico, como un poro entre partículas de suelo.

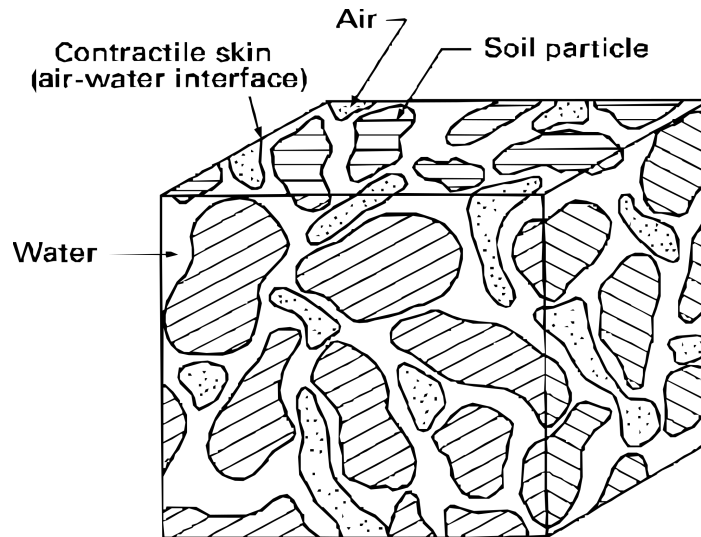


Figura 2.2: Componentes de un suelo parcialmente saturado, Fredlund et al. (2012).

Se reconocen cuatro fases por el rol distintivo de la interfaz aire-agua en el comportamiento de un suelo parcialmente saturado. La capa contráctil actúa como una membrana delgada, dispuesta en los vacíos del esqueleto granular. Formando una partición fija entre las fases de agua y aire. Cambios en el estado tensional de la interfaz aire-agua, puede provocar variaciones en el contenido de agua, cambios volumétricos y alteraciones en la resistencia al corte.

Esta capa contráctil, conforma una barrera entre las fases agua y aire, determinando el contenido volumétrico de ambos fluidos, por lo tanto, determina el grado de saturación de un material parcialmente saturado. La propiedad característica de la interfaz aire-agua, corresponde a la habilidad de ejercer un esfuerzo de atracción entre las partículas. Se comporta como una membrana elástica sometida a tensión y dispuesta entre el esqueleto granular del suelo (Fredlund et al., 2012).

La interfaz aire-agua, es considerada como parte de la fase de agua cuando se aplican cálculos de propiedades índices. Por lo tanto, para este ejercicio se considera que un material parcialmente saturado, está conformado sólo por tres fases: agua, aire y partículas sólidas.

2.2.2. Fenómeno de Capilaridad

El fenómeno de capilaridad está relacionado principalmente con el concepto de succión matricial. El aumento en la altura de una columna de agua en un tubo capilar y el radio de curvatura de la interfaz aire-agua, influyen directamente en la relación del contenido de agua y la succión que se genera en un suelo.

Al insertar un tubo de vidrio en un volumen de agua, bajo condiciones de presión atmosférica (ver Fig. 2.3), el agua comienza a ascender por el tubo, como resultado de la tensión superficial de la capa contráctil y la tendencia que presenta el agua de mojar la superficie del tubo (Fredlund et al., 2012).

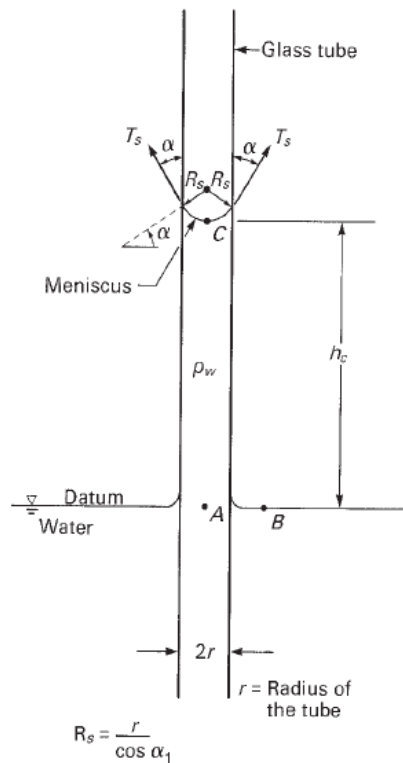


Figura 2.3: Modelo físico de capilaridad.

La tensión superficial T_s actúa alrededor de la circunferencia formada por el menisco (interfaz aire-agua) y se configura en un ángulo α con respecto a la vertical, conocido como el *ángulo de contacto*, cuya magnitud depende de la adhesión que se genera entre las moléculas de agua que conforman el menisco y el material que comprende.

Realizando equilibrio de fuerzas en el eje vertical del tubo presentado en la Fig. 2.3, se obtiene que la tensión superficial del agua, expresión de la izquierda en la Ec. 2.2 es la responsable de sostener el peso de la columna de agua, expresión de la derecha en la Ec. 2.2.

$$2\pi r T_s \cos(\alpha) = \pi r^2 h_c \rho_w g \quad (2.2)$$

Donde:

r = Radio del tubo capilar, m.

T_s = Tensión superficial del agua, N/m.

α = Ángulo de contacto, °.

h_c = Altura capilar, m.

g = Aceleración de gravedad, m/s².

Reescribiendo la Ec. 2.2, se obtiene la altura máxima del agua en un tubo capilar h_c .

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad (2.3)$$

Donde:

R_s = Radio de curvatura del menisco ($r/\cos\alpha$), m.

Considerando una curva característica agua-suelo (ver Sección 2.2.4), obtenida a partir de una disminución del contenido de agua, el “valor de entrada de aire” corresponde al valor de succión en que el aire comienza a ingresar al suelo. Dicho valor se puede obtener mediante el modelo de capilaridad (Ec. 2.3). Sin embargo, la presión calculada es representativa sólo para suelos con partículas esféricas de tamaño semejante.

2.2.3. Componentes de la Succión de un Suelo

La succión presente en un suelo parcialmente saturado, se subdivide en dos componentes, correspondientes a la succión matricial y la succión osmótica. La succión total de un material granular ψ , se define como la suma de ambas (Fredlund et al., 2012).

$$\psi = (u_a - u_w) - \pi \quad (2.4)$$

Donde:

$u_a - u_w$ = Succión matricial, kPa.

u_a = Presión de aire, kPa.

u_w = Presión de poros, kPa.

π = Succión osmótica, kPa.

Succión Matricial $u_a - u_w$

La succión matricial es definida como la diferencia entre la presión de aire u_a y la presión de poros u_w . Está comúnmente asociada al fenómeno de capilaridad, proveniente de la tensión superficial del agua y producto de la interacción aire-agua.

Se puede desarrollar un modelo de doble curvatura, utilizando las bases de geometría analítica y equilibrio de fuerzas, para representar la geometría compleja de la interfaz aire-agua. La ecuación de Young Laplace emplea el concepto de doble curvatura, por lo tanto, proporciona una relación general entre la succión matricial y la geometría del menisco; puede ser escrita de la forma presentada en la Ec. 2.5.

$$u_a - u_w = T_s \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

R_1 y R_2 = Principales radios de curvatura del menisco, m.

Succión Osmótica ψ

La succión osmótica está relacionada con la concentración de sales en el agua presente en los vacíos del esqueleto granular. Una diferencia de concentración en distintos lugares de la masa de suelo, puede causar un movimiento de sales debido al gradiente, pero no un flujo de agua. Esta componente de la succión total, es producto de la fuerza ejercida sobre las moléculas de agua por la actividad química del suelo.

La mayoría de los problemas de ingeniería que involucran suelos parcialmente saturados, son resultado de cambios medioambientales. Por ejemplo, la acumulación de agua en el suelo de fundación de una casa, resulta en una disminución de la succión matricial. Del mismo modo, la estabilidad de un talud de suelo parcialmente saturado, puede verse disminuida por un exceso de agua-lluvia, que reduce la succión matricial. Por lo tanto, las situaciones cotidianas afectan en mayor medida a dicha componente de la succión total de un suelo; disminuyendo la transcendencia de la succión osmótica (Fredlund et al., 2012).

Cabe destacar, que en el presente trabajo, se hace referencia como succión de un suelo sólo a la componente matricial.

2.2.4. Curva Características Suelo-Agua (SWCC)

Las curvas características suelo-agua (*soil-water characteristic curve*) o curvas de succión, proveen una relación entre la masa y/o volumen de agua presente en el suelo y la energía de la fase de agua. Tienen un importante rol en la determinación de las propiedades de un suelo parcialmente saturado.

Las curvas de succión constituyen información primordial requerida para el análisis de filtraciones, resistencia al corte, cambio volumétrico, flujo de aire y flujo de calor en problemas de suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012). Por tal motivo, es necesario que la curva característica sea correctamente estimada (o medida) e interpretada. Es en general definida como la relación entre la cantidad de agua en el suelo y la succión matricial.

La Fig. 2.4 muestra una curva de succión típica con sus tres zonas distintivas. Los principales puntos de transición, corresponden al “valor de entrada de aire” y “valor residual” para succión y contenido de agua, definiendo tres partes en la curva. La zona límite, ocurre a bajos valores de succión y se caracteriza por una escasa variación en el contenido de agua del suelo. La zona de transición contiene los valores de succión en que el material presenta los mayores cambios en la saturación. La zona residual, representa una inflexión a elevados valores de succión, que se traduce en una dificultad de movilizar agua del material (Fredlund et al., 2012).

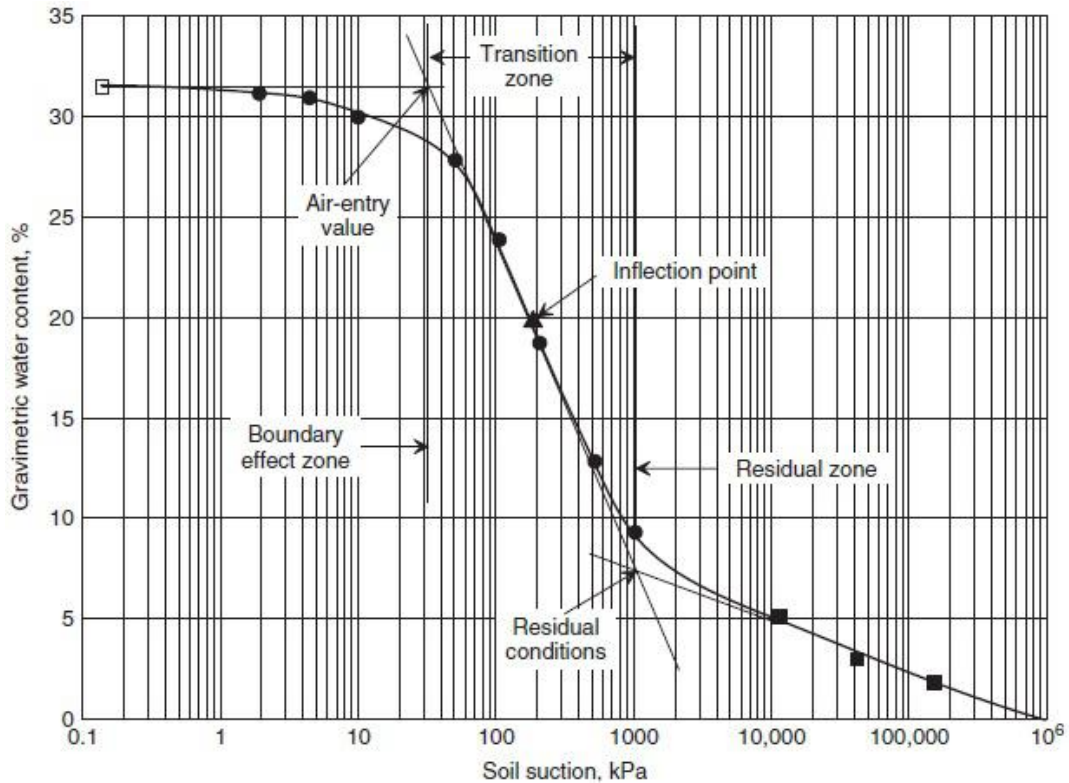


Figura 2.4: Curva característica suelo-agua típica, Fredlund et al. (2012).

El eje de las ordenadas del gráfico presentado en la Fig. 2.4, muestra el contenido de agua en el suelo, el cual puede ser determinado mediante tres parámetros:

- Grado de Saturación, S %:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.6)$$

Donde:

V_w = Volumen de agua en el suelo, cm^3 .

V_v = Volumen de vacíos en el suelo, cm^3 .

- Contenido Gravimétrico de Agua o Humedad, ω %:

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} \quad (2.7)$$

Donde:

M_w = Masa de agua en el suelo, grs.

M_s = Masa de suelo seco, grs.

- Contenido Volumétrico de Agua, θ %:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.8)$$

Donde:

V_t = Volumen total del suelo, cm^3 .

La Fig. 2.5 ilustra la variación en el contenido de agua esperado para las distintas etapas de la curva característica suelo-agua (Vanapalli et al., 1996).

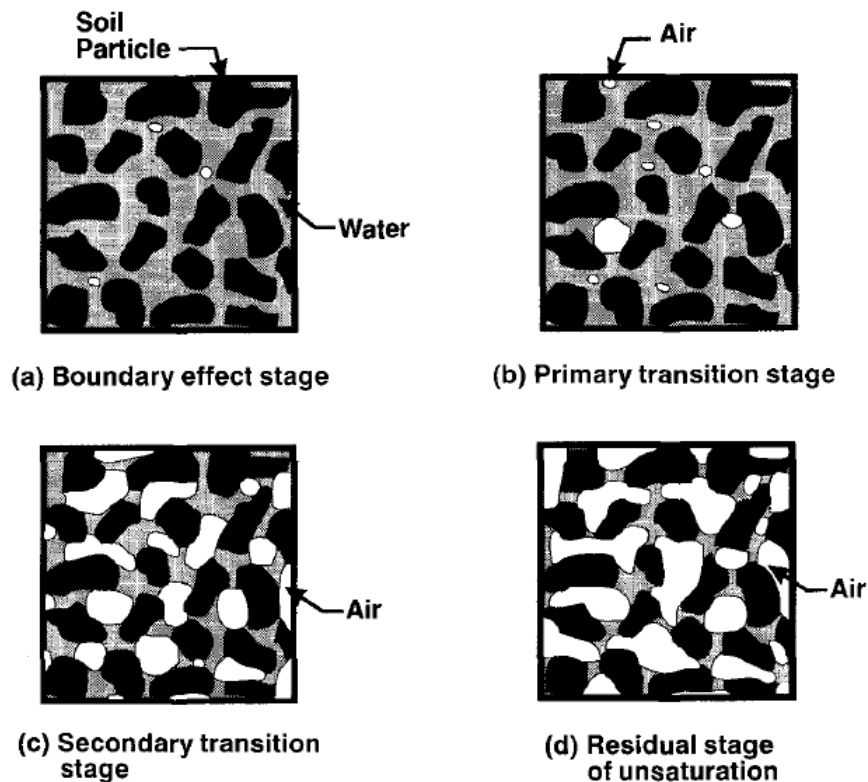


Figura 2.5: Estado de un suelo en diferentes partes de la curva de succión.

El comportamiento de una curva de succión, depende del estado inicial de la muestra de suelo y como fue confeccionada, por ejemplo: slurry, compactada o inalterada. La Fig. 2.6 ilustra las variaciones que se obtienen en la curva de succión, para un mismo suelo arcilloso, con diferente historia de tensiones y métodos de preparación de la muestra ensayada. Cabe señalar, que como contenido de agua se hace referencia a la humedad del suelo.

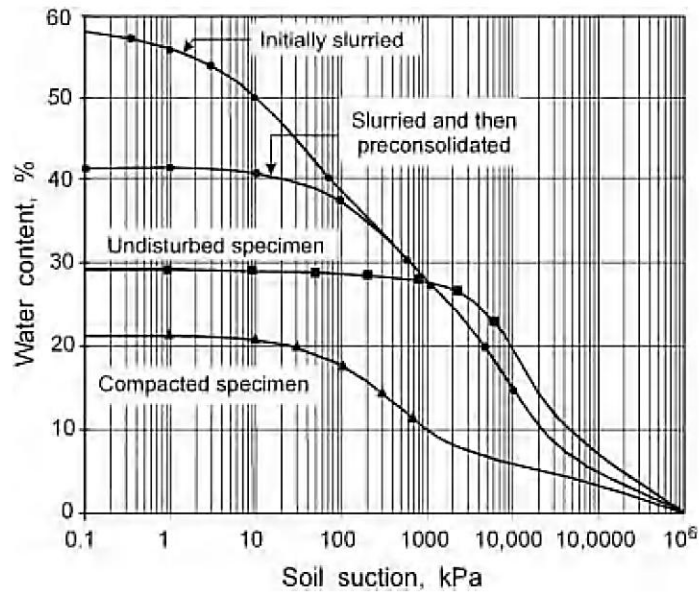


Figura 2.6: Efecto de la historia de tensiones y método de preparación de la muestra, Fredlund et al. (2012).

Los ciclos de histéresis que se pueden desarrollar en una curva característica, indican que no existe un único resultado para una misma probeta de suelo. Para implementar un ciclo, existen dos procedimientos que arrojan curvas significativamente diferentes. Uno de ellos corresponde al proceso de secado de la muestra, que consiste en el aumento de la succión matricial, obteniendo una desaturación del material. La técnica opuesta, denominada humedecimiento, consiste en disminuir la succión generada, aumentando el contenido de agua en la muestra de suelo. Las Figs. 2.7 y 2.8 muestran los resultados de curvas de succión obtenidas por Pham (2002), para dos tipos de suelos y con ambos métodos descritos.

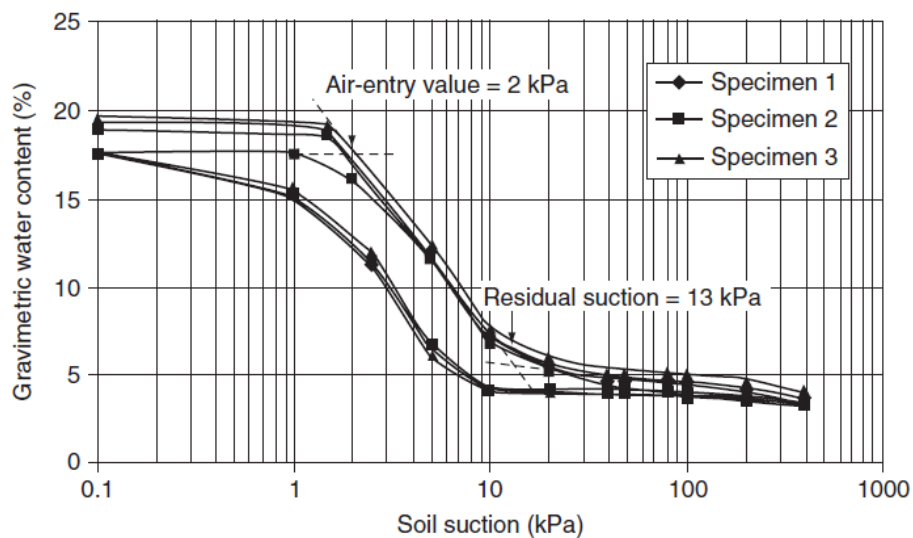


Figura 2.7: Medición de SWCCs en arena *Beaver Creek* por humedecimiento y secado, Pham (2002).

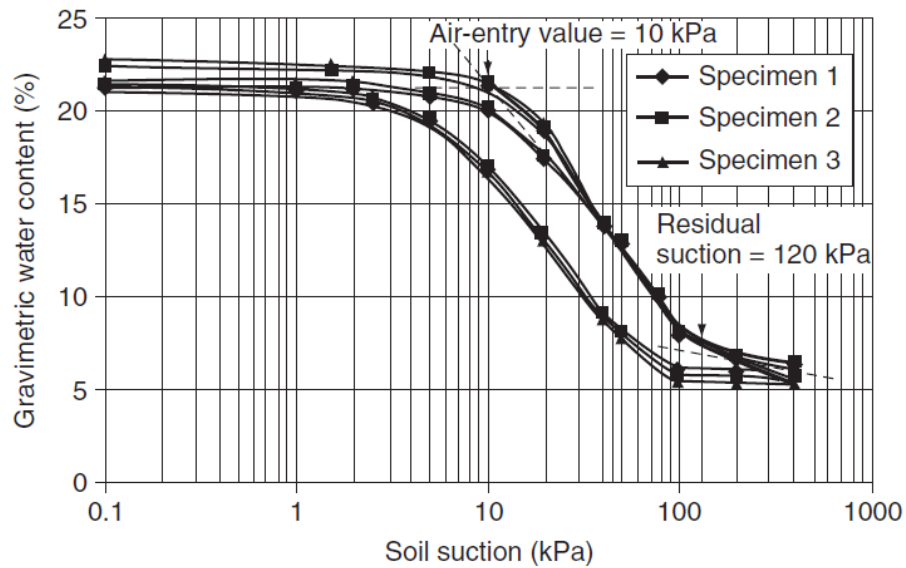


Figura 2.8: Medición de SWCCs en limo por humedecimiento y secado, Pham (2002).

En muchas ocasiones, es necesario establecer una diferencia en las propiedades de un suelo parcialmente saturado, según como se ha obtenido dicha condición, ya sea por secado o por humedecimiento. Alternativamente, es posible utilizar una curva de succión promedio para estimar dichas propiedades. La Fig. 2.9 presenta curvas características suelo-agua en un amplio rango de valores, para distintos tipos de suelo y utilizando ambos procedimientos, además de la curva promedio. Como contenido de agua, se hace referencia a la humedad del suelo.

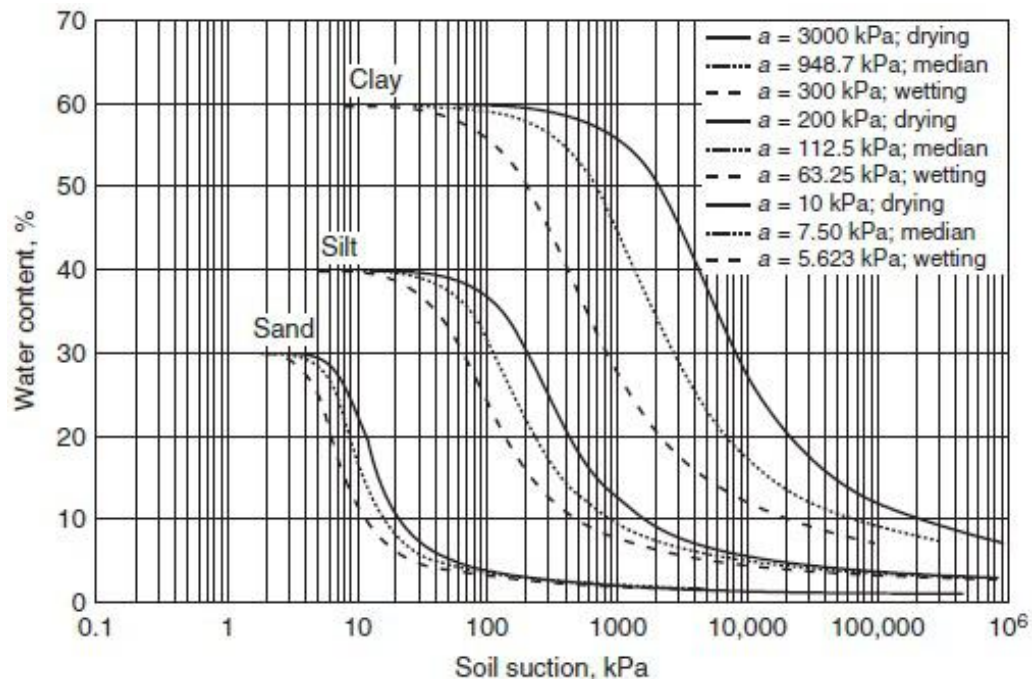


Figura 2.9: Variedad de curvas SWCC, Fredlund et al. (2012).

2.2.5. Estimación de Curva de Succión

La medición directa de ciertas propiedades de un suelo parcialmente saturado en laboratorio, representa costos de manufacturación excesivos. El valor de obtener una función de permeabilidad en un amplio rango de succión matricial, o estimar la variación de la resistencia al corte de un material en esta condición, puede resultar hasta 10 veces mayor que el costo de obtener propiedades equivalentes, en una muestra saturada.

Esta situación ha fomentado la investigación de nuevos métodos para implementar la mecánica de suelos parcialmente saturados, en la práctica de la Ingeniería Geotécnica.

A continuación, se presenta una metodología para estimar la curva característica agua-suelo (SWCC), basada en la curva de distribución granulométrica. El modelo propuesto por Fredlund et al. (2002), fue comparado con 15 distintos tipos de suelos, desde arenas a arcillas limosas.

Cabe destacar, que las técnicas de estimación resultan bastante atractivas, pero están asociadas a supuestos y limitaciones que deben ser consideradas.

Paso 1: Representación de la Curva Granulométrica

Se realiza un ajuste de los resultados de distribución granulométrica de la muestra de suelo, para el rango completo de tamaños de partículas. El arreglo se basa en la ecuación unimodal (Ec. 2.9) propuesta por Fredlund et al. (1997).

$$P_p(d) = \frac{1}{\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{a_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right]^{m_{gr}}} \left\{ 1 - \left[\frac{\ln \left(1 + \frac{d_r}{d} \right)}{\ln \left(1 + \frac{d_r}{d_m} \right)} \right]^7 \right\} \quad (2.9)$$

Donde:

a_{gr} es un parámetro relacionado con el punto de quiebre inicial de la curva en mm, Fig. 2.10(a).

n_{gr} es un parámetro relacionado con la inclinación de la curva, Fig. 2.10(b).

m_{gr} es un parámetro relacionado con la forma de la fracción fina, Fig. 2.10(c).

d_r es un parámetro relacionado a la cantidad de finos en el suelo en mm, Fig. 2.10(d).

d es el diámetro de una partícula cualquiera en mm.

d_m es el diámetro mínimo de las partículas presentes en el suelo en mm.

La Fig. 2.10, muestra la variación de la curva que ajusta los resultados de la distribución granulométrica, según los parámetros presentes en la Ec. 2.9.

Para obtener cada esquema, se varía el parámetro representado, manteniendo constante el resto.

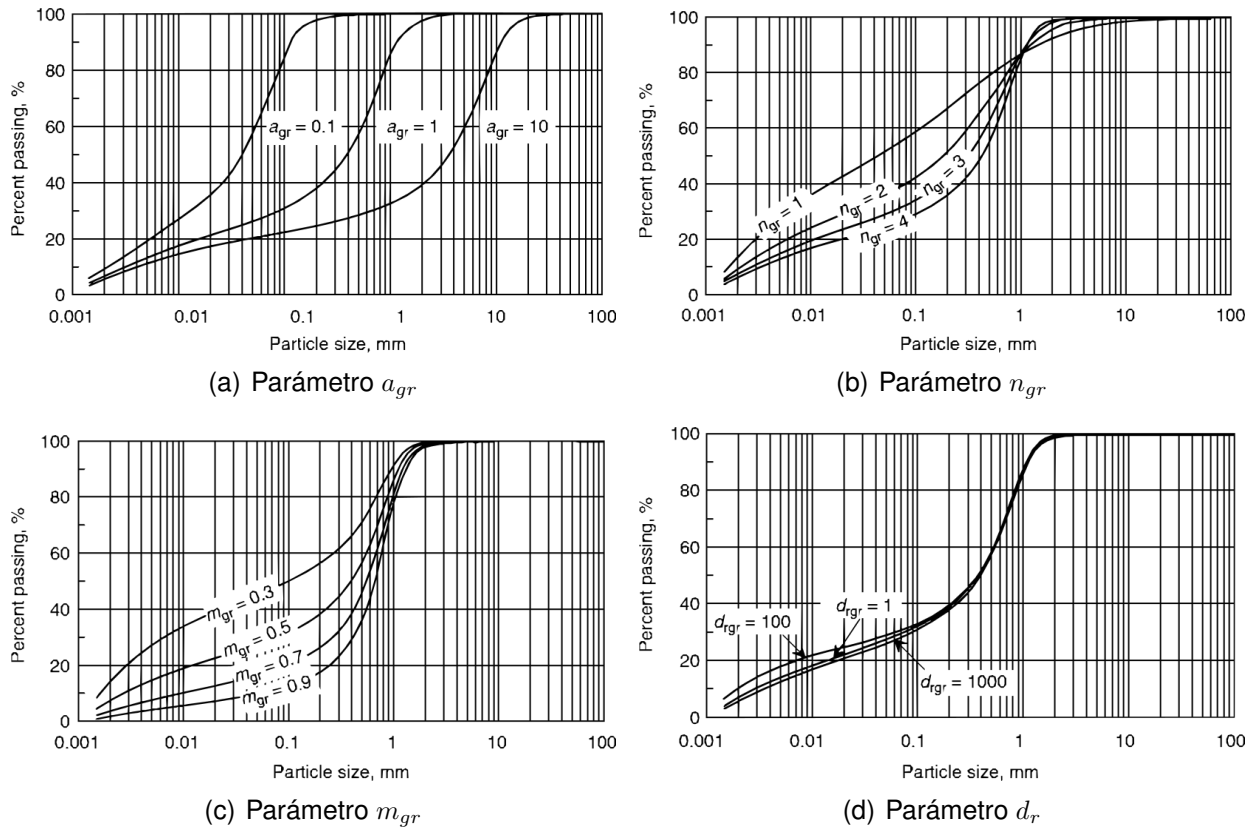


Figura 2.10: Variación en el ajuste de la curva granulométrica con los distintos parámetros, Fredlund et al. (2012).

Paso 2: Representación de la Curva de Succión (SWCC)

El modelo prosigue con la definición de la forma de la curva de succión. Fredlund y Xing (1994) establecieron que el contenido gravimétrico de agua en el suelo ω_w , varía en función de la succión matricial Ψ según la Ec. 2.10.

$$\omega_w = \omega_s \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right] \left[\frac{1}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\Psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \right] \quad (2.10)$$

Donde:

ω_s corresponde a la humedad de saturación del suelo, %.

a_f corresponde al *valor de entrada de aire* del suelo, kPa.

n_f es un parámetro relacionado con la tasa de desaturación.

m_f es un parámetro relacionado con la curvatura de la función en altos valores de succión matricial.

h_r es un parámetro constante usado para representar la succión matricial en condiciones residuales de humedad o saturación. Sin embargo, la curva no es sensible a variaciones en este parámetro, Fredlund et al. (2002) proponen utilizar 3000 kPa.

La Fig. 2.11 muestra como varía la curva de succión, dependiendo de los factores n_f y m_f , la determinación de dichos parámetros se detalla en el Paso 5.

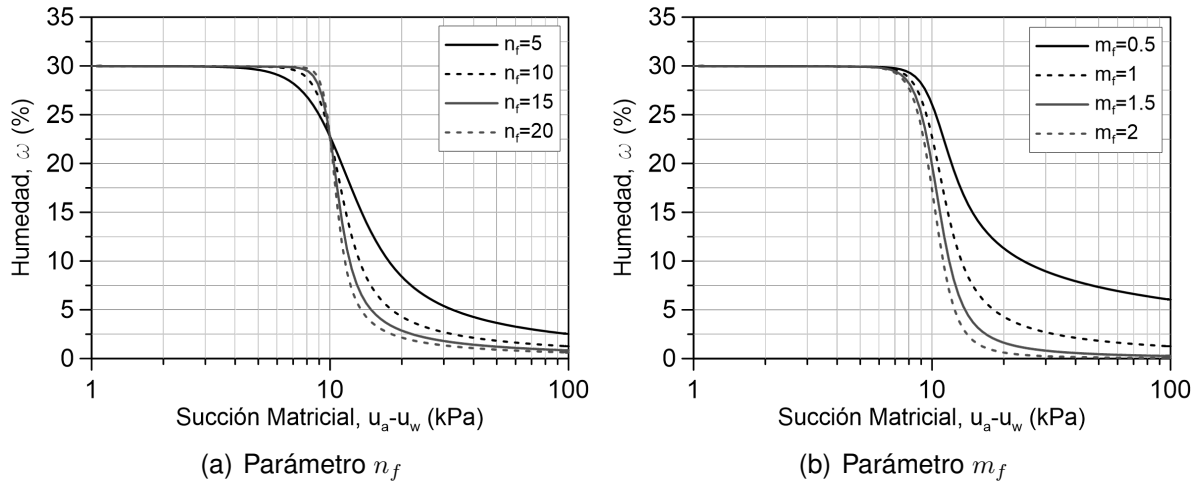


Figura 2.11: Variación de la curva de succión para distintos valores de n_f y m_f .

Paso 3: Estimación del Valor de Entrada de Aire

Se debe calcular un valor de entrada de aire para cada tamaño de grano presente en la discretización de la curva de distribución granulométrica. La estimación se basa en el modelo de capilaridad presentado en la sección 2.2.2.

La altura capilar h_c presentada en la Ec. 2.3, se puede reescribir como:

$$h_{af} = 2 \cdot \frac{T_s \cdot \cos(\alpha)}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (2.11)$$

Donde:

r corresponde al radio del poro, mm.

Finalmente, para calcular el valor de entrada de aire, se debe ponderar la altura capilar por el peso específico del agua γ_w . Por lo tanto, la determinación de h_c se reduce a la Ec. 2.12.

$$a_f = 2 \cdot \frac{T_s \cdot \cos(\alpha)}{r} \quad (2.12)$$

Paso 4: Estimación del Radio de Poros

Para estimar el radio del poro r , en función del radio de un cierto tamaño de partícula, se utiliza la Ec. 2.13. La cual se encuentra establecida en el “Manual Teórico” del software *SoilVision4*; una herramienta computacional desarrollada por Fredlund (2005), que realiza la modelación de curvas de succión, a partir de la distribución granulométrica.

$$r = R \cdot \left(\frac{4n^{1-\alpha}}{6} \right)^n \quad (2.13)$$

Donde:

R corresponde al radio promedio de la partícula, mm.

n corresponde a la cantidad de partículas esféricas.

α corresponde a un factor empírico mayor que 1.

Paso 5: Estimación de Parámetro n_f y m_f

Los parámetros n_f y m_f dependen únicamente del diámetro efectivo, que se detalla en el Paso 6. El cálculo se realiza según la Ec. 2.14, correspondiente a un ajuste obtenido a partir de una serie de resultados de medios particulados con propiedades conocidas, que se utilizaron para calibrar el presente modelo, Fig. 2.12.

$$p(\phi) = p_1 \left[\frac{1}{\ln \left\{ \exp(1) + \left[\frac{10^{-\log(d_e)-1}}{p_2} \right]^{p_3} \right\}} \right]^{p_4} + p_5 \quad (2.14)$$

Donde:

p_1, p_2, p_3, p_4 y p_5 corresponden a parámetros para ajustar las curvas de la Fig. 2.12.

d_e corresponde al diámetro efectivo.

$p(\phi)$ es el valor de n_f o m_f , según corresponda.

Tabla 2.1: Valores de los parámetros que definen n_f y m_f

Parámetro	n_f	m_f
p_1	19	1,5
p_2	50	100
p_3	30	10
p_4	1	1
p_5	1	0,5

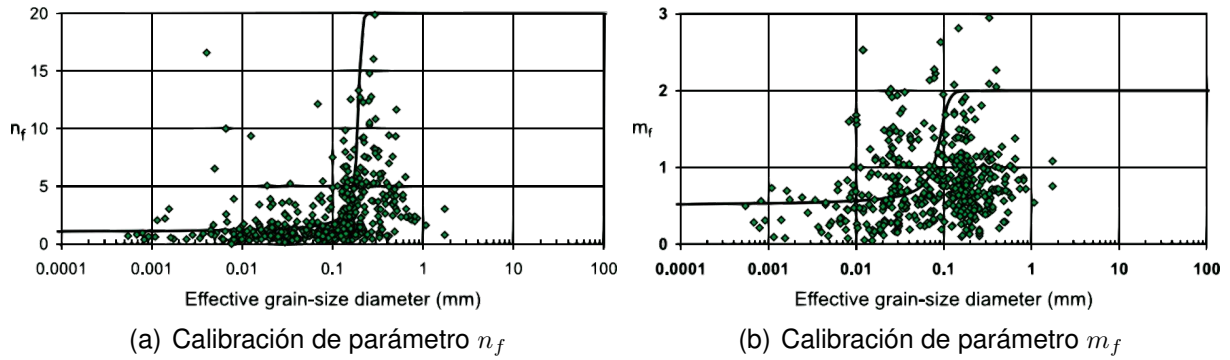


Figura 2.12: Determinación de los ajustes que permiten obtener los parámetros n_f y m_f .

Paso 6: Estimación del Diámetro Efectivo

El diámetro efectivo de partícula, para cada tamaño de grano establecido en la discretización, se lleva a cabo según la Ec. 2.15 propuesta por Vukovic y Soro (1992).

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_1}{d_1} + \sum_{i=2}^{i=n} \frac{\Delta g_i}{d_i} \quad (2.15)$$

Donde:

d_1 : corresponde al diámetro de la partícula de mayor tamaño, mm.

Δg_1 : corresponde al porcentaje retenido de la de la partícula de menor tamaño, %.

d_i : corresponde al diámetro de la partícula i -ésima, mm.

Δg_i : corresponde al porcentaje retenido de la partícula i -ésima, %.

Paso 7: Estimación de Curva de Succión Final

Por último, para establecer la curva de succión final, es decir, representativa de la distribución granulométrica completa. Se requiere primero, calcular el peso retenido de cada tamaño de partícula establecido en la discretización, utilizando la parametrización de la curva granulométrica en la Ec. 2.16.

$$W_i = \frac{P_p(d_{i+1}) - P_p(d_i)}{100} \cdot W_t \quad (2.16)$$

Donde:

W_i es el peso retenido de la partícula i -ésima, grs.

$P_p(d_i)$ es el porcentaje que pasa de la partícula i -ésima, %.

W_t es el peso total de la muestra, grs.

Por otra parte, es necesario calcular la porosidad de la muestra n , a partir del índice de vacío de confección e , según la Ec. 2.17.

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (2.17)$$

Donde:

e es el índice de vacíos de confección.

También es necesario calcular el volumen de vacíos que posee un arreglo granular de cada tamaño de partícula, según la Ec. 2.18.

$$V_i = \frac{W_i}{G_s \cdot \gamma_w} \cdot \frac{n}{1 - n} \quad (2.18)$$

Donde:

G_s corresponde a la gravedad específica de los sólidos de la muestra de suelo.

γ_w corresponde a la densidad del agua, grs/cm^3 .

Finalmente, para un cierto valor de succión, se suma el contenido de humedad multiplicado por la razón del volumen de vacíos presente en la partícula i , con respecto al volumen de vacíos total V_t , para cada tamaño de partícula resultante de la discretización de la curva granulométrica. Lo que permite establecer la curva de succión representativa.

$$\omega_{w_i}(d_i) = \sum_{i=1}^j \left(\omega_{w_{i,j}} \cdot \frac{V_j}{V_t} \right) \quad (2.19)$$

La Tabla 2.2 representa el procedimiento que se debe llevar a cabo utilizando la Ec. 2.19, para establecer la curva de succión característica de la distribución granulométrica completa.

Tabla 2.2: Esquema del procedimiento para estimar la curva de succión final.

Succión $u_a - u_w$ [kPa]	d_e [mm]			$\omega_{w_{\text{final}}}$ [%]
	0,0001	...	10	
100	0,01	...	0,001	$\sum (0,01; \dots; 0,001)$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
0,01	28	...	1	$\sum (28; \dots; 1)$

2.2.6. Ecuaciones para Ajustar la Curva de Succión

Existe un sinnúmero de investigaciones en las que se proponen ecuaciones empíricas, para ajustar datos experimentales que determinan la curva característica suelo-agua. Se puede diferenciar en ecuaciones que utilizan dos parámetros de ajuste y otro grupo de ecuaciones que utilizan tres parámetros.

Cada ecuación para definir la curva de succión, es escrita en términos del contenido gravimétrico de agua (humedad). Sin embargo, puede también ser escrita en términos del contenido volumétrico de agua, además del grado de saturación. Algunas ecuaciones son definidas mediante un contenido de agua adimensional Θ_d y otras utilizando un contenido de agua normalizado Θ_n . La humedad de saturación es designada por w_s y la humedad residual por w_r .

Las ecuaciones que permiten ajustar los datos experimentales, presentan un parámetro de ajuste relacionado con el valor de entrada de aire del suelo y una segunda variable relacionada con la desaturación del material. Aquellas ecuaciones que utilizan tres parámetros para definir el ajuste, usan una tercera variable la cual permite que en valores de baja succión matricial, es decir, cercanos al valor de entrada de aire, la curva característica tenga una forma independiente a la establecida para rangos de succión matricial mayor. Por lo tanto, aquellas ecuaciones que utilizan tres variables de ajuste, otorgan una mayor flexibilidad para el análisis de los resultados experimentales (Fredlund et al., 2012).

Cabe destacar que las ecuaciones propuestas, sirven para ajustar datos experimentales obtenidos por el método de secado, o bien, por el método de humedecimiento.

A continuación se presentan algunas de las ecuaciones que definen la curva característica suelo-agua, propuestas en la literatura:

Ecuación propuesta por McKee y Bumb (1987)

$$\Theta_n = \frac{1}{1 + \exp [(\psi - a_m) / n_m]} \quad (2.20)$$

Θ_n representa el contenido de agua normalizado por la humedad de saturación y la humedad residual del suelo:

$$\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r} \quad (2.21)$$

Donde:

a_m y n_m = parámetros de ajuste.

Ecuación propuesta por Fredlund y Xing (1994)

$$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln [e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}} \quad (2.22)$$

$w(\psi)$ representa la humedad del suelo para una succión ψ determinada.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]} \quad (2.23)$$

Donde:

a_f = parámetro de ajuste que es función del valor de entrada de aire del suelo, kPa.

n_f = parámetro de ajuste que es función de la tasa de desaturación una vez que el valor de entrada de aire es excedido.

m_f = parámetro de ajuste que es función del contenido de agua residual.

$C(\psi)$ = factor de corrección que es función de la succión matricial que presenta el suelo en condición residual.

Ecuación propuesta por Pereira y Fredlund (2000)

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (\psi/a_p)^{n_p}]^{m_p}} \quad (2.24)$$

Donde:

a_p = parámetro de ajuste que es función del valor de entrada de aire del suelo, kPa.

n_p = parámetro de ajuste que es función de la tasa de desaturación una vez que el valor de entrada de aire es excedido.

m_p = parámetro de ajuste que es función del contenido de agua residual.

2.2.7. Variables de Estado Tensional

El término “*variables de estado*” se define como variables no-materiales, necesarias para describir el comportamiento físico de un suelo, en este caso, parcialmente saturado.

Las variables de estado asociadas con las condiciones de esfuerzos, conforman el aspecto más importante en la formulación del comportamiento de un material. El descubrimiento de un esfuerzo efectivo en materiales saturados, permitió el desarrollo de la mecánica de suelos saturados (Terzaghi, 1936). Así mismo, la identificación de esfuerzos efectivos para suelos parcialmente saturados, constituye un elemento esencial en el desarrollo de la mecánica de suelos para este tipo de materiales.

Coleman (1962) sugirió el uso de tres variables de esfuerzos “reducidas”, $\sigma_1 - u_a$, $\sigma_3 - u_a$ y $u_w - u_a$, para representar la tensión axial, el confinamiento y la presión de poros respectivamente, en la interpretación de los resultados del ensayo triaxial.

Fredlund y Morgenstern (1977), formularon un análisis de equilibrio teórico para elementos de suelos parcialmente saturados. De la investigación se concluyó que existen tres posibles combinaciones de variables de esfuerzos, que pueden ser usadas para describir el estado tensional de un suelo en esta condición de saturación.

- $\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$
- $\sigma - u_w$ y $u_a - u_w$
- $\sigma - u_a$ y $\sigma - u_w$

Las tres combinaciones presentas son factibles de utilizar, sin embargo, la que ha recibido mayor aceptación en la formulación de problemas de comportamiento de suelos parcialmente saturados, es la primera de ellas ($\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$).

2.2.8. Teoría de Resistencia al Corte

La teoría para estudiar la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado, ha sido propuesta como una extensión de los conceptos y ecuaciones matemáticas que se han desarrollado para suelos saturados (Fredlund et al., 2012).

La resistencia al corte de un suelo saturado, puede ser descrito usando el criterio de falla de Mohr-Coulomb y variables de esfuerzos efectivos (Terzaghi, 1936):

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \quad (2.25)$$

Donde:

τ_{ff} = esfuerzo de corte en el plano de falla, en la falla, kPa.

c' = cohesión efectiva, kPa.

$(\sigma_f - u_w)_f$ = esfuerzo normal efectivo en el plano de falla, en la falla, kPa.

σ_{ff} = esfuerzo normal total en el plano de falla, en la falla, kPa.

La envolvente de falla para un material saturado, se obtiene de graficar una serie de círculos de Mohr correspondiente a la condición de falla, en un esquema de dos dimensiones, tal como se muestra en la Fig. 2.13. La recta tangente a los círculos de Mohr, equivale a la denominada envolvente de falla, definida por la Ec. 2.25.

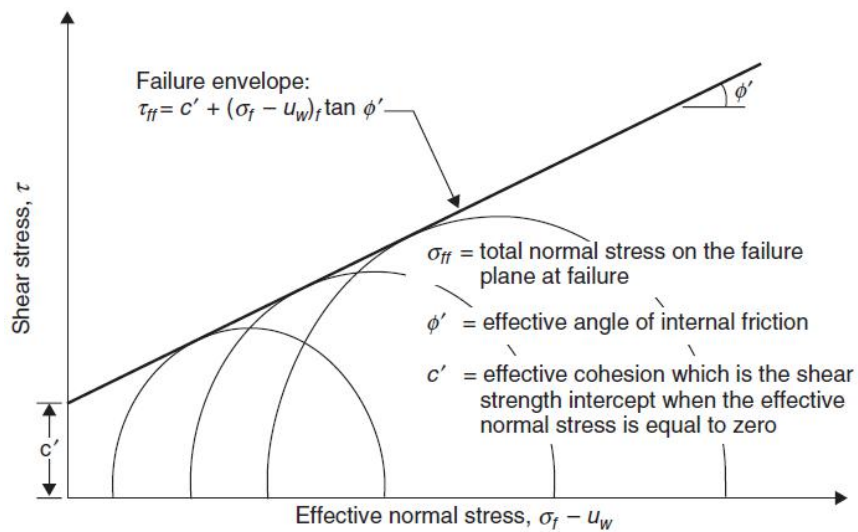


Figura 2.13: Criterio de falla Mohr-Coulomb para suelos saturados.

En el caso de un suelo parcialmente saturado, los círculos de Mohr correspondientes a la condición de falla, pueden ser graficados en un esquema tridimensional, como se presenta en la Fig. 2.14. Se compone por el esfuerzo de corte τ en la ordenada, mientras que en las abscisas se incluyen dos variables de estado tensional, el esfuerzo normal neto $\sigma - u_a$ y la succión matricial $u_a - u_w$. El plano frontal representa las condiciones de un suelo saturado, en donde la succión matricial es nula.

La superficie tangente a los círculos de Mohr en la falla, es denominada como la envolvente de falla Mohr-Coulomb extendida para suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 1978).

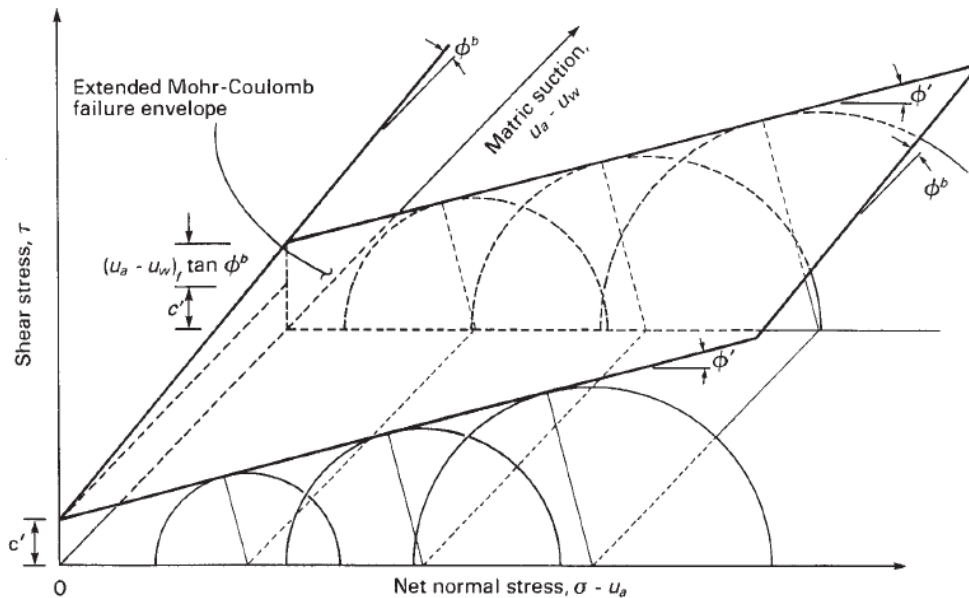


Figura 2.14: Criterio de falla Mohr-Coulomb extendido para suelos parcialmente saturados.

La cohesión c' y los ángulos ϕ' y ϕ^b , son los parámetros de resistencia utilizados para relacionar la resistencia al corte, con las variables de estado tensional. Dichos parámetros, representan muchos factores que tienen influencia en los resultados de los ensayos de resistencia al corte; tales como la densidad, índice de vacío, grado de saturación, composición mineral, historia de tensiones y tasa de deformación.

La resistencia al corte aumenta conforme al crecimiento de la cohesión, que se debe al incremento de la succión matricial. La Ec. 2.26 representa como crece la cohesión aparente, a una tasa definida por el ángulo ϕ^b .

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2.26)$$

La envolvente de falla para un mismo nivel de succión matricial, queda definido por la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna (Ec. 2.27).

$$\tau_{ff} = c + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \quad (2.27)$$

Combinando las Ecs. 2.26 y 2.27, se obtiene la denominada *envolvente de falla Mohr-Coulomb extendida*, representada por la Ec. 2.28 (Fredlund et al., 2012).

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2.28)$$

Donde:

c' = cohesión efectiva, kPa.

$(\sigma_f - u_a)_f$ = esfuerzo normal neto en el plano de falla, en la falla, kPa.

u_{a_f} = presión de aire en el plano de falla, en la falla, kPa.

ϕ' = ángulo de fricción interna, °.

$(u_a - u_w)_f$ = succión matricial en el plano de falla, en la falla, kPa. $(\sigma_f - u_a)_f \phi^b$ = ángulo que indica la razón de crecimiento de la resistencia al corte con respecto a la succión matricial, °.

Cada círculo de Mohr es construido usando los esfuerzos principales netos, mayores y menores en la falla ($\sigma_{3f} - u_{af}$ y $\sigma_{1f} - u_{af}$). El punto superior de un círculo, se puede representar en coordenadas (p_f, q_f, r_f) como una extensión del diagrama $p - q$, para reproducir las condiciones últimas del material como se muestra en la Fig. 2.15 (Fredlund et al., 2012).

En este diagrama extendido, la superficie de estado último, queda definida por la Ec. 2.29:

$$q_f = d' + p_f \tan \psi' + r_f \tan \psi^b \quad (2.29)$$

Donde:

q_f = esfuerzo de corte en la falla, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$, kPa.

σ_{1f} = esfuerzo principal mayor en la falla, kPa.

σ_{3f} = esfuerzo principal menor en la falla, kPa.

d' = intersección de la superficie de estado último con el eje q , con p_f y r_f igual a cero, kPa.

p_f = esfuerzo normal neto promedio en la falla, $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2 - u_a]_f$, kPa.

ψ' = ángulo de inclinación de la superficie de estado último con respecto a p_f , °.

r_f = succión matricial en la falla, $(u_a - u_w)$, kPa.

ψ^b = ángulo de inclinación de la superficie de estado último con respecto a r_f , °.

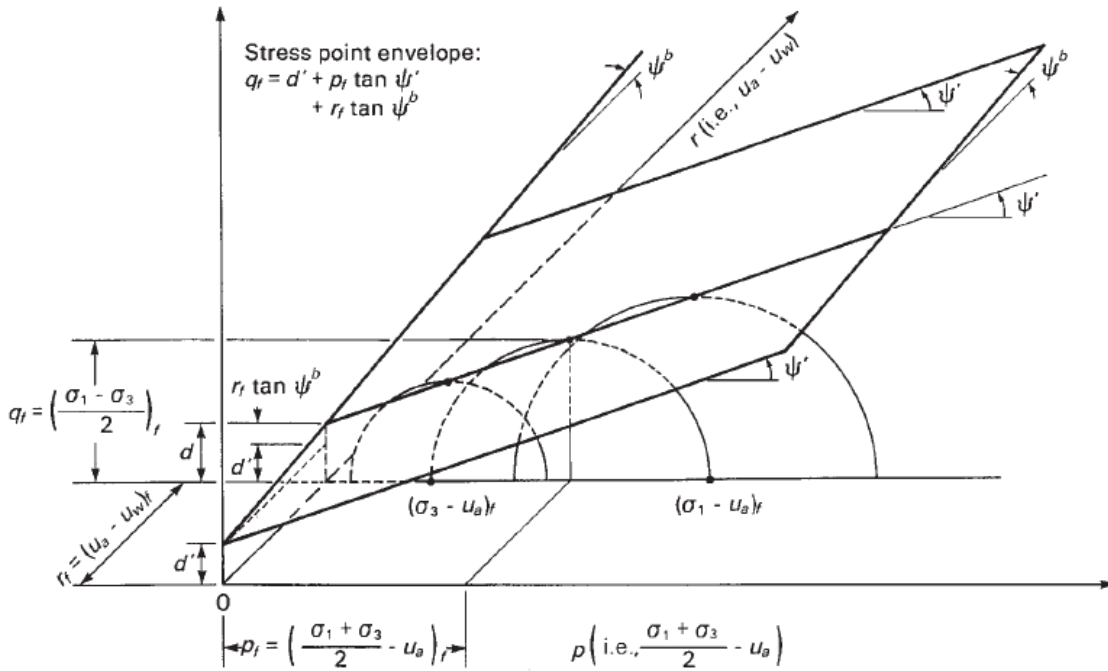


Figura 2.15: Diagrama p-q extendido.

La intersección entre la superficie de estado último y el plano $q - r$, tiene una pendiente equivalente a ψ^b con respecto al eje r . La presente línea de intersección, indica el incremento en la resistencia de un suelo, con el aumento de la succión matricial. Matemáticamente queda representado por la Ec. 2.30:

$$d = d' + r_f \tan \psi^b \quad (2.30)$$

Donde:

d = intersección de la superficie de estado último con el eje q , para un valor de succión matricial r_f conocido.

La superficie de estado último puede ser representada como una línea, en el plano $p - q$, determinada por la Ec. 2.31:

$$q_f = d + p_f \tan \psi' \quad (2.31)$$

Los parámetros que definen la superficie de estado último (Ec. 2.29), se encuentran geoméricamente relacionados con los parámetros que determinan la envolvente de falla extendida (Ec. 2.28).

La relación entre el ángulo de inclinación ψ' de la superficie de estado último con respecto al eje p y el ángulo de fricción interna ϕ' , queda definida por la Ec.2.32:

$$\tan \psi' = \sin \phi' \quad (2.32)$$

Mientras que la correspondencia entre los parámetros de intersección (c y d), en el eje que representa el esfuerzo de corte (q y τ), queda determinada por la Ec. 2.33:

$$d = c \cdot \phi' \quad (2.33)$$

Finalmente, el parámetro ψ^b , queda especificado por la Ec. 2.34:

$$\tan \psi^b = \tan \phi^b \cos \phi' \quad (2.34)$$

Sin embargo, los resultados de investigaciones en variados tipos de suelos, ensayados en amplios rangos de succión, sugieren que la relación entre la resistencia al corte y la succión matricial no debería estar limitada por una expresión lineal; tal como indica la teoría lineal de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, presentada como una extensión del criterio de falla de Mohr-Coulomb.

En la Sección 2.2.11 se presenta detalladamente dicho fenómeno.

2.2.9. Medición de la Resistencia al Corte

La presencia de aire y agua en los poros de un suelo, causa que los procedimientos de ensayos y técnicas utilizada, sean considerablemente más complejas que las usadas en materiales saturados. Los equipos triaxiales y corte directo convencionales, requieren una serie de modificaciones para analizar correctamente los distintos parámetros que influyen en la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado.

Una de las primeras modificaciones consideradas, hace referencia a la medición y/o control independiente, de la presión de poros (agua) y la presión de aire.

Existe un dispositivo fundamental en la realización de ensayos parcialmente saturados, que permite la separación entre la presión de aire y la presión de poros denominado “*high-air-entry porous disk*”, o bien disco poroso. Este elemento, actúa como una membrana semipermeable que separa la fase de aire de la fase de agua. La separación se logra únicamente cuando el valor de entrada de aire del disco poroso, es mayor que la succión matricial generada en la muestra de suelo (Fredlund et al., 2012).

La Tabla 2.3 presenta propiedades de distintos tipos de discos porosos, manufacturados por la empresa GDS Instruments. El que se encuentra destacado, corresponde al que se posee en el laboratorio de sólidos de la Universidad de Chile.

Tabla 2.3: Propiedades de discos porosos fabricados por GDS Instruments.

	Valor de Entrada de Aire	Conductividad Hidráulica (cm/seg)
1/2 Bar	48 - 62 kPa	$3.11 \cdot 10^{-5}$
1 Bar (Flujo Alto)	131 - 193 kPa	$8.6 \cdot 10^{-6}$
1 Bar (Standard)	137 - 206 kPa	$3.46 \cdot 10^{-7}$
2 Bar	241 - 310 kPa	$1.73 \cdot 10^{-7}$
3 Bar	317 - 482 kPa	$1.7 \cdot 10^{-7}$
5 Bar	550 kPa	$1.21 \cdot 10^{-7}$
15 Bar	1516 kPa	$2.59 \cdot 10^{-9}$

En una celda triaxial modificada para realizar ensayos en un suelo parcialmente saturado, el disco poroso se sitúa generalmente en el pedestal base, tal como muestra la Fig. 2.16. Para desempeñarse correctamente debe estar saturado. La Tabla 2.4 resume los distintos ensayos que se pueden ejecutar.

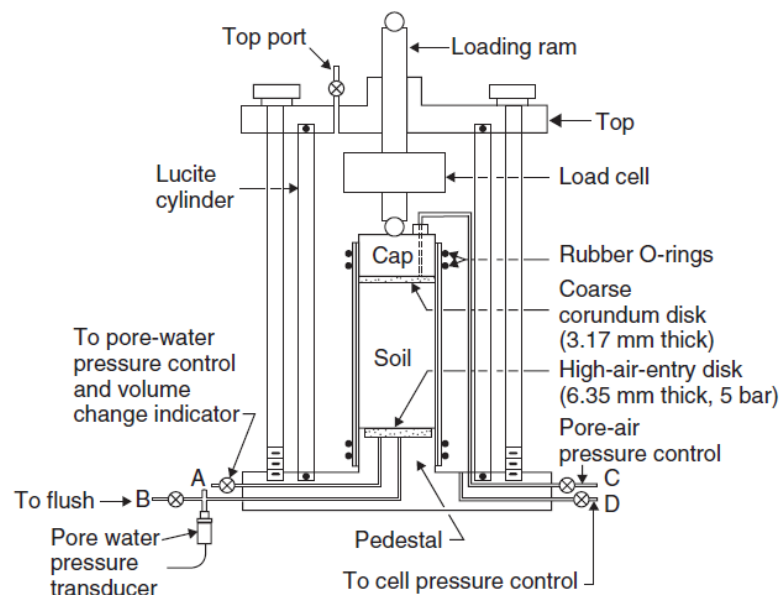


Figura 2.16: Modificaciones en cámara triaxial convencional para ensayos parcialmente saturados, Fredlund et al. (2012).

Tabla 2.4: Ensayos triaxial para suelos parcialmente saturados, Fredlund et al. (2012).

Ensayo	Consolidación	Drenaje		Etapa de Corte		
		Aire	Agua	u_a^*	u_w^*	ΔV^*
Consolidado Drenado	Sí	Sí	Sí	Controlado	Controlado	Medido
Contenido de Agua Constante	Sí	Sí	No	Controlado	Medido	Medido
Consolidado No-Drenado	Sí	No	No	Medido	Medido	-
No Drenado	No	No	No	-	-	-
Compresión No Confinada	No	No	No	-	-	-

* u_a : Presión de aire; u_w : Presión de poros; ΔV : Cambio volumétrico

2.2.10. Ensayo Triaxial Consolidado Drenado (CD)

Un ensayo triaxial consolidado drenado, se refiere a aquel donde la muestra de suelo es primero consolidada y luego sometida a corte, bajo condiciones de drenadas para las presiones que se generan en la fase de agua y la de aire, tal como se ilustra en la Fig. 2.17. El suelo es consolidado mediante un confinamiento isotrópico σ_3 , mientras la presión de aire u_a y presión de poros u_w son controladas a un valor constante. Al término de la consolidación, la muestra presenta un confinamiento efectivo equivalente a $\sigma_3 - u_a$ u una succión matricial de $u_a - u_w$.

Posteriormente, se aplica un esfuerzo desviador en la dirección axial, durante esta etapa, las válvulas que controlan el flujo de aire y agua, se mantienen abiertas. La presión de aire u_a y presión de poros u_w son mantenidas a un valor constante, equivalente a las definidas al fin de la etapa de consolidación. Por lo tanto, el confinamiento efectivo y la succión matricial, permanecen constantes durante el ensayo, hasta alcanzar las condiciones de falla.

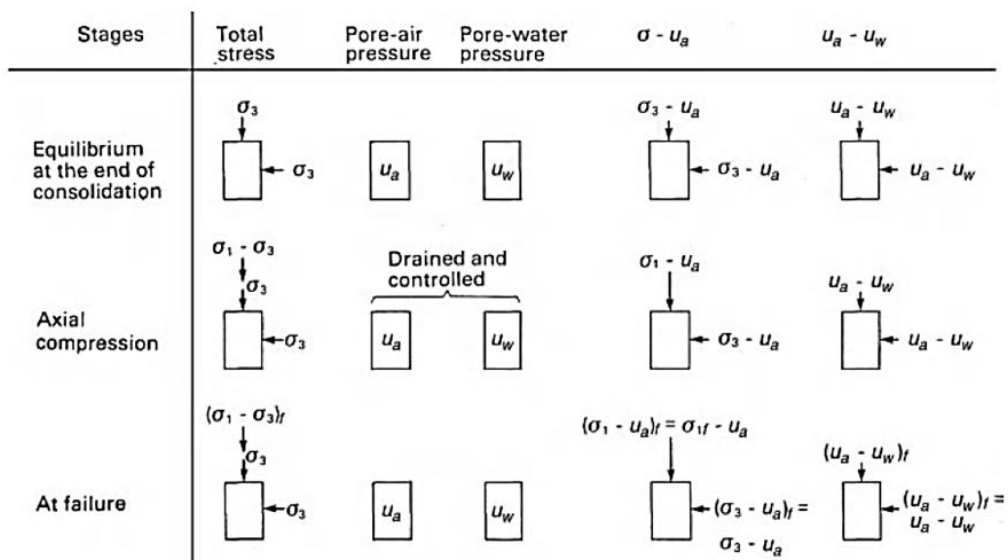


Figura 2.17: Condiciones de esfuerzos durante las diferentes etapas de un ensayo triaxial consolidado drenado.

La Fig. 2.18 presenta las trayectorias de tensiones típicas que se generan durante un ensayo consolidado drenado, sujeto a un mismo valor de succión matricial. El ensayo es desarrollado a distintas presiones de confinamiento efectivo. El punto A representa el estado tensional al término de la consolidación; durante la etapa de corte, el punto A se mueve al punto B a través de la trayectoria de tensiones \overline{AB} . El punto B representa el estado tensional de la muestra en las condiciones de falla.

La recta tangente a los círculos de Mohr que representan el estado tensional en la condición de falla, define la envolvente de falla para el nivel de succión matricial aplicado durante el ensayo. Presenta un ángulo de inclinación con respecto al eje $\sigma - u_a$, equivalente al ángulo de fricción interna obtenido de ensayos con la probeta saturada, ϕ' .

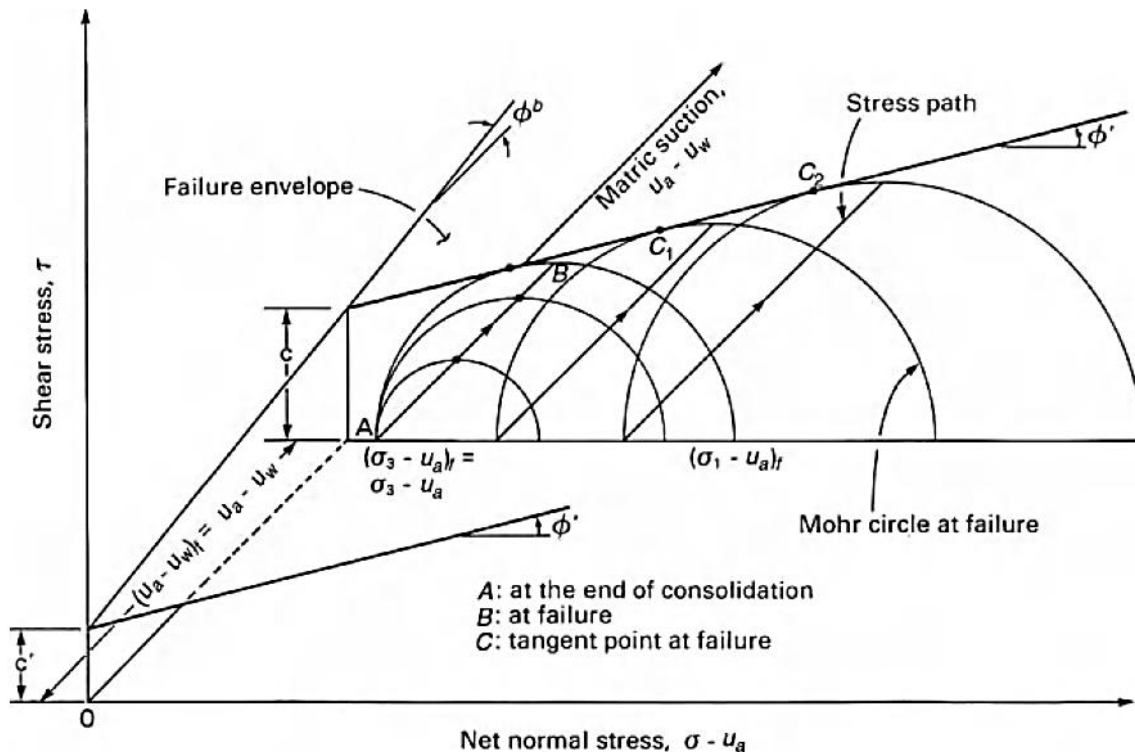


Figura 2.18: Trayectoria de tensiones seguidas durante un ensayo triaxial consolidado drenado a succión matricial constante.

En la Fig. 2.19 se muestran las trayectorias de tensiones desarrolladas durante tres ensayos triaxiales consolidados drenados, implementados a una presión de confinamiento efectivo equivalente y variando la succión matricial.

Los círculos de Mohr que representan el estado tensional en la falla, incrementan en diámetro, a medida que se aumenta la succión matricial y son tangentes a la envolvente de falla determinada para el respectivo nivel de succión matricial. Sin embargo, los puntos definidos como C_1 , C_2 y C_3 , no ocurren a una tensión normal efectiva equivalente, por lo tanto, la línea que une dichos puntos no determina el ángulo ϕ^b . Se debe extender la envolvente de falla hasta intersectar el plano de esfuerzo de corte τ versus succión matricial $u_a - u_w$, para determinar la cohesión aparente. La recta que une dicha cohesión para diferentes valores de succión, establece el valor de ϕ^b .

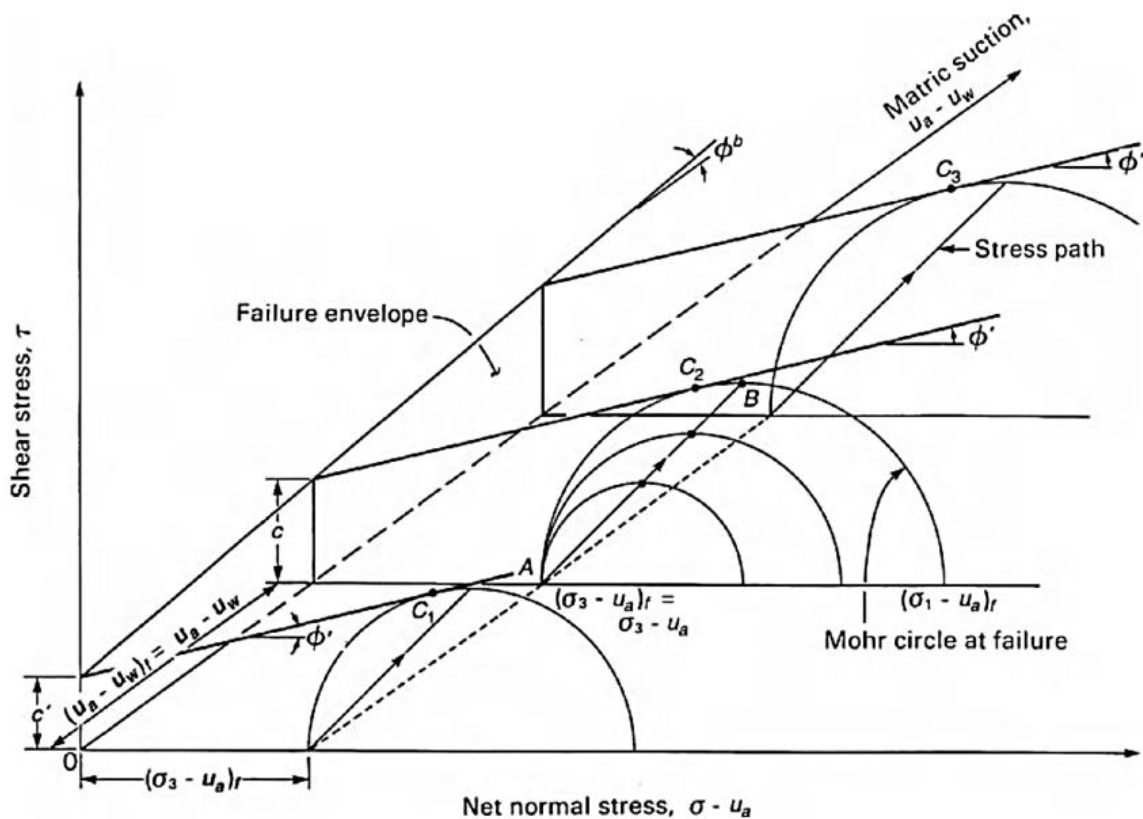


Figura 2.19: Trayectoria de tensiones seguidas durante un ensayo triaxial consolidado drenado a confinamiento constante.

2.2.11. Relación entre Curva de Succión y la Resistencia al Corte

Los resultados de ensayos de corte directo en till glaciar compactado parcialmente saturado, obtenidos por Gan (1986); indican que la envolvente de resistencia al corte no es lineal. La Fig. 2.20 muestra la no linealidad de la envolvente de falla con respecto a la succión matricial. Para bajos valores de succión matricial, el ángulo ϕ^b exhibe un valor equivalente al ángulo de fricción interna ϕ' y disminuye para valores de succión matricial elevados. En consecuencia, se establece que el ángulo ϕ^b es una función de la succión matricial que presenta un suelo parcialmente saturado.

Como resultado de varias investigaciones, se pueden realizar las siguientes observaciones generales, con respecto a la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado (Fredlund et al., 2012):

1. Valores altos de succión matricial, resultan en valores elevados de resistencia al corte, manteniendo una presión de confinamiento equivalente, $\sigma - u_a$.
2. Valores altos de succión matricial, resultan en valores elevados de resistencia al corte, manteniendo una succión matricial constante.
3. La relación entre la resistencia al corte y la succión matricial es no lineal cuando la succión aplicada es incrementada más allá del valor de entrada de aire de un suelo. La resistencia al corte incrementa rápidamente en rangos de valores de succión matricial bajos. Luego, aumenta gradualmente o incluso puede disminuir a altos valores de succión matricial, cuando la saturación del material es cercana a condiciones residuales.

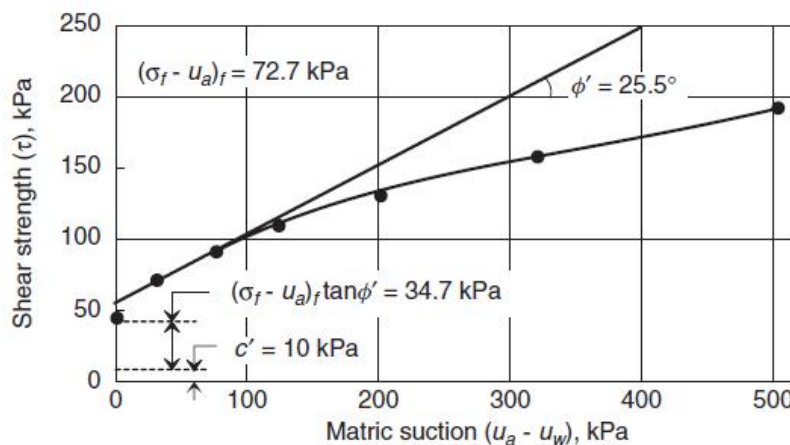
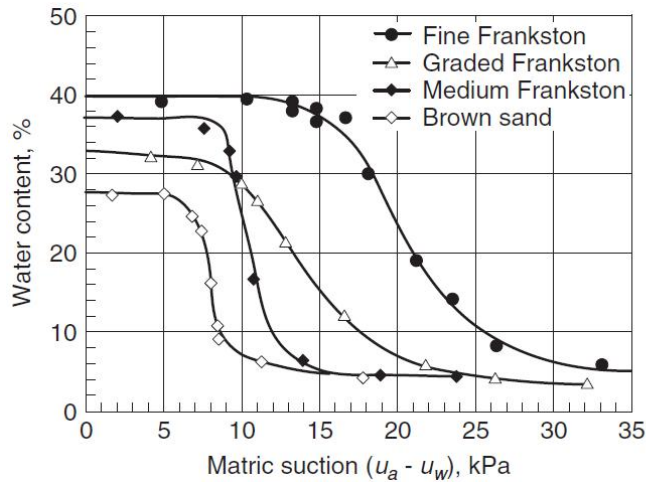
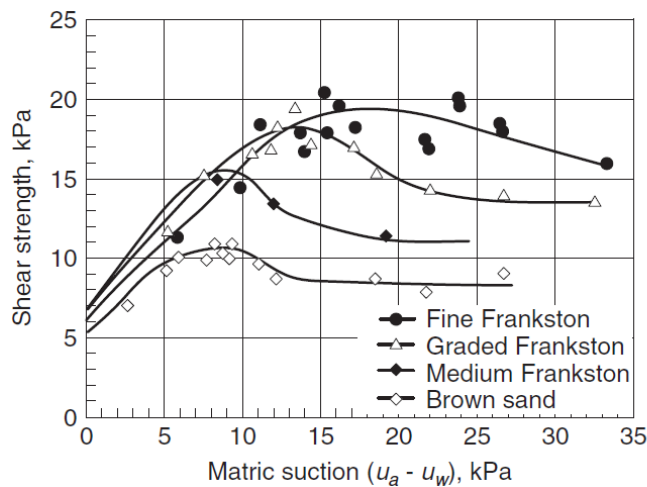


Figura 2.20: Comportamiento no lineal de la envolvente de falla de un suelo parcialmente saturado en el plano τ versus $u_a - u_w$, Gan (1986)

Donald (1956) desarrolló una serie de ensayos de corte directo en distintas granulometrías de arena Frankston. Corresponde a una de las primeras investigaciones en la cual se midió la curva característica suelo-agua para los distintos materiales utilizados en la medición de resistencia al corte. La Fig. 2.21(b) muestra el cambio en la resistencia al corte obtenida en la arena Frankston, cuando la succión matricial fue aumentada a un valor mayor que el valor de entrada de aire, a través de la zona de transición y más allá de las condiciones residuales.



(a) Curva característica para distintas granulometrías.



(b) Resistencia última en un rango de succión matricial.

Figura 2.21: Resultados de una serie de ensayos de corte directo en arenas, adaptado de Donald (1956)

Cada gráfico de resistencia al corte muestra que su magnitud aumenta progresivamente, conforme aumenta la succión matricial. Sin embargo, en cada caso existe un punto en el cual el aumento de la resistencia al corte se torna paulatino, o incluso esta comienza a disminuir a medida que la succión matricial se eleva aún más.

La Fig. 2.22 resume el comportamiento que presenta la resistencia al corte con respecto a la succión matricial para una variedad de suelos. La resistencia al corte para todos los tipos de suelos presenta una respuesta como material saturado, mientras la succión matricial no supere el valor de entrada de aire; una vez que se excede dicho valor, la envolvente de resistencia al corte presenta una curvatura. Para la mayoría de los suelos correspondientes a arcillas plásticas (*plastic clays*) y limos (*silts*), la envolvente disminuye su pendiente hasta tornarse casi horizontal en rangos de succión matricial cercanos a las condiciones residuales. En consecuencia, la resistencia al corte aumenta a pesar de sobrepasar la succión matricial residual del material.

Para suelos arenosos generalmente se aprecia que al exceder las condiciones residuales del material, la resistencia al corte tiende a disminuir (Fredlund et al., 2012).

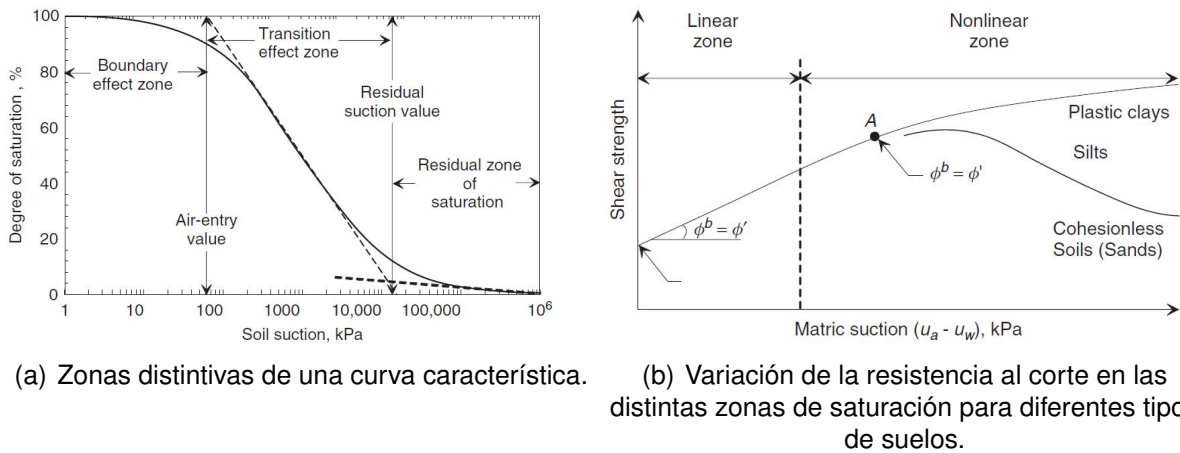


Figura 2.22: Relación entre la curva característica con la envolvente de resistencia al corte para distintos tipos de suelo, Fredlund et al. (2012).

Muchos proyectos de ingeniería no justifican la medición de la resistencia al corte de suelos parcialmente saturados. Sin embargo, una estimación de dicho valor puede proveer información que permita analizar problemas prácticos que involucran materiales en condición de saturación parcial.

La contribución de la succión matricial en la resistencia al corte, generalmente se traduce en aumentos significativos en capacidad de soporte y en el aumento de los factores de seguridad en taludes. Al mismo tiempo, el empuje activo de un suelo parcialmente saturado disminuye conforme aumenta la succión matricial, mientras que el empuje pasivo incrementa proporcional a la succión (Fredlund et al., 2012).

Existen numerosas ecuaciones que han sido propuestas, tanto para ajustar resultados experimentales de resistencia al corte en función de la succión matricial, como para estimar dicha relación. Aquellas funciones que permiten estimar el valor de la resistencia al corte, consideran como parámetros fundamentales, aquellos que determinan la resistencia en condición saturada del suelo, es decir, los coeficientes ϕ' y c' ; pero también consideran factores como la densidad seca, contenido de agua y estructura del material.

La Fig. 2.23 clasifica las distintas ecuaciones que han sido propuestas. Se observa una diferenciación entre aquellas que permiten estimar la variación de la resistencia al corte con respecto a la succión matricial. Ambos grupos señalados utilizan información de la curva característica suelo-agua.

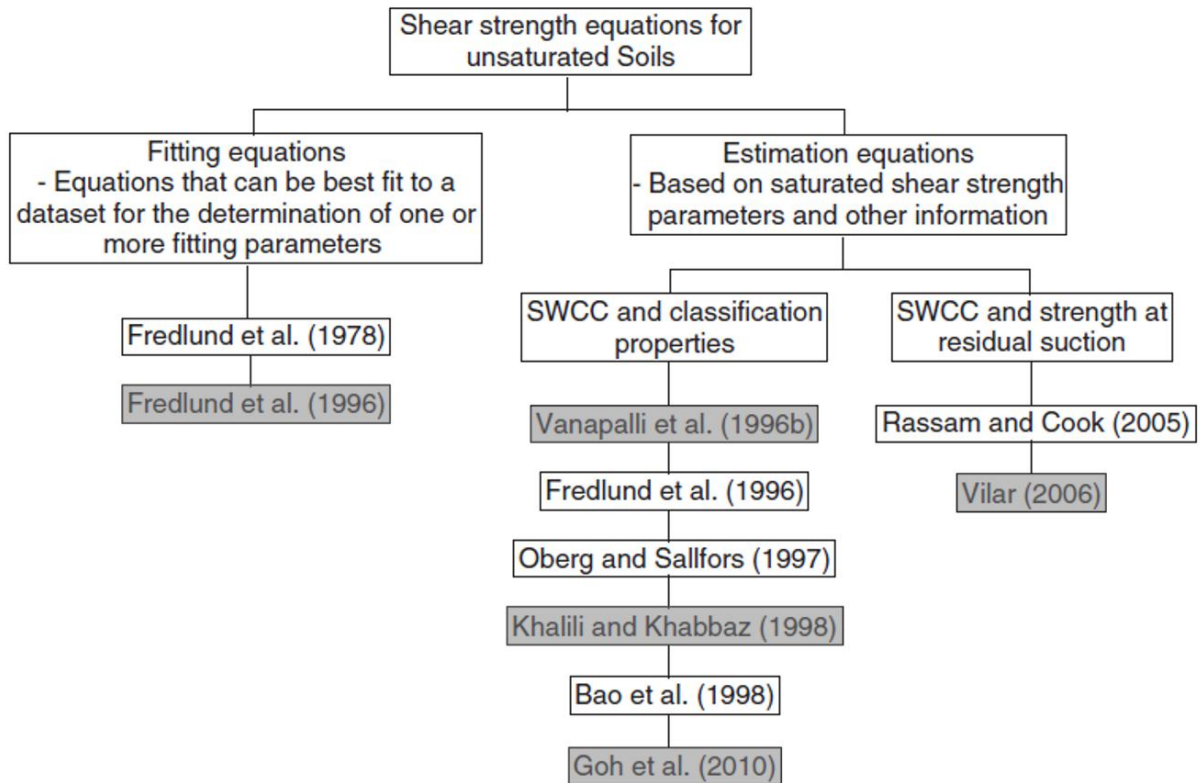


Figura 2.23: Clasificación de ecuaciones propuestas en el análisis de la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado, Fredlund et al. (2012).

A continuación se presentan las ecuaciones que se destacan en la Fig. 2.23.

Ecuación para ajustar la resistencia al corte propuesta por Fredlund et al. (1996)

La ecuación propuesta por Fredlund et al. (1996) incorpora la curva de succión escrita en términos de contenido de agua adimensional Θ_d . La curva característica fue elevada a una potencia κ , que corresponde al parámetro de ajuste con los resultados experimentales. La ecuación resultante para obtener la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado es no lineal, debido a la no linealidad de la curva de succión y se escribe como:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [\Theta_d^\kappa] \tan \phi' \quad (2.35)$$

Donde:

Θ_d = contenido de agua adimensional definido por θ/θ_s , donde θ es algún contenido volumétrico de agua y θ_s es el contenido volumétrico de agua de saturación del suelo.

κ = parámetro de ajuste de la curva característica suelo-agua.

Ecuación para estimar la resistencia al corte propuesta por Vanapalli et al. (1996)

Vanapalli et al. (1996) sugieren una ecuación de resistencia al corte que involucra una normalización de la curva de succión, entre las condiciones de saturación y residual del suelo, en términos de contenido volumétrico de agua. La ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \tan \phi' \quad (2.36)$$

Donde:

θ_r = contenido volumétrico de agua en la condición residual de succión matricial, %.

$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ = contenido volumétrico de agua normalizado Θ_n .

El contenido de agua normalizado Θ_n sirve como una reducción para el efecto de la succión matricial. El término $\tan \phi_b$ presentado en la extensión del criterio de falla de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados (Ec. 2.28), queda expresado por:

$$\tan \phi^b = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' = \Theta_n \tan \phi' \quad (2.37)$$

El incremento de resistencia al corte asociado con la succión matricial, puede ser escrito como:

$$\tau_s = (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \quad (2.38)$$

Ecuación para estimar la resistencia al corte propuesta por Khalili y Khabbaz (1998)

Khalili y Khabbaz (1998) asumen que el suelo se comporta como saturado, mientras la succión matricial no supere el valor de entrada de aire, por lo tanto la ecuación para determinar la resistencia al corte se traduce en:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.39)$$

Una vez que se excede el valor de entrada de aire, la componente de succión matricial en la ecuación de resistencia al corte, se reduce por un factor variable λ' tal como se muestra a continuación:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [\lambda'] \tan \phi' \quad (2.40)$$

El parámetro λ' se define como:

$$\lambda' = \left[\frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0,55} \quad (2.41)$$

Donde:

$(u_a - u_w)_b$ corresponde al valor de entrada de aire, kPa.

Ecuación para estimar la resistencia al corte propuesta por Goh et al. (2010)

Goh et al. (2010) proponen una ecuación para estimar la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado bajo condiciones de secado y humedecimiento. Dicha expresión corresponde a una modificación de la ecuación propuesta por Fredlund et al. (1996) y la sugerida por Lee et al. (2005).

El contenido volumétrico de agua es escrito de forma adimensional, normalizando por el contenido volumétrico de saturación ($\Theta_d = \theta/\theta_s$). La curva característica se usa para controlar la pendiente entre la succión matricial y la resistencia al corte. Se asume que el ángulo ϕ^b es equivalente al ángulo de fricción interna ϕ' para valores de succión matricial menores al valor de entrada de aire, de esta manera la succión contribuye al esfuerzo efectivo de un suelo saturado.

El parámetro de ajuste κ utilizado en la ecuación propuesta por Fredlund et al. (1996), fue designa como un valor constante. Sin embargo, Goh et al. (2010) sugieren que dicho parámetro varía de forma no lineal con respecto a la succión matricial. Este efecto se determinó mediante un back-analysis de una serie de resultados publicados con información que relacionan la resistencia al corte y la curva de succión. Los datos de resistencia al corte se clasificaron en dos categorías denominados: *suelos ensayados luego de alcanzar un estado parcialmente saturado de equilibrio por secado* y *suelos ensayados luego de alcanzar un estado parcialmente saturado de equilibrio por humedecimiento*.

La estimación de la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado, se divide en dos partes. Una primera ecuación aplica para valores de succión matricial menor al valor de entrada de aire del suelo $(u_a - u_w)_b$ y se escribe como:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.42)$$

Donde:

$\phi^b = \phi'$ cuando $(u_a - u_w) < (u_a - u_w)_b$, °.

Una vez que la succión matricial excede el valor de entrada de aire del suelo, la ecuación queda definida por:

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)_b] \tan \phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] b \cdot \Theta_d^{\kappa'} \tan \phi' \quad (2.43)$$

El nuevo parámetro κ' propuesto por Goh et al. (2010), tiene un valor nulo cuando la succión matricial es menor que el valor de entrada de aire y aumenta de forma no lineal conforme crece la succión matricial del suelo, según la siguiente ecuación:

$$\kappa' = [\log(u_a - u_w) - \log(u_a - u_w)_b]^y \quad (2.44)$$

Donde:

y y b = parámetros controladores.

Los sufijos d y w son usados para indicar si los parámetros controladores están relacionados con una curva de succión obtenida por secado (d , *drying*), o con una curva de succión obtenida por humedecimiento (w , *wetting*). El parámetro b está relacionado con la variable n , utilizada en la Ec. 2.22 que permite ajustar los resultados experimentales que determinan la curva de succión, propuesta por Fredlund y Xing (1994).

Los parámetros controladores que definen una curva característica suelo-agua, obtenida por secado, se calculan como:

$$y_d = 0,502 \ln(IP + 2,7) - 0,387 \quad (2.45)$$

Donde:

IP = índice de plasticidad.

$$b_d = -0,245 \{\ln[n_d(IP + 4,4)]\}^2 + 2,114 \{\ln[n_d(IP + 4,4)]\} - 3,522 \quad (2.46)$$

Los parámetros controladores que definen una curva característica suelo-agua, obtenida por humedecimiento, se calculan como:

$$y_w = 3,55 \cdot y_d - 3,00 \quad (2.47)$$

$$b_w = 0,542 \cdot b_d \left(\frac{n_d}{n_w} \right) + 0,389 \quad (2.48)$$

Ecuación para estimar la resistencia al corte propuesta por Vilar (2006)

Vilar (2006) propone el uso de una ecuación hiperbólica para describir la relación entre la resistencia al corte con la succión matricial de un suelo parcialmente saturado. Los detalles presentados en la investigación, señalan que corresponde a una ecuación para ajustar la resistencia al corte con respecto a la succión. Sin embargo, con las verificaciones utilizadas en el estudio, es posible utilizar el modelo para estimar la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado.

El modelo propuesto se basa en la forma general de la curva característica suelo-agua. Asume que el suelo tiene un comportamiento como suelo saturado para valores de succión matricial menores al valor de entrada de aire. La cohesión total de un suelo parcialmente saturado, es decir, la cohesión efectiva más la cohesión producto de la succión matricial, se define como:

$$c = c' + \frac{u_a - u_w}{a + b(u_a - u_w)} \quad (2.49)$$

Donde:

a, b = parámetros de ajuste.

La pendiente de la envolvente de resistencia al corte se asume igual a la tangente del ángulo de fricción interna efectivo, ϕ' , cuando la succión matricial tiende a cero:

$$\frac{\partial c}{\partial (u_a - u_w) |_{\psi \rightarrow 0}} = \frac{1}{a} = \tan \phi' \quad (2.50)$$

Se asume además, que no existe un cambio significativo en la resistencia al corte, una vez que el material alcanza valores de succión matricial mayor o igual a la condición residual. En otras palabras, la resistencia al corte permanece constante en un valor último.

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} c = c_{\text{ultimate}} = c' + \frac{1}{b} \quad (2.51)$$

3. Manual de Uso de Equipo GDS Instruments

El equipo triaxial GDS Instruments, presenta una mayor flexibilidad para realizar ensayos triaxiales en condición saturada, en comparación al otro equipo disponible en laboratorio cuya marca es Humboldt; por una parte, se pueden llevar a cabo ensayos convencionales en condiciones drenada y no drenada, pero además es posible realizar ensayos triaxiales con trayectoria de tensiones definidas, que se traduce en imponer valores de presión media p y de esfuerzo desviatórico q .

El equipo GDS Instruments, también permite realizar ensayos triaxiales en condición parcialmente saturada del material, mediante modificaciones en la cámara triaxial utilizada.

A continuación, se detallan las características de los principales componentes del presente equipo triaxial.

Marco de Carga

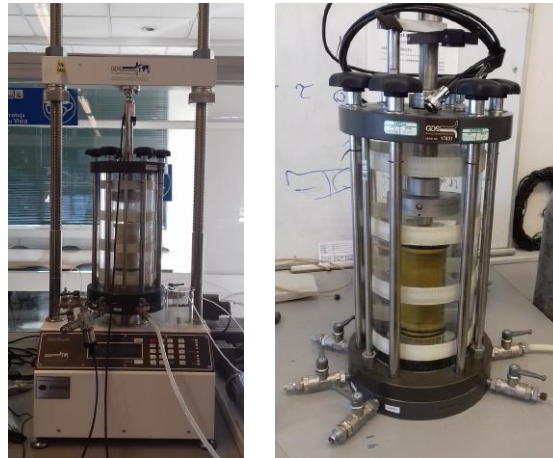
Corresponde a un dispositivo electromecánico, como se observa en la Fig. 3.1(a), compuesto por un marco metálico con una resistencia de reacción vertical máxima de 50 kN.

Posee un lector digital, que muestra el desplazamiento del plato ascendente y la tasa de movimiento, además presenta un terminal USB para una rápida y fácil conexión al computador.

Cámara Triaxial

La cámara exhibida en la Fig. 3.1(b), manufacturada por GDS Instruments, está diseñada para utilizar probetas cuyas dimensiones son 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Admite una presión de cámara máxima de 35 kgf/cm². En su interior posee una celda de carga sumergible, para medir la fuerza deviatórica aplicada a la muestra de suelo en la etapa de corte. Este último dispositivo permite medir como máximo una carga de 10 kN. Además, resiste una presión del ambiente en donde se encuentra sumergida de 70 kgf/cm².



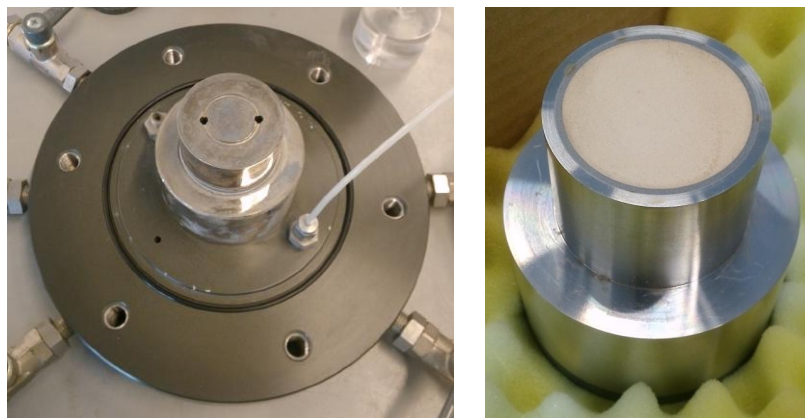
(a) Marco de carga. (b) Cámara triaxial.

Figura 3.1: Marco de carga y cámara triaxial del equipo GDS Instruments.

Pedestal Triaxial

La base de la cámara triaxial, que se presenta en la Fig. 3.2(a), consta de 5 válvulas independientes, para controlar diversos parámetros durante la realización del ensayo. Una válvula permite aplicar y controlar la presión de cámara, una válvula para aplicar y controlar la presión interna por la parte inferior de la muestra, una válvula que controla el flujo dirigido al sensor de presión de poros y dos válvulas para controlar la presión de aire por parte superior de la probeta.

Para implementar ensayos triaxiales parcialmente saturados, el pedestal de la cámara triaxial admite una importante modificación. Consiste en el reemplazo de la base convencional en donde se sitúa la muestra de suelo, que se observa en la Fig. 3.2(a), por la base señalada en al Fig. 3.2(b), que contiene el disco poroso de alto valor de entrada de aire. Como se ha señalado en secciones anteriores, este elemento permite separar la fase de agua de la fase de aire.



(a) Pedestal de la cámara triaxial. (b) Disco poroso (HAEPD).

Figura 3.2: Modificaciones de la cámara triaxial para ensayo parcialmente saturado.

Pistones Controladores de Agua

El equipo triaxial GDS Instruments, está compuesto por dos pistones controladores de presión y volumen de agua, tal como se muestra en la Fig. 3.3. Uno de ellos, controla el comportamiento del agua en la cámara triaxial; mientras que el segundo dispositivo, controla el agua dentro de la muestra de suelo.

Este elemento, corresponde a un controlador de señal digital, basado en un actuador hidráulico para una regulación y medición precisa de la presión del líquido en su interior. Posee un teclado inteligente, que permite una configuración independiente del software utilizado por el equipo triaxial. Para aplicaciones en mecánica de suelos se usa como fluido agua destilada y desaireada.

La presión máxima admisible equivale a 30 kgf/cm^2 y contiene un volumen máximo de agua de 200 ml.



Figura 3.3: Pistones controladores de presión y volumen de agua.

Pistón Controlador de Aire

Para llevar a cabo ensayos triaxiales parcialmente saturados, el equipo GDS Instruments, posee un pistón controlador de presión y volumen de aire, como el exhibido en la Fig. 3.4.

Consiste en un microprocesador, controlado por un actuador hidráulico para regular y medir la presión y cambio volumétrico de un fluido. La presión máxima admisible corresponde a 10 kgf/cm^2 y puede contener un volumen máximo de 1000 ml.



Figura 3.4: Pistón controlador de presión y volumen de aire.

3.1. Ensayo Triaxial Saturado

3.1.1. Verificaciones Previas al Ensayo

Antes de utilizar el equipo triaxial GDS Instruments, es importante verificar ciertos aspectos con el fin de evitar complicaciones en el transcurso del ensayo.

Nivel de Agua en Desaireador

El desaireador GDS Instruments (ver Figura 3.5), debe contener un nivel de agua destilada y desaireada, apta para llenar los pistones que controlan volumen y presión de agua y también para llevar a cabo correctamente el proceso de saturación de la muestra de suelo.



Figura 3.5: Desaireador de agua GDS Instruments

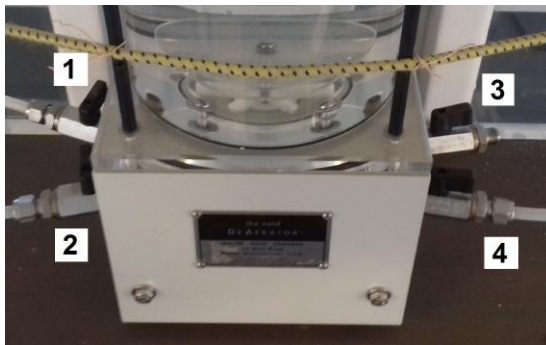
El procedimiento para llenar el desaireador se detalla a continuación:

- Se abre la válvula “*tank input*” en el panel presentado en la Figura 3.6(a).
- Se abren las válvulas 1 y 2 del desaireador, Figura 3.6(b). La línea conectada a la válvula 1, corresponde a la acoplada al motor eléctrico, Figura 3.6(c). Mientras que la vía conectada en la válvula 2, se debe insertar en un recipiente con agua destilada, Figura 3.6(c). Las válvulas 3 y 4 del desaireador deben mantenerse cerradas.
- Se enciende el motor eléctrico para que comience a ingresar agua en el desaireador. Una vez que se vacíe el recipiente con agua destilada, cerrar inmediatamente la válvula “*tank input*” en el panel.
- Luego de alcanzado un nivel apto en el desaireador, se debe extraer el aire que pueda contener el agua destilada. Para ello, se mantiene abierta la válvula 1, se cierra la válvula 2, se mantiene encendido el motor eléctrico y se enciende el rotor del desaireador; el cual hace girar el agua, facilitando la extracción de las moléculas de aire contenidas.
- Una vez extraído el aire del agua contenido en el desaireador, se apaga el motor eléctrico y se cierra la válvula 1.
- Finalmente, se abren las válvulas 3 y 4 en el desaireador. La válvula 3 libera el vacío generado al interior del dispositivo, permitiendo que el agua destilada y desaireada baje por diferencia de altura de presión. La línea conectada a la válvula 4, está unida al panel, que conecta a su vez con los pistones controladores de volumen y presión de agua.



(a) Panel controlador de circulación de agua desaireada

Figura 3.6: Funcionamiento del desaireador de agua GDS Instruments.



(b) Válvulas en base del desaireador



(c) Agua destilada y motor eléctrico

Figura 3.6: Funcionamiento del desaireador de agua GDS Instruments (cont.).

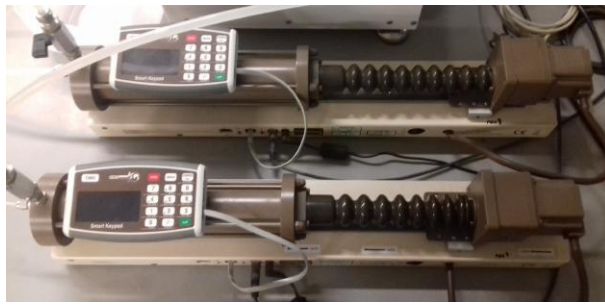
Nivel de Agua en Pistones Controladores

Los pistones presentados en la Fig. 3.7(a) controlan presión y volumen de agua. Para llevar a cabo un ensayo triaxial se requieren dos dispositivos, uno de ellos controla la presión y volumen de agua dentro de la cámara triaxial, por lo tanto, determina el esfuerzo radial del ensayo. Un segundo pistón, controla dichos parámetros en el interior de la probeta, por lo tanto, registra valores de presión de poros generadas en la muestra, y mide el cambio volumétrico durante la etapa de consolidación y aplicación de corte, en caso de realizar un ensayo triaxial drenado. Ambos se encuentran ubicados a un costado del marco triaxial, tal como se aprecia en la Fig. 3.7(e).

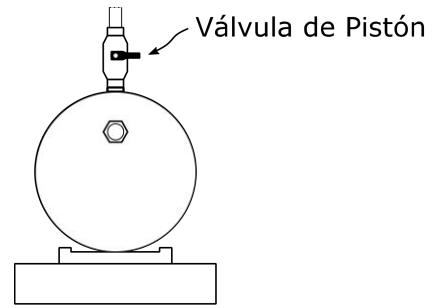
Para un correcto funcionamiento de estos dispositivos, deben contener un volumen de agua suficiente para aplicar las presiones necesarias durante el ensayo. Sin embargo, no deben estar completamente llenos, debido a que estos pistones colectan y miden el agua drenada, durante un ensayo triaxial que cumpla con dicha condición.

Para llenar los pistones de agua, se prosigue como se detalla a continuación:

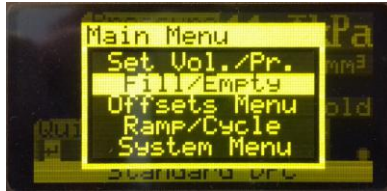
- Se abre la válvula “tank output” en el panel que controla el paso de agua desde el desaireador, Fig. 3.6(a).
- Se abre la válvula “output 3” del panel, en caso de querer llenar el pistón que controla el agua en la cámara. Alternativamente, se abre la válvula “output 4”, si se desea llenar el pistón que controla el agua dentro de la muestra de suelo.
- Se abre la válvula del pistón, esquematizada en la Fig. 3.7(b), que controla el ingreso de agua al contenedor del pistón.
- En el Smart Keypad del controlador, se debe ingresar al menú, que despliega la pantalla mostrada en la Fig. 3.7(c). Se selecciona la opción “Fill/Empty”, que dispone de cuatro opciones presentadas en la Fig. 3.7(d).



(a) Pistones controladores de agua



(b) Vista frontal del pistón



(c) Smart Keypad - Menú



(d) Smart Keypad - Fill/Empty



(e) Disposición en laboratorio de equipos GDS Instruments

Figura 3.7: Llenado de pistones controladores de presión y volumen de agua.

3.1.2. Confección de la Probeta

Existen diversas metodologías para elaborar una probeta de suelo, la cual depende principalmente del tipo de material y la variable que pretende ser analizada.

A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para la confección de una probeta de arena fina de relave, correspondiente a "wet tamping".

- Se añade a una masa conocida de suelo seco, una cantidad determinada de agua con el fin de otorgar un 5% de humedad al material. Este proceso genera una cohesión aparente en las partículas, permitiendo su manipulación.

- Se posiciona el molde de bronce en el pedestal triaxial y se fijan sus dos partes con una abrazadera metálica.
- Se dispone una mica plástica en la superficie interior del molde, con el objetivo de evitar que las partículas queden adheridas al molde metálico.
- Se coloca un geotextil en el fondo del molde, para evitar que se tapen las vías de drenaje del agua interior de la probeta.
- Se determina, según la densidad esperada de la muestra, y dependiendo del número de capas en las que se confeccionará la probeta, el peso de cada una de ellas para luego agregar en el molde.
- Por cada capa de suelo agregada, se compacta con el uso de una regla geotécnica, demarcada con el espesor esperado de cada capa, para lograr la altura definida de la probeta.
- Para la última capa se utiliza el cuello de bronce, en la parte superior del molde, con el objetivo de no perder material particulado. Luego se retira este elemento, se sitúa un acrílico estandarizado en la superficie de la muestra y se compacta hasta la marca.
- Se quita la abrazadera metálica y se retira el molde de bronce. Se acomoda la membrana impregnada en talco, para disminuir el roce, en el porta-membrana. Luego, se dispone la membrana en la superficie de la probeta de suelo.
- Utilizando el portamembrana, se ubican los o-rings en la parte inferior de la probeta..
- Se ubica el cap superior en la probeta y se fija la membrana con dos o-rings, agregados mediante el porta-orings. Se aplica una leve succión por dentro de la muestra, para disminuir la alteración en la confección al disponer los o-rings.
- Finalmente, se acomoda la cámara triaxial en el pedestal. En el caso del equipo GDS Instruments, se recomienda orientar la cámara según la marca realizada en el pedestal.

3.1.3. Aplicación de Dióxido de Carbono CO_2

Posterior al llenado con agua de la cámara triaxial, es necesario circular dióxido de carbono CO_2 por el interior de la muestra. El objetivo de este proceso, es movilizar las moléculas de aire contenidas en la muestra y que en su lugar se sitúen moléculas de CO_2 . Este último gas es más liviano que el aire, por lo que facilita la saturación de la probeta.

Para llevar a cabo este procedimiento, esquematizado en la Fig. 3.8, se debe realizar lo siguiente:

- Se agrega agua en un vaso de precipitado.

- Se conecta el cilindro que contiene CO_2 , con la válvula que da paso a la parte inferior interna de la probeta.
- Se conecta un extremo de una vía plástica, en la válvula que da paso a la parte superior interna de la probeta. El extremo opuesto se dispone en un vaso de precipitado, con el fin de observar la intensidad con la que se está aplicando el dióxido de carbono, mediante las burbujas que se generan en el agua.
- Este proceso se mantiene durante 30 min.

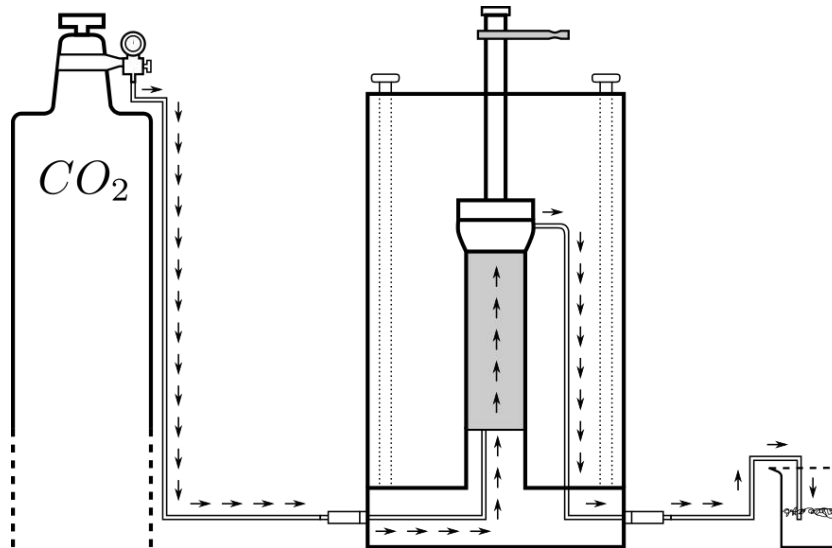


Figura 3.8: Circulación de dióxido de carbono por el interior de la probeta.

3.1.4. Montaje de Cámara Triaxial

Una vez terminado el proceso anterior, se debe proceder a montar cuidadosamente la cámara triaxial en el marco de carga. Debido al peso de la cámara, puede ser necesario utilizar un carro para transportarla a la zona de trabajo.

Se recomienda conectar en primer lugar, los enlaces que van en el “*Serial Pad*” del equipo GDS Instruments (ver Fig. 3.9), este dispositivo posee unas etiquetas con el nombre del elemento que se debe conectar en dicha ubicación:

- **Celda de carga sumergible:** cuya conexión corresponde al cable que surge de la parte superior de la cámara triaxial.
- **Sensor de desplazamiento (LVDT):** una vez conectado en el *Serial Pad*, se debe posicionar el LVDT en la parte superior de la cámara y ajustarlo para evitar que se mueva durante el ensayo, este mecanismo entrega un primer valor de desplazamiento axial.

- **Sensor de presión de poros:** este sensor arroja un primer valor de presión de poros, debe conectarse en el dispositivo *Serial Pad* y en el pedestal de la cámara triaxial.



Figura 3.9: Adquisición de datos - *Serial Pad*.

Luego, se deben conectar los mecanismos que van situados en el pedestal de la cámara triaxial. La Fig. 3.10 resume dichas conexiones y su respectiva posición.

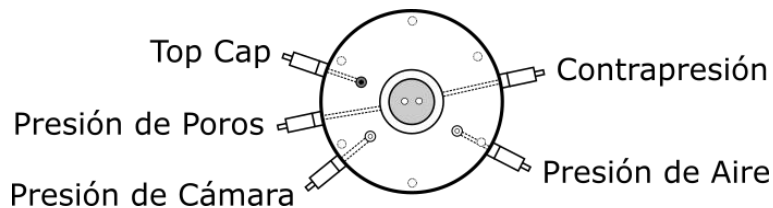


Figura 3.10: Conexiones en el pedestal de la cámara triaxial.

- **Sensor de presión de poros:** este sensor (ver Fig. 3.11) debe conectarse en la válvula denominada como “Presión de Poros”.



Figura 3.11: Sensor de presión de poros.

- **Pistón controlador de presión de cámara:** este mecanismo controla presión y volumen de agua en el interior de la cámara triaxial (Fig. 3.12). Previo a conectar la vía que une el pistón con el pedestal, se deben eliminar las burbujas en la línea haciendo circular una leve cantidad de agua. Luego, se acopla en la válvula denominada como “Presión de Cámara”.

- **Pistón controlador de presión interna o back pressure:** este elemento controla presión y volumen de agua en el interior de la muestra de suelo (Fig. 3.12). Al igual que el dispositivo anterior, se debe saturar la línea antes de conectarlo en el pedestal de la cámara triaxial, circulando una leve cantidad de agua. Luego, se une en la válvula denominada como “Contrapresión”.



Figura 3.12: Pistones controladores de presión y volumen de agua.

La Fig. 3.13 muestra la cámara triaxial montada en el marco de carga, con las conexiones ya establecidas.

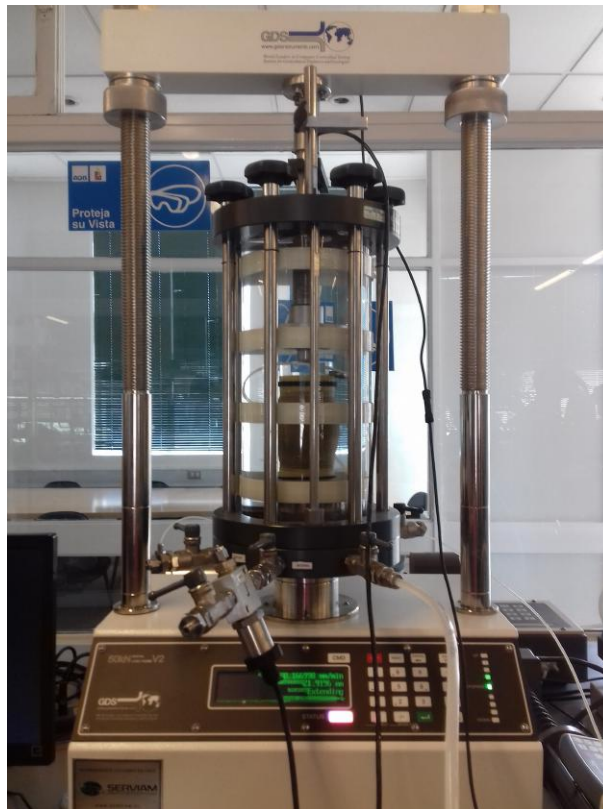


Figura 3.13: Montaje de la cámara triaxial en el marco de carga.

3.1.5. Saturación

Un ensayo triaxial convencional correctamente ejecutado, se lleva a cabo en una muestra que cumpla con el requisito de saturación total. Para llenar con agua los vacíos de la muestra de suelo, se utiliza el pistón que controla el agua dentro de la probeta.

Se lleva a cabo el procedimiento presentado en la Fig. 3.14 y que se detalla a continuación:

- Aplicar manualmente una presión de cámara de 20 [kPa] con el pistón correspondiente.
- Saturar el sensor de presión de poros, circulando agua por dentro de este mecanismo, con el pistón controlador de presión y volumen de agua dentro de la muestra, abriendo la válvula de entrada.
- Se conecta una línea en la válvula denominada como “Presión de Aire” en el pedestal de la cámara triaxial, Fig. 3.10. La salida opuesta se coloca en un vaso de precipitado, con unas gotas de agua.
- Se abre lentamente la válvula de entrada del pistón, y se regula la intensidad de la saturación, controlando la magnitud de las burbujas que se generan en el agua contenida en el vaso de precipitado.
- Se mantiene el proceso hasta alcanzar un volumen de 200 ml de agua en el vaso de precipitado.

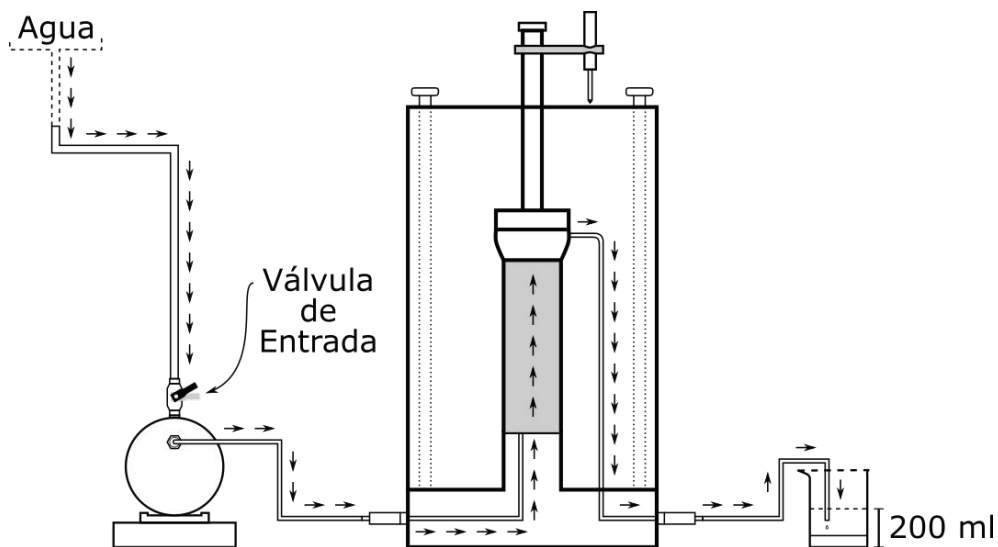


Figura 3.14: Proceso de saturación de la muestra de suelo.

3.1.6. Procedimiento en GDSLab.exe

Para utilizar la plataforma computacional presentada por GDS Instruments y llevar a cabo los distintos ensayos geotécnicos, es de carácter obligatorio mantener conectada la llave que da acceso a todas las funciones del software.

Antes de arrancar el programa, los equipos a usar deben estar encendidos y preparados para su correcto desempeño.

Una vez iniciado el software, se recomienda verificar que los distintos dispositivos empleados durante el ensayo, arrojen lecturas apropiadas. Para ello, en la esquina inferior izquierda de la pantalla principal, aparece un botón denominado como «*Management*», el que presenta la opción «*Object Display*», que despliega la ventana que se muestra en la Fig. 3.15.

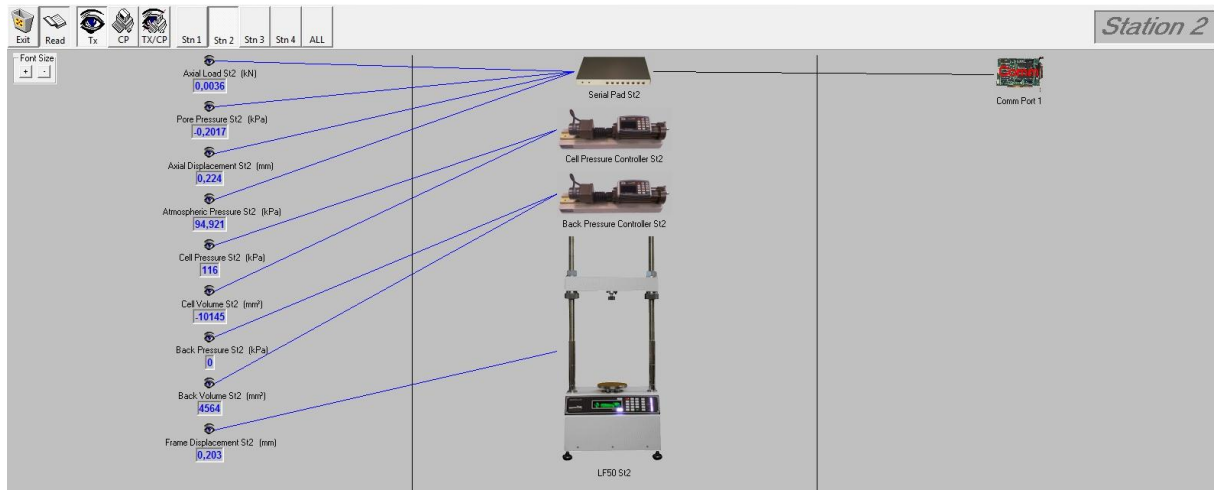


Figura 3.15: Lectura de datos de los distintos dispositivos GDS Instruments.

La barra de opciones mostrada en la Fig. 3.16, permite configurar los elementos desplegados en la ventana de la Fig. 3.15. En primer lugar, se debe seleccionar la estación de trabajo que se encuentra operativa y con los dispositivos encendidos, de lo contrario el software anuncia un error. En el caso de realizar un ensayo triaxial convencional, se debe seleccionar la Estación 2 «*Stn 2*».



Figura 3.16: Barra de opciones para la visibilidad de lecturas.

Luego, se debe seleccionar uno de los siguientes tres botones:

- **Tx**: Permite observar los valores leídos por los transductores de la estación de trabajo seleccionada, estos elementos son los que miden distintos parámetros del ensayo, *Ejs: Sensor de presión de poros, sensor de desplazamiento, entre otros.*
- **CP**: Muestra los dispositivos que controlan los distintos parámetros del ensayo, como ejemplifica la Fig. 3.17(a). Seleccionando cualquiera de los instrumentos, se despliega la ventana presentada en la Fig. 3.17(b). El botón «*Set Target*» permite alcanzar el valor ingresado en «*Target*». En cuanto al botón «*Hold*», detiene la acción anterior, sin que el dispositivo deje de medir.

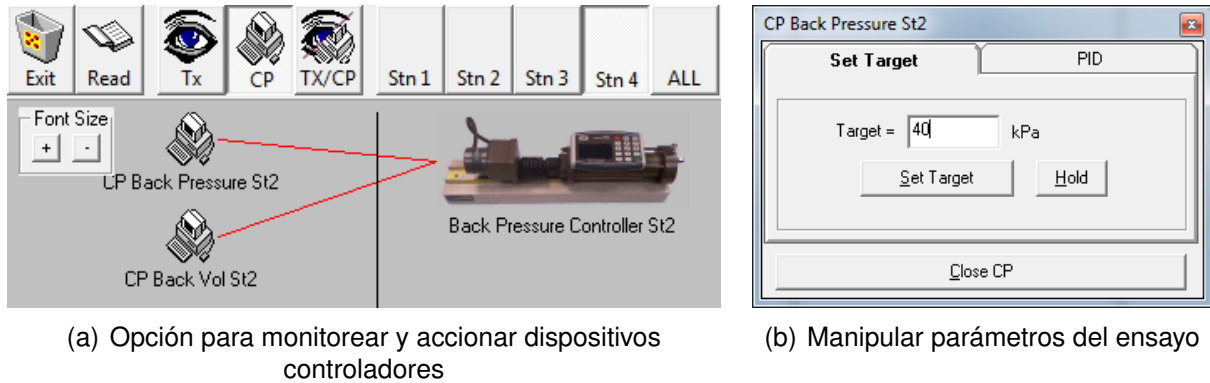


Figura 3.17: Opciones en la ventana «*Object Display*» para dispositivos controladores.

- **TX/CP**: Despliega en la ventana «*Object Display*», los transductores y los dispositivos controladores.

El procedimiento para implementar un ensayo triaxial convencional, ya sea drenado o no drenado, en el programa GDSLab, se detalla a continuación:

Paso 1: Configuración del Archivo de Datos

Se debe configurar el archivo de salida que contiene toda la información obtenida del ensayo triaxial. Para ello, es necesario seleccionar el botón «*Choose Data File*» mostrado en la Fig. 3.18, en la estación de trabajo correspondiente.

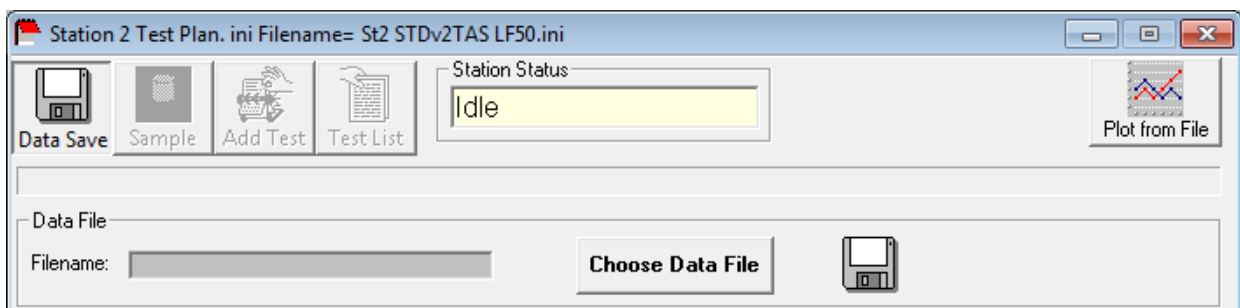


Figura 3.18: Estación de trabajo #2.

Se despliega la ventana presentada en la Fig. 3.19, que permite optar por el formato en que se desean guardar los resultados. Se recomienda seleccionar la opción “*Single Directory*”, para obtener un archivo de texto, de fácil manipulación en Excel.

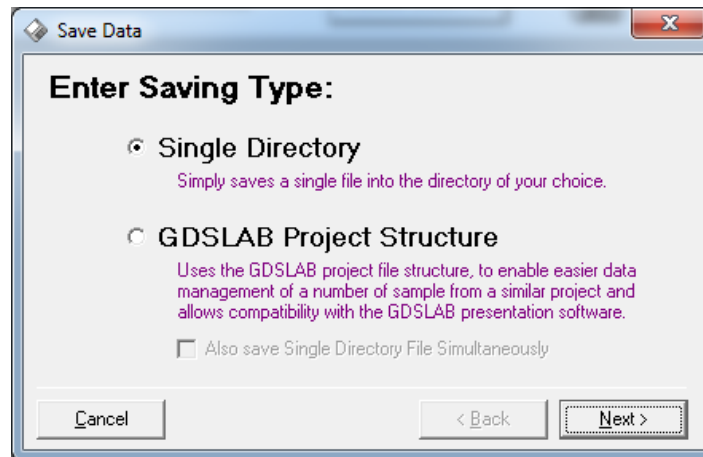


Figura 3.19: Formato del archivo de datos.

El siguiente paso corresponde a determinar la secuencia de adquisición de datos, en la ventana presentada en la Fig. 3.20. En el apartado “*Data Saving Type*”, se define la escala de tiempo; mientras que en la sección “*Data Saving Interval*”, se fija el intervalo de tiempo.

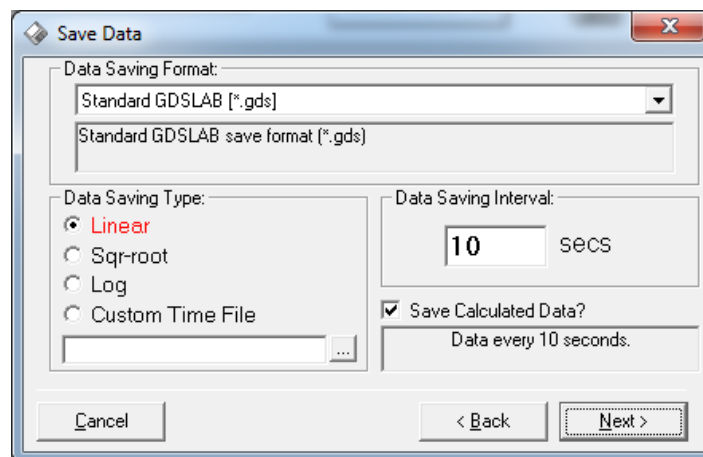


Figura 3.20: Intervalo de adquisición de datos.

Para finalizar la configuración del registro de datos resultante, se debe nombrar el archivo y seleccionar la carpeta en la que se desea guardar, tal como se ejemplifica en la Fig. 3.21.

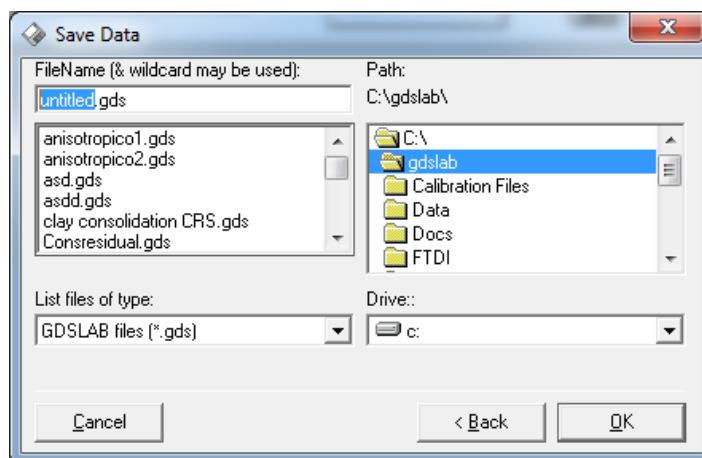


Figura 3.21: Nombre y ubicación del archivo de datos.

Paso 2: Propiedades de la Muestra de Ensayo

Una vez habilitado el botón «*Sample*» en la estación de trabajo, se debe elegir el tipo de probeta utilizada para el ensayo, dentro de las opciones presentadas en la ventana de la Fig. 3.22. Sin embargo, esta propiedad no interviene en los resultados obtenidos. Para continuar se debe presionar el botón «*Setup Sample Details*».

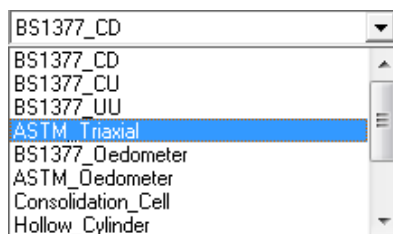
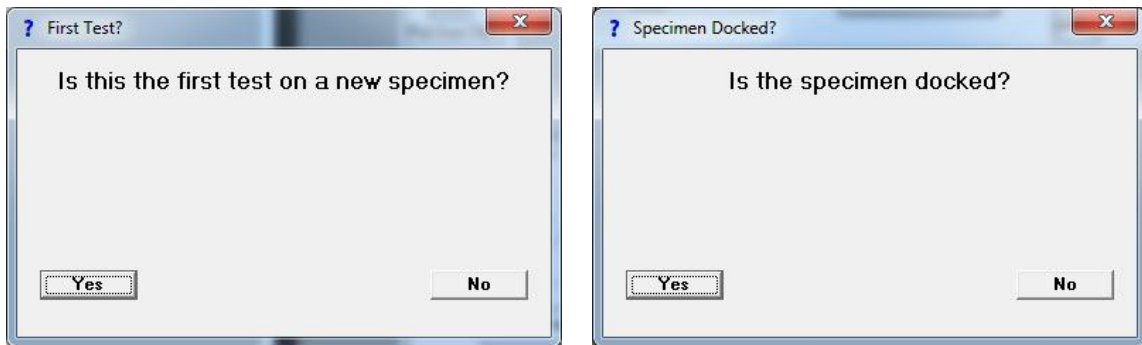


Figura 3.22: Tipo de muestra a ensayar.

Luego, se despliegan consecutivamente las ventanas mostradas en la Fig. 3.23. En la primera, ver Fig. 3.23(a), se debe indicar si la muestra de suelo corresponde una nueva probeta, o una ya utilizada en un ensayo previo. La segunda ventana emergente, ver Fig. 3.23(b), permite establecer si el pistón de carga se encuentra ajustado en el cap superior. Por lo general, este procedimiento se realiza una vez consolidada la muestra, como consecuencia la respuesta a dicha pregunta debiese ser negativa.



(a) Indicar si la probeta de suelo es nueva.

(b) Indicar ajuste el pistón de carga

Figura 3.23: Ventanas emergentes luego de seleccionar «*Setup Sample Details*».

Posteriormente, se da la opción de ingresar información y propiedades características de la muestra de suelo utilizada. En la columna “*Fields*” se pueden ingresar antecedentes del material, para que queden registrados en el archivo resultante; sin embargo, no es de carácter obligatorio completar dichos campos.

Los parámetros que se deben ingresar necesariamente, corresponden a la altura inicial (*Initial Height*) y el diámetro inicial (*Initial Diameter*). Se recomienda mantener el resto de las casillas con el valor proveniente por defecto.

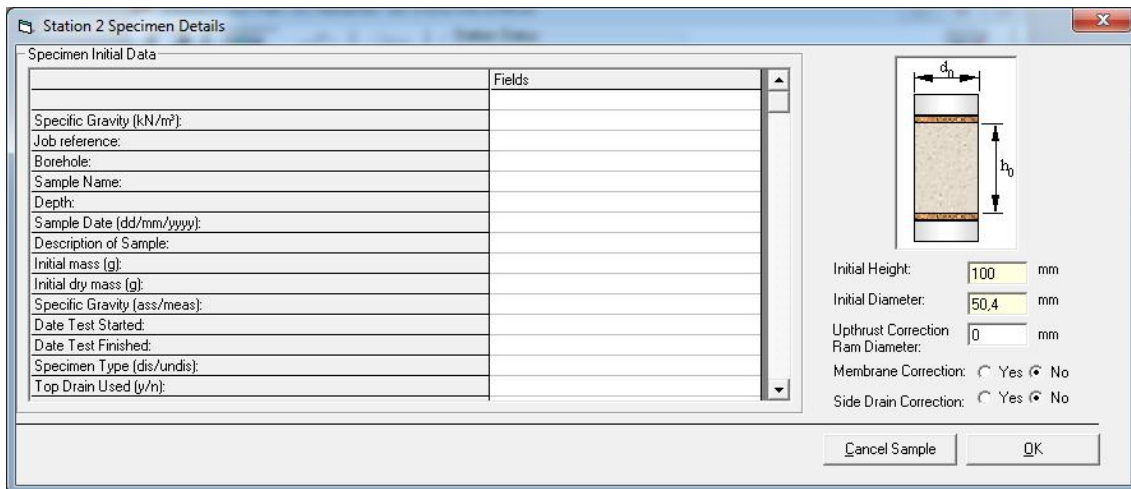


Figura 3.24: Antecedentes y propiedades del material.

Paso 3: Definición de las Fases Previas a la Etapa de Corte

Un ensayo triaxial convencional posee ciertas fases previas, antes de someter la probeta a un esfuerzo de corte; dichas etapas deben definirse dentro del programa GDSLab. Para ello, se debe seleccionar el botón «*Add Test*» en la estación de trabajo respectiva. Luego, se escoge el paquete de ensayos denominado como “*GDS_ttSatcon*”, como se observa en la Fig. 3.25.

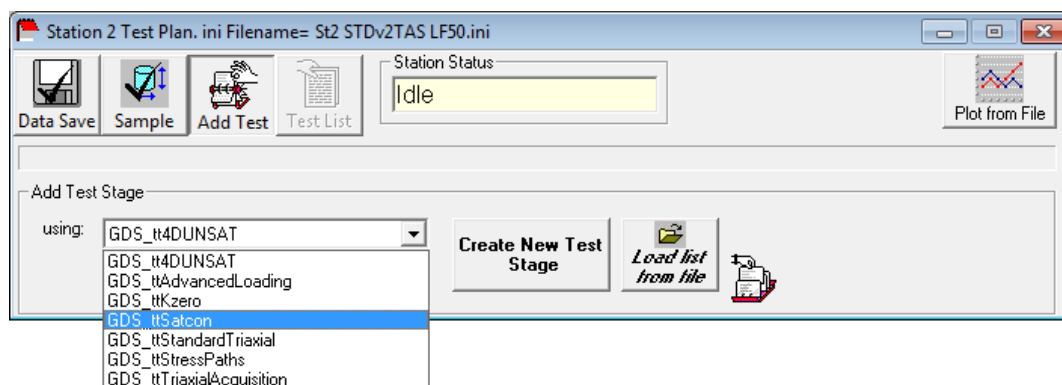
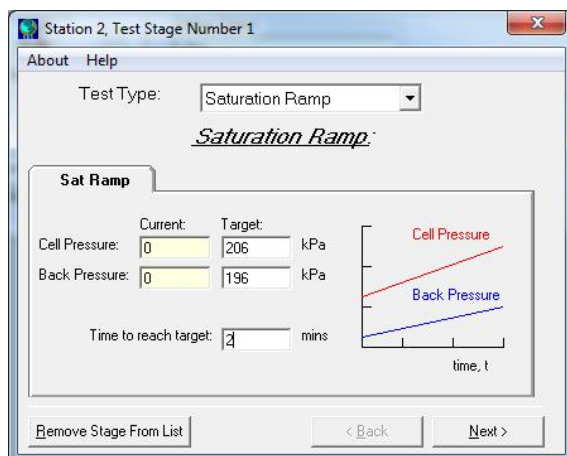


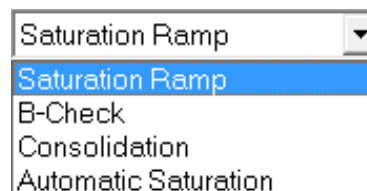
Figura 3.25: Agregar etapa de ensayo.

Una vez seleccionado el paquete de ensayos se presiona el botón «*Create New Test Stage*». Se despliega una nueva ventana y se selecciona la primera etapa previa, correspondiente a “*Saturation Ramp*”, tal como se observa en la Fig. 3.26(a).

Se completa el cuadro “*Back Pressure*” con el valor que se desea utilizar. Generalmente se utilizan 2 kgf/cm^2 de contrapresión, que equivalen a 196 kPa. Además, se define una presión de cámara en el cuadro “*Cell Pressure*”, que debe ser levemente mayor al back pressure para que no se destruya la muestra de suelo. Se recomienda una diferencia de $0,1 \text{ kgf/cm}^2$, correspondiente a 10 kPa. Finalmente, se define el tiempo deseado para alcanzar las presiones especificadas.



(a) Etapa *Saturation Ramp*



(b) Distintos ensayos del paquete *GDS_ttSatcon*

Figura 3.26: Configuración de la etapa «*Saturation Ramp*».

La configuración de dicha etapa termina con las condiciones dan paso a la siguiente fase, esta acción se lleva a cabo en la ventana mostrada en la Fig. 3.27 y manteniendo activas las casillas “*End of Saturation Ramp*” y “*Hold Pressures at end of test*”.

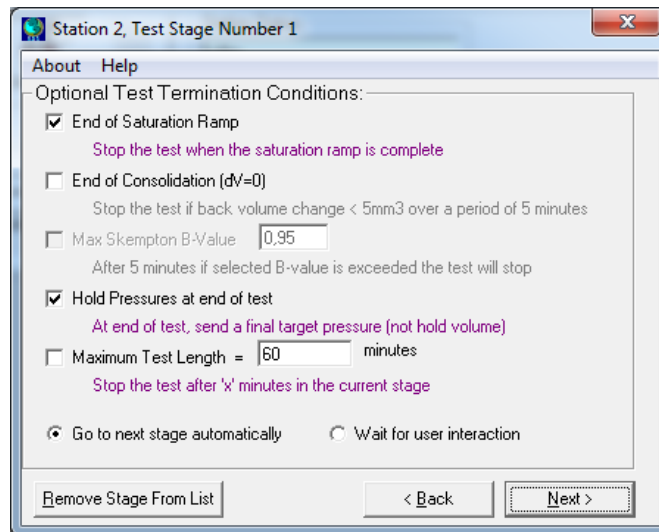


Figura 3.27: Condiciones para finalizar la etapa «*Saturation Ramp*».

Luego, se procede a la etapa que permite obtener el parámetro B del ensayo, con el fin de comprobar la correcta saturación de la muestra de suelo.

Para ello, se debe completar el cuadro “*Target Cell Pressure*” que aparece en la ventana correspondiente a la Fig. 3.28, con la presión de cámara total del ensayo; por lo tanto, equivale a la suma de la contrapresión con el confinamiento efectivo requerido.

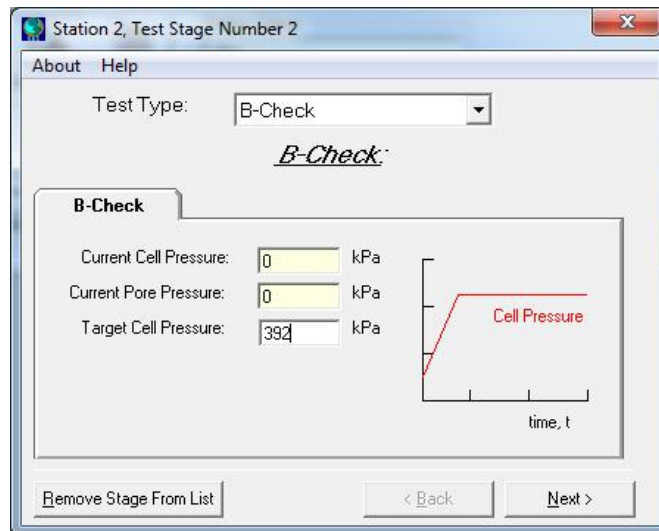


Figura 3.28: Verificación del parámetro B.

Las condiciones para continuar a la siguiente etapa, se configuran en la ventana que se muestra en la Fig. 3.29. Es posible definir el valor mínimo que se espera para el parámetro B (0,95 por norma), o también avanzar luego de transcurrido un determinado tiempo.

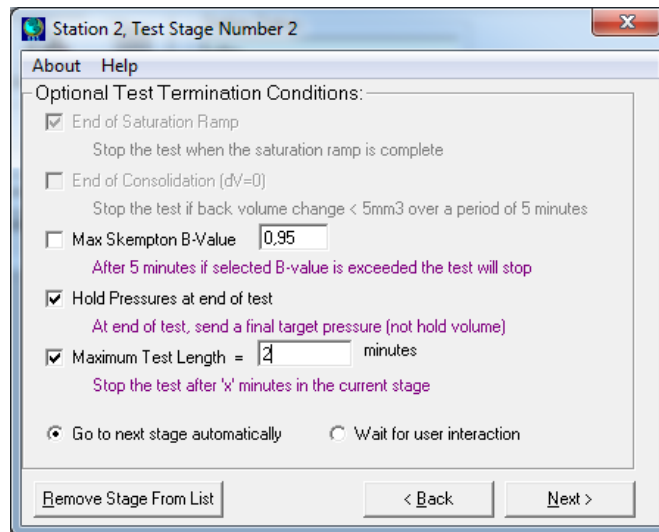


Figura 3.29: Condiciones para finalizar la verificación del parámetro B.

La última etapa que se debe configurar, previo a someter la probeta a un esfuerzo desviatorio, corresponde a la consolidación isotrópica.

Se deben ingresar en la ventana presentada en la Fig. 3.30, los valores de presión de cámara, que se mantendrá constante durante el ensayo, y de contrapresión. La resta de ambos parámetros equivale a la presión de confinamiento efectiva.

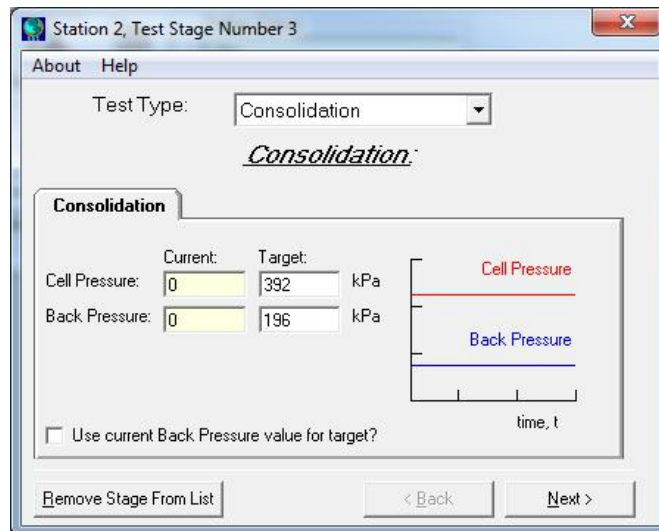


Figura 3.30: Etapa de consolidación isotrópica.

La consolidación isotrópica finaliza cuando se cumplen las condiciones establecidas en la ventana mostrada en la Fig. 3.31.

Se debe activar la casilla “*End of Consolidation (dV=0)*”, con el fin de avanzar a la siguiente etapa del ensayo, cuando el cambio volumétrico sea menor a 5 mm^3 durante 5 min.

En caso de conocer el tiempo que tarda la muestra en consolidarse, se puede completar la casilla “*Maximum Test Length*”, para que el desarrollo de esta fase tenga una menor duración.

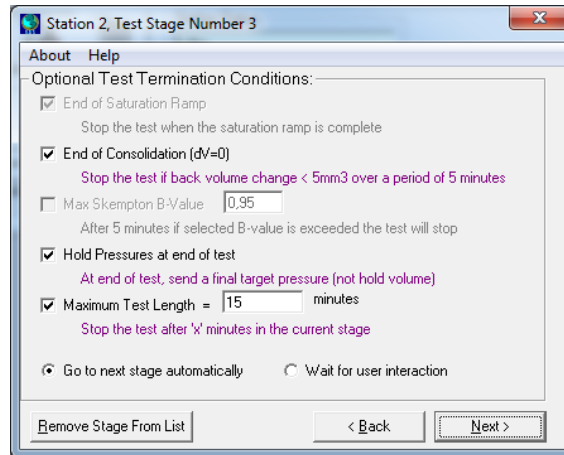


Figura 3.31: Condiciones para finalizar la consolidación isotrópica.

Paso 4: Definición del Ensayo Triaxial a Ejecutar

Se procede a definir las propiedades que rigen el ensayo triaxial convencional, además de establecer si corresponde a un ensayo en condición drenada o no drenada. Para ello se define una nueva etapa, utilizando el paquete de ensayos “*GDS_ttStandardTriaxial*”, como se muestra en la Fig. 3.32.

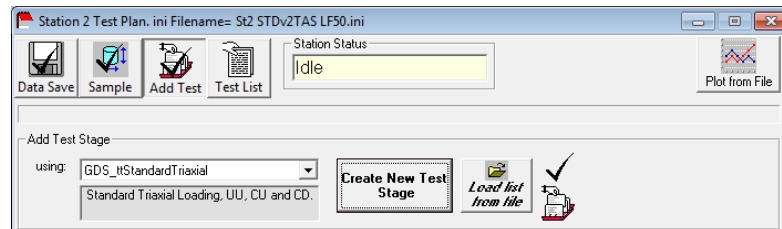


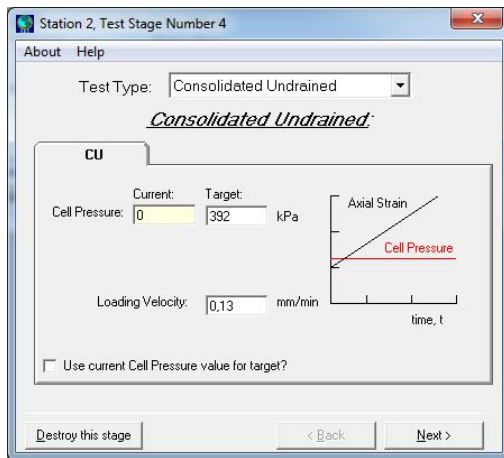
Figura 3.32: Selección de interfaz para ensayo triaxial.

Al presionar el botón «*Create New Test Stage*», se despliega la ventana que se ejemplifica en la Fig. 3.33(a). En el apartado “*Test Type*”, se define la condición de drenaje del ensayo triaxial, donde es posible elegir entre las pruebas exhibidas en la Fig. 3.33(b).

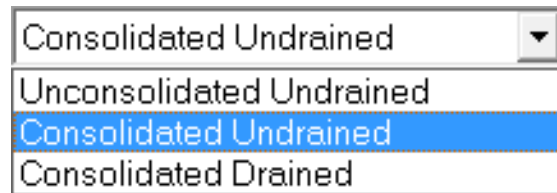
En el siguiente procedimiento se hace referencia a los ensayos triaxiales CID y CIU:

- Triaxial CID (*Consolidated Drained*)**: Es necesario definir la presión de cámara total (*Cell Pressure*), la contrapresión que se desea utilizar (*Back Pressure*) y por último la velocidad de carga en mm/min (*Loading Velocity*), la que por norma se establece en 0,13 mm/min, con una duración del ensayo de 2 hrs 30 min.

- Triaxial CIU (Consolidated Undrained):** Para este tipo de ensayo, se deben definir la presión de cámara total y la velocidad de carga, tal como se ejemplifica en la Fig. 3.33(a).



(a) Ejemplo de ensayo triaxial CIU



(b) Opciones de ensayos triaxiales convencionales

Figura 3.33: Implementación de ensayo triaxial convencional.

En el siguiente paso, es posible configurar un ajuste automático entre el pistón de carga y el cap superior de la probeta. Dicha acción se lleva a cabo activando la casilla “*Automatic Docking*”, definiendo la velocidad con que se eleva la base del marco de carga (*Velocity for auto docking*) y precisando el cambio en la fuerza axial que debe medir la celda de carga, para confirmar el acoplamiento, ver Fig. 3.34.

Se recomienda utilizar 10 mm/min y 0,05 kN, respectivamente.

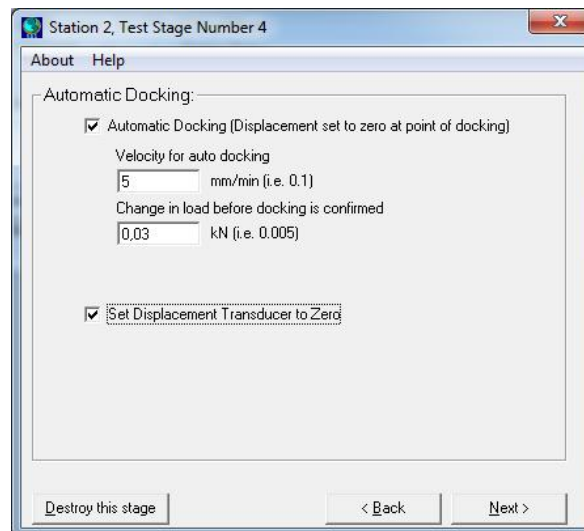


Figura 3.34: Ajuste automático del pistón de carga.

Por último, es necesario establecer las condiciones finales de ensayo. Se puede definir el tiempo que durará la etapa de corte del ensayo triaxial (*Maximum Test Length*); o en su lugar, se puede fijar la deformación máxima de la muestra de suelo (*Maximum Axial Strain*), ver Fig. 3.35.

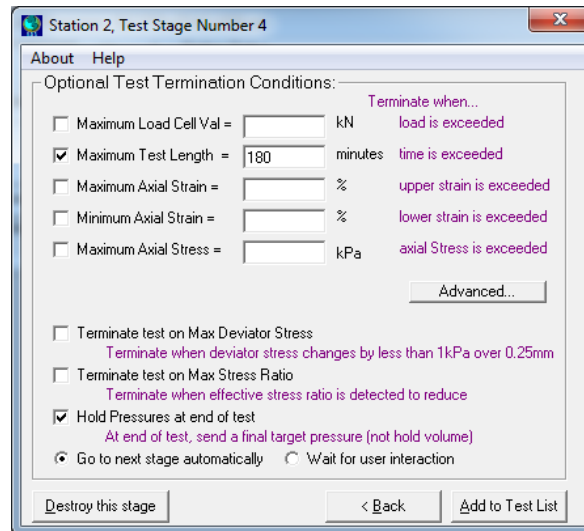


Figura 3.35: Condiciones para finalizar un ensayo triaxial convencional.

Una vez definido los pasos anteriormente descritos, el ensayo se encuentra preparado para ser ejecutado. Las etapas establecidas se muestran en el apartado «*Test List*», donde también se aprecia el botón «*Go to Test*», tal como se muestra en la Fig. 3.36.

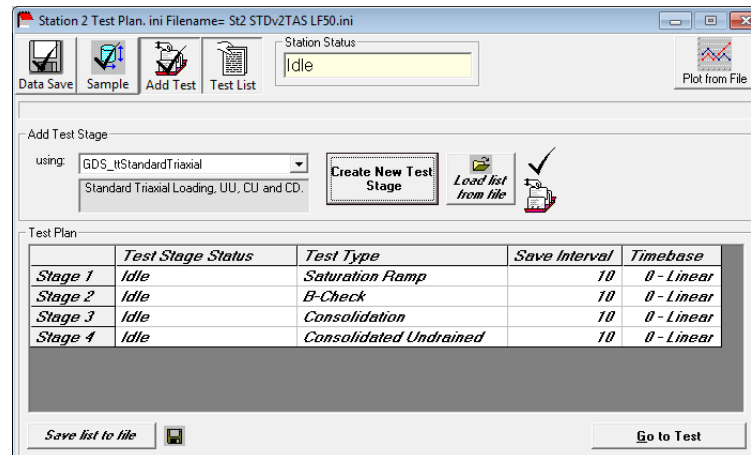


Figura 3.36: Verificación de las etapas definidas para el ensayo.

Oprimiendo el comando «*Go to Test*», se extiende la ventana que muestra la Fig. 3.37, donde tiene lugar el botón «*Start Test*» para comenzar al ensayo, ejecutando consecutivamente las etapas definidas.

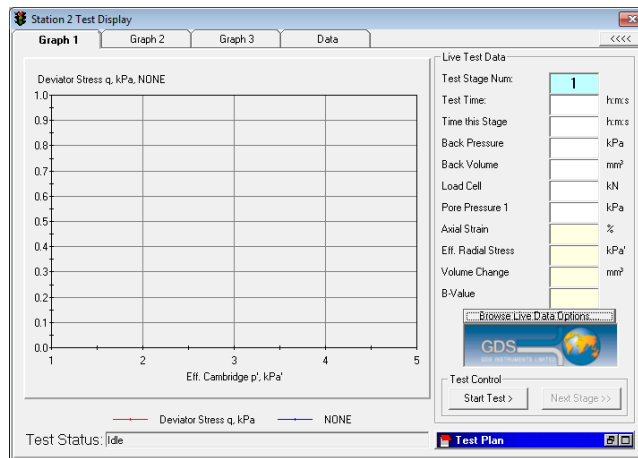


Figura 3.37: Ventana para dar comienzo al ensayo.

Paso 5: Opciones de Visualización del Ensayo

Durante se desarrolla el ensayo, es posible graficar y observar distintos parámetros instantáneamente. El software permite un máximo de tres gráficos, cuyos elementos se modifican en la pestaña *Graph Options*, que se aprecia en la ventana presentada en la Fig. 3.38, la cual se despliega oprimiendo el botón «*Browse Live Data Options*».

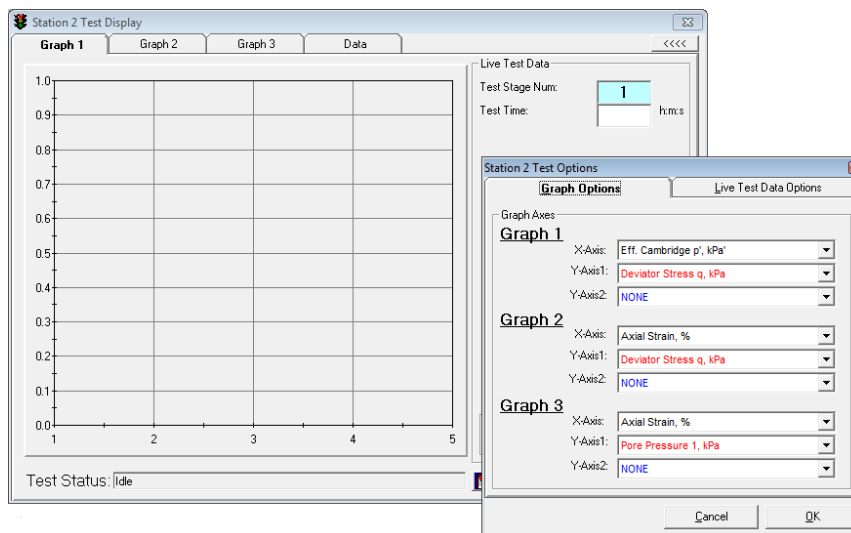


Figura 3.38: Opciones para graficar datos instantáneamente.

Para seleccionar los parámetros que se desean observar durante el transcurso del ensayo, es necesario cambiar a la pestaña *Live Test Data Options*, ver Fig. 3.39.

Es posible optar entre parámetros que son directamente obtenidos por los dispositivos que posee el equipo GDS Instruments (*Raw Data*), como también aquellos que son calculados a partir de los valores anteriores (*Calculated Parameters*).

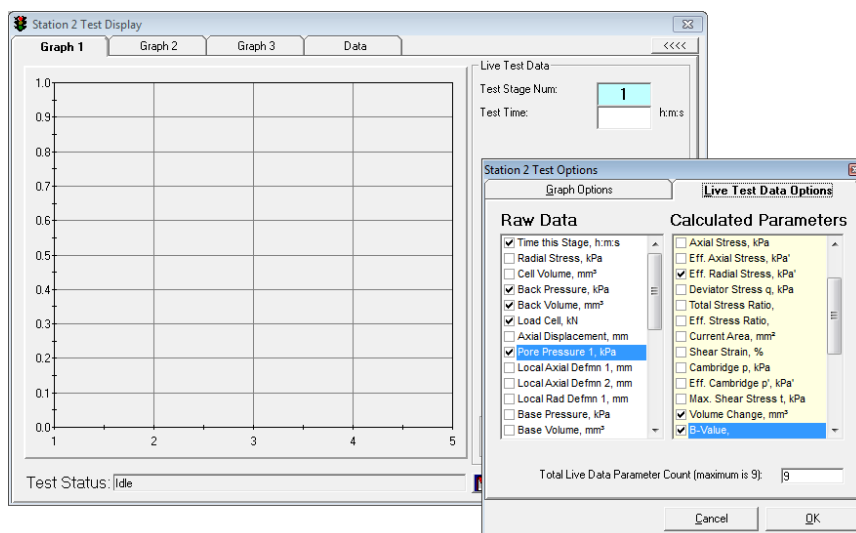


Figura 3.39: Visualización de parámetros durante el progreso del ensayo.

3.2. Determinación de Curva SWCC

Antes de utilizar el equipo GDS Instruments para determinar la curva característica suelo-agua (SWCC), se deben realizar las verificaciones previas análogas a las que se llevan a cabo al desarrollar un ensayo triaxial saturado; las que se explican en la Sección 3.1.1 del presente trabajo de título.

3.2.1. Modificación del Pedestal de la Cámara Triaxial

Un elemento esencial que permite realizar ensayos parcialmente saturados, y mantener el control de parámetros que determinan el comportamiento de un suelo en dicha condición, corresponde al disco poroso de alto valor de entrada de aire. Por lo tanto, previo a implementar un ensayo de este tipo, se debe modificar el pedestal de la cámara triaxial, reemplazando la base convencional donde se sitúa la probeta, por el disco poroso (HAEPD).

El correcto funcionamiento de un disco poroso, requiere que este elemento se encuentre completamente saturado. Para llevar a cabo este procedimiento, se monta la base de la cámara triaxial en el marco de carga, se conecta el pistón controlador de back-pressure, se satura la vía por donde circula el agua y se aplica una presión máxima de 40 kPa. Este proceso tarda entre 2 a 4 hrs. Se recomienda que siempre exista una presión positiva, de aproximadamente 20 kPa, por debajo del disco poroso, para los distintos ensayo en que se utilice.

La saturación del disco poroso, permite que se pueda alcanzar la succión establecida por diseño del elemento.

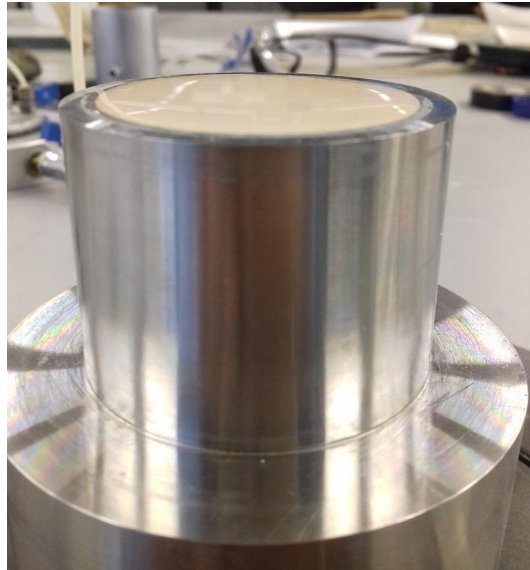


Figura 3.40: Disco poroso saturado.

3.2.2. Confección de la Probeta

Es importante considerar que la implementación de un ensayo parcialmente saturado, requiere que la muestra de suelo se encuentre inicialmente en un estado saturado. Luego, añadiendo aire a presión en los vacíos del esqueleto granular, se desatura el material. Por lo tanto, es recomendable que se genere una probeta con alto contenido de agua en los intersticios, para disminuir el tiempo de saturación.

Para armar la probeta de suelo, se utiliza la metodología denominada como “*wet tamping*”, equivalente a la empleada para los ensayos triaxial convencionales.

El procedimiento corresponde al detallado en la Sección 3.1.2, con la diferencia que la muestra requerida es de menor tamaño. Se utilizan dos capas de compactación, generando una muestra de 4 cm de altura y 5 cm de diámetro.

3.2.3. Montaje de Cámara Triaxial

El montaje de la cámara triaxial para determinar la curva característica suelo-agua, se lleva a cabo de forma idéntica a como se detalla en la Sección 3.1.4.

Se agrega un nuevo dispositivo conectado al equipo de adquisición de datos (ver Fig. 3.9), el cual se describe a continuación:

- **Sensor de presión atmosférica:** este dispositivo (ver Fig. 3.41) mide la presión atmosférica del lugar en donde se encuentra instalado el equipo GDS Instruments y permite calibrar la ley de los gases ideales ($PV = kRT$), para considerar la compresibilidad del aire en un ensayo parcialmente saturado.



Figura 3.41: Sensor de presión atmosférica.

Posteriormente, se procede a conectar las líneas que van situadas en las válvulas del pedestal de la cámara triaxial, según el orden presentado en la Fig. 3.42.

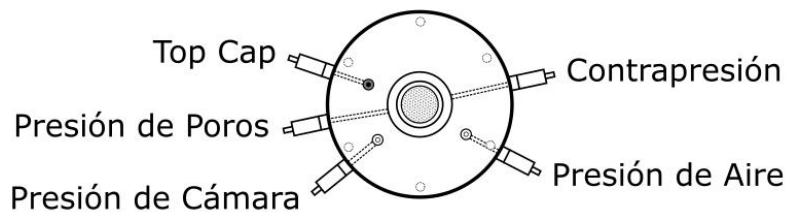


Figura 3.42: Conexiones en el pedestal de la cámara triaxial.

Para desarrollar un ensayo parcialmente saturado, se debe agregar a los dispositivos utilizados para un ensayo convencional, descritos en la Sección 3.1.4, el pistón controlador de presión y volumen de aire.



Figura 3.43: Pistón controlador de presión y volumen de aire.

3.2.4. Saturación

Para saturar la muestra de suelo, se utiliza el pistón controlador de back-pressure. El procedimiento que esquematiza la Fig. 3.44, se detalla a continuación:

- Se debe configurar la presión de cámara en 50 kPa, utilizando el pistón correspondiente.
- Se satura el sensor de presión de poros.
- Se conecta una línea en la válvula denominada como “Presión de Aire” en el pedestal de la cámara triaxial, Fig. 3.42. El extremo opuesto de la línea se ubica en un vaso de precipitado, para contener el agua que circule por dentro de la muestra.
- Se configura la presión aplicada por el pistón de back-pressure en 45 kPa. Este esfuerzo se aplica por debajo del disco poroso, el cual presenta una muy baja permeabilidad, resultando en que la saturación de una muestra se complete en 1 a 2 días. Como requisito funcional del disco poroso, la presión aplicada por debajo, no debe exceder por 50 kPa la presión que actúa por la parte superior del elemento.

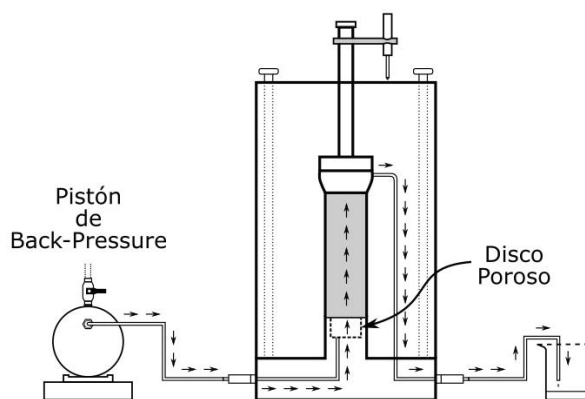


Figura 3.44: Proceso de saturación a través del disco poroso (HAEPD).

El tiempo de saturación está dado principalmente por la baja permeabilidad del disco poroso; la Fig. 3.45 muestra como evoluciona el volumen de agua añadido a la muestra de suelo en función del tiempo, lo que arroja una tasa de saturación igual a $t_{sat} = 0,166$ [mm³/seg]. Si se utilizara un material con permeabilidad menor a la del disco poroso, el tiempo de saturación dependería de dicha propiedad.

Con la tasa de saturación conocida y el contenido de agua en mm³ necesario para saturar la muestra, se puede estimar el tiempo requerido en segundos, utilizando la Ec. 3.1. Utilizando una presión con el pistón de back-pressure de 45 kPa.

$$T_s = \frac{\Delta V_w}{0,166743} \quad (3.1)$$

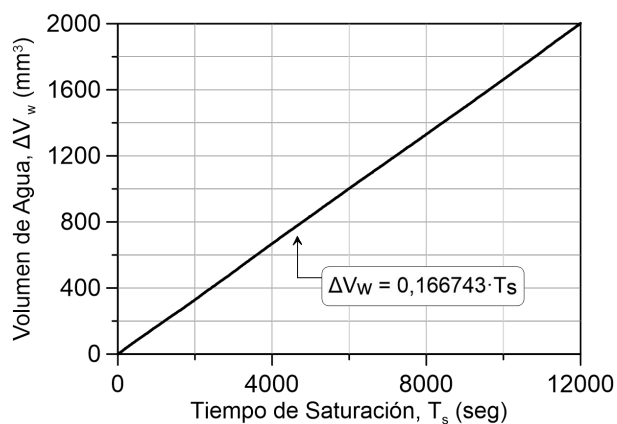


Figura 3.45: Tasa de saturación utilizando el disco poroso.

3.2.5. Procedimiento en GDSLab.exe

La implementación del ensayo en el software GDSLab, se desarrolla mediante un procedimiento similar al descrito en la Sección 3.1.6, para un ensayo triaxial convencional.

La configuración del archivo de datos (Paso 1) y la definición de las propiedades de la muestra de ensayo (Paso 2), son etapas idénticas pero constituidas en la estación de trabajo #3; por lo tanto, en el siguiente detalle se hace referencia únicamente a la definición de las etapas del ensayo.

Paso 3: Definición de las Etapas de Ensayo

Para llevar a cabo un ensayo parcialmente saturado, ya sea la obtención de la curva característica suelo-agua, como también un ensayo triaxial; el software GDSLab posee un paquete de ensayos denominado «*GDS_tt4DUNSAT*», tal como se muestra en la Fig. 3.46.

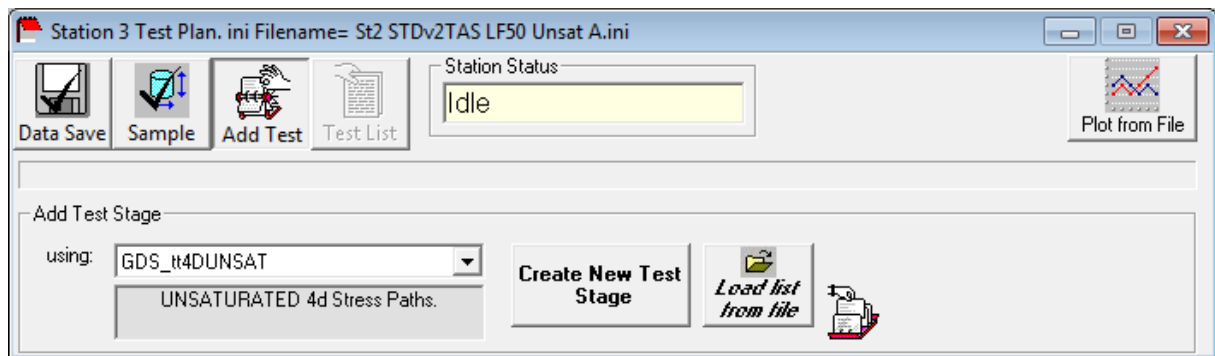
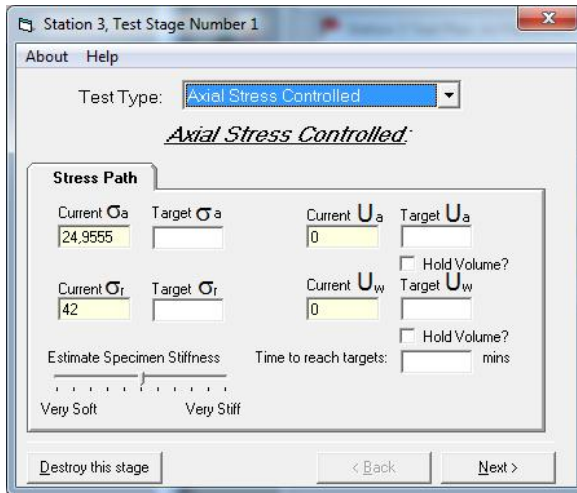


Figura 3.46: Agregar etapa de ensayo usando el paquete *GDS_tt4DUNSAT*.

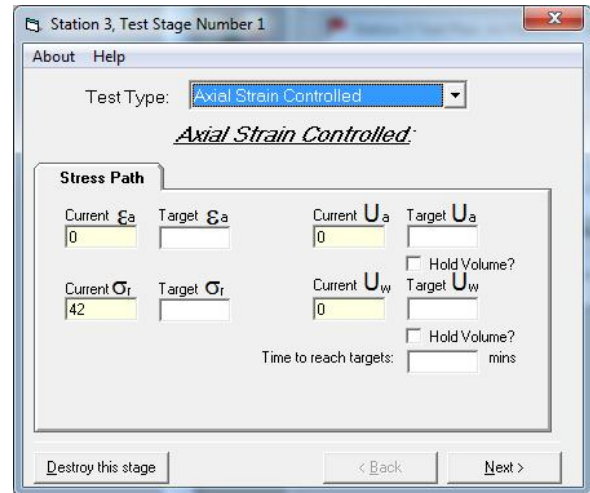
Al presionar el botón «*Create New Test Stage*», emerge una ventana como la presentada en la Fig. 3.47. El paquete de ensayos utilizado para analizar el comportamiento parcialmente saturado, proporciona dos opciones para controlar cada etapa:

- **Opción 1:** Seleccionando la alternativa “*Axial Stress Controlled*” en la casilla «*Test Type*», como ejemplifica la Fig. 3.47(a), es posible controlar el esfuerzo axial (σ_a), el esfuerzo radial (σ_r), la presión de aire (u_a) y la presión de agua (u_w) a la cuál estará sometida la probeta. Además, se debe ingresar un tiempo estimado para alcanzar los valores ingresados.
- **Opción 2:** Al utilizar la alternativa “*Axial Strain Controlled*”, se despliega la ventana presentada en la Fig. 3.47(b), la cual permite establecer, la deformación axial (ε_a), el esfuerzo radial (σ_r), la presión de aire (u_a) y la presión de poros (u_w). De igual forma que en el punto anterior, se debe ingresar el tiempo para alcanzar los valores ingresados.

En ambas opciones, es posible imponer que el volumen de agua y volumen de aire en la probeta, se mantengan constante durante el desarrollo de la etapa configurada.



(a) Etapa a esfuerzo axial controlado.



(b) Etapa a deformación axial controlada.

Figura 3.47: Opciones para manipular etapas de un ensayo parcialmente saturado.

La obtención de la curva de succión (SWCC) corresponde a un ensayo de varias etapas, las que se definen utilizando la opción “*Axial Stress Controlled*” descrita previamente. En cada una de ellas, se debe establecer el esfuerzo radial σ_r aplicado, que corresponde al confinamiento de la muestra. El esfuerzo axial σ_a , que debe ser levemente mayor al esfuerzo radial, para aplicar una tensión deviatorica mínima y asegurar que la muestra esta fija al pedestal. La diferencia entre la presión de aire u_a y la presión de poros u_w , definen la succión matricial presente en la muestra de suelo.

En la Tabla 3.1 se presenta un ejemplo de etapas definidas para obtener la curva característica suelo-agua. La muestra esta sometida a un confinamiento constante de 200 kPa y esfuerzo desviatorico de 2 kPa. En la primera etapa se define una succión matricial de 1 kPa. Cuando se ejecuta dicha etapa, el equipo comienza a aplicar las distintas presiones hasta alcanzar los valores objetivos; como resultado se obtiene el grado de saturación de la muestra, para la succión establecida.

Para decretar el fin de una etapa y continuar con la siguiente, se debe alcanzar un cambio volumétrico constante, una vez logradas las presiones objetivos. Para ello, se debe visualizar un gráfico de variación de volumétrica en función del tiempo de ensayo, durante el transcurso del ensayo.

Cada etapa puede durar desde 12 hrs a 1 día en el caso de una arena, el tiempo se puede extender para otros tipos de suelos.

Tabla 3.1: Ejemplo de etapas definidas para determinar la curva SWCC

Etapa	Esfuerzo Axial σ_a (kPa)	Esfuerzo Radial σ_r (kPa)	Presión de Aire u_a (kPa)	Presión de Poros u_w (kPa)
1	203	201	21	20
2	204	202	22	20
3	205	203	23	20
4	206	204	24	20
5	207	205	25	20
6	209	207	27	20
7	212	210	30	20
8	217	215	35	20
9	222	220	40	20
10	232	230	50	20

Posterior a definir las presiones de cada etapa del ensayo, se deben completar las condiciones para avanzar a la siguiente, en la ventana presentada mediante la Fig. 3.48. Sin embargo, como el tiempo de duración de cada etapa es incierto, ya que depende de cuando se alcance un equilibrio en la variación volumétrica, se recomienda habilitar la opción «*Wait for user interaction*», para que el usuario determine el fin de cada fase.

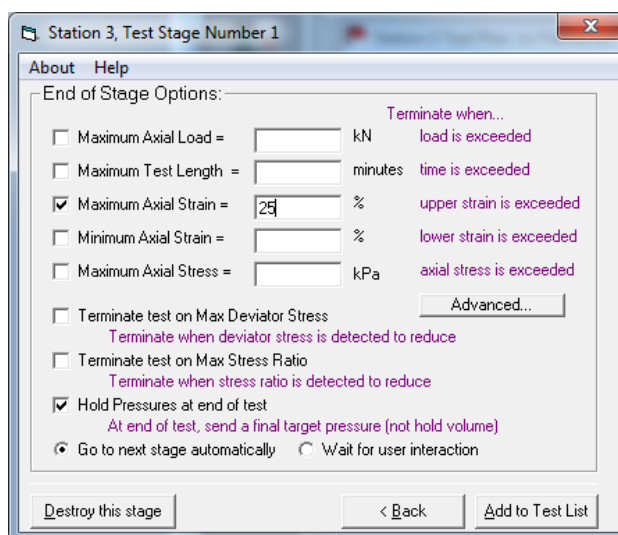


Figura 3.48: Condiciones para finalizar cada etapa del ensayo.

Además, es necesario completar ciertos parámetros que caracterizan la muestra de suelo, tal como se observa en la Fig. 3.49. Estos valores son requeridos por el software, para realizar cálculos mediante las ecuaciones presentadas en la Sección A.1.2.

La casilla “*Atmospheric Air Pressure*” se debe mantener incompleta, ya que el equipo GDS Instruments utilizado, posee el sensor de presión atmosférica (ver Fig. 3.41).

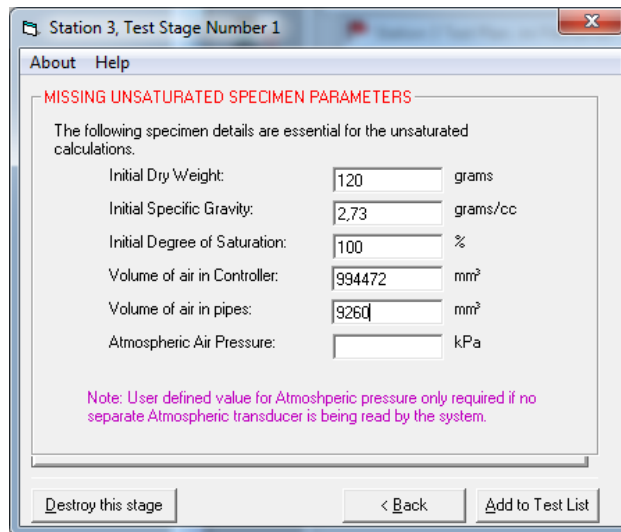


Figura 3.49: Parámetros iniciales de la muestra de suelo ensayada.

3.3. Ensayo Triaxial Parcialmente Saturado

El procedimiento para realizar un ensayo triaxial en una muestra de suelo en condición parcialmente saturada, es equivalente al que se considera para obtener la curva característica suelo-agua y que se detalla en la Sección 3.2. A continuación se hace referencia únicamente al uso del programa GDSLab.

3.3.1. Procedimiento en GDSLab.exe

Para implementar un ensayo triaxial parcialmente saturado, a diferencia de la obtención de la curva de succión, sólo se requiere definir dos etapas de ensayo, utilizando la opción “Axial Strain Controlled” (ver Fig. 3.47(b)).

Considerando que inicialmente la muestra se encuentra saturada, por lo tanto con succión nula; en una primera etapa se debe precisar la succión matricial que tendrá la muestra de suelo antes de ser sometida a un esfuerzo desviatorio y el confinamiento total concretado previamente. Para declarar el fin de esta etapa y comienzo de la siguiente, se debe esperar a que la muestra alcance una variación volumétrica constante con el transcurso del tiempo, esto se traduce en que la muestra se consolida a un cierto valor de confinamiento y succión matricial constante.

En una segunda etapa se debe definir la deformación axial máxima del ensayo, por lo general un ensayo triaxial se desarrolla hasta un valor de 20 %. Además, se debe establecer el confinamiento total, el parámetro que controla la fase de aire y la fase de agua, el que puede variar entre presión y volumen, dependiendo del tipo de ensayo triaxial que se desea implementar.

- **Ensayo Triaxial Consolidado Drenado:** Por tratarse de un ensayo drenado, el parámetro que controla las fases de agua y aire, corresponde a la presión, por lo tanto, se ingresa el valor de presión de aire u_a y presión de poros u_w , que determinan la succión matricial y se mide la variación volumétrica. Cabe destacar, que la duración de la etapa de corte, debe ser tal que se pueda medir el cambio volumétrico de agua, considerando la baja permeabilidad del disco poroso. Para el presente trabajo de título, se fijó la duración en 2,5 días. La Tabla 3.2, muestra las etapas definidas para un ensayo de este tipo.
- **Ensayo Triaxial Consolidado Drenado a Volumen de Agua Constante:** Este ensayo es equivalente al descrito en el punto anterior, sin embargo, no se permite el drenaje de agua. Como consecuencia, no es necesario ingresar un valor de presión de poros u_w y se debe activar la casilla «*Hold Volume*».
- **Ensayo Triaxial Consolidado No Drenado:** En cuanto al presente ensayo, el parámetro que controla las fases de agua y aire, corresponde al volumen. Por lo tanto, se activa la casilla «*Hold Volume*» para ambos fluidos, lo que establece un volumen constante de la probeta durante la etapa de corte y se miden las presiones generadas. Existe una variación en la succión matricial.

Tabla 3.2: Ejemplo de etapas definidas para un triaxial parcialmente saturado.

Etapa	Deformación Axial ε_a (kPa)	Esfuerzo Radial σ_r (kPa)	Presión de Aire u_a (kPa)	Presión de Poros u_w (kPa)
1	0	202	22	20
2	20	202	22	20

4. Ensayos de Laboratorio

4.1. Programa de Ensayos

Se ejecutaron diversos ensayos de caracterización de la arena de relave utilizada, que se resumen en la Tabla 4.1. El análisis granulométrico fue desarrollado con el objetivo de implementar el modelo descrito en la Sección 2.2.5, que requiere como antecedente inicial, la distribución del tamaño de granos completo. El peso específico de los sólidos, es necesario para determinar distintas propiedades índices.

Cabe destacar, que para calcular la densidad relativa de las muestras confeccionadas, se requiere conocer la densidad máxima y densidad mínima del suelo. Estos ensayos no se realizaron, debido a que formaban parte de antecedentes propios del Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile, lugar donde se llevaron a cabo los diversos estudios.

Tabla 4.1: Plan de ensayos de caracterización.

Ensayo	Norma	Cantidad
Análisis Granulométrico - Vía Seca	ASTM D2487	1
Análisis Granulométrico - Hidrómetro	ASTM D421-58	1
Peso Específico de los Sólidos	ASTM D423-66	2

Por otra parte, se realizaron ensayos triaxiales convencionales, del tipo drenado y no drenado, para establecer las bases con las cuales comparar el comportamiento mecánico parcialmente saturado. Estos ensayos fueron efectuados en dos equipos distintos, con el fin de corroborar el correcto desempeño del equipo GDS Instruments. Además, la probeta fue confeccionada a dos grados de empaquetamiento diferentes, con el propósito de apreciar el comportamiento contractivo y dilatante del material. En total se realizaron 24 ensayos triaxiales saturados, cuyo detalle se presenta en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Plan de ensayos triaxiales convencionales.

Ensayo	Muestra	Equipo	Cantidad	Confinamiento Efectivo [kgf/cm ²]
Triaxial CID	DR = 40 %	Humboldt	3	1 - 2 - 4
		GDS Instruments	3	1 - 2 - 4
	DR = 60 %	Humboldt	3	1 - 2 - 4
		GDS Instruments	3	1 - 2 - 4
Triaxial CIU	DR = 40 %	Humboldt	3	1 - 2 - 4
		GDS Instruments	3	1 - 2 - 4
	DR = 60 %	Humboldt	3	1 - 2 - 4
		GDS Instruments	3	1 - 2 - 4

Posteriormente, se procedió a realizar un primer ensayo del tipo parcialmente saturado, correspondiente a la determinación de la curva característica suelo-agua. Los parámetros del ensayo se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Plan de ensayo para determinar la curva SWCC.

Ensayo	Muestra	Equipo	Cantidad	Confinamiento Efectivo [kgf/cm ²]
Determinación de Curva SWCC	DR = 60 %	GDS Instruments	1	1

El fin de la etapa experimental, está conformado por los ensayos triaxiales con la muestra en condición parcialmente saturada, cuya especificación se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Plan de ensayos triaxiales parcialmente saturados.

Ensayo	Muestra	Equipo	Cantidad	Succión [kgf/cm ²]	Conf. Efectivo [kgf/cm ²]
Triaxial Drenado	DR=60 %	GDS Instruments	3	0,02	1 - 2 - 4
Parcialmente Saturado			3	0,20	1 - 2 - 4

4.2. Equipos Triaxiales

Los equipos triaxiales utilizados para la presente investigación y sus características, se detallan a continuación.

4.2.1. Equipo Humboldt

El equipo triaxial presentado en la Fig. 4.1, permite implementar ensayos triaxiales estáticos convencionales, es decir, en condición de saturación total. Admite realizar ensayos en respuesta drenada y no drenada del material. Los componentes básicos del instrumento, se detallan en el siguiente apartado:

Cámara Triaxial

Este elemento, que se puede apreciar en la Fig. 4.1(a), admite probetas cuyas dimensiones son 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Posee una válvula para aplicar y controlar la presión de cámara, una válvula para controlar el flujo de agua dirigido al sensor de presión de poros y dos válvulas para aplicar las presiones por dentro de la probeta (back-pressure), una de ellas conduce el flujo de agua por la parte superior de la muestra y la otra por la parte inferior.

Cabe señalar, que la celda utilizada posee cap superior dirigido, para evitar una localización temprana de la falla. Permite una presión de cámara máxima de 12 kgf/cm².

Marco de Carga

El mecanismo presentado en la Fig. 4.1(b), también denominado como prensa triaxial, consiste en un marco metálico con una capacidad máxima de reacción vertical equivalente a 50 kN.

Posee un lector digital, que arroja el desplazamiento vertical del plato ascendente; la carga vertical medida por la celda de carga, con capacidad máxima de 10 kN y la presión de poros, obtenida con el sensor cuya capacidad máxima es de 10 kgf/cm².

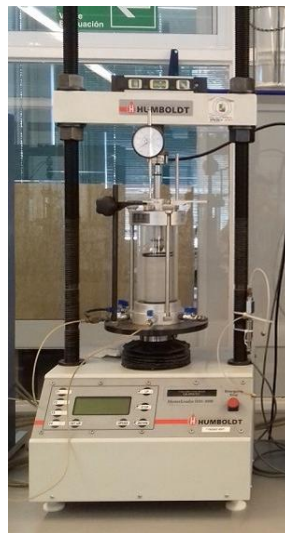
Panel Triaxial

El aparato que se muestra en la Fig. 4.1(c), corresponde a un panel que permite controlar las presiones y volúmenes de agua, tanto en la cámara triaxial como dentro la probeta de suelo, durante las distintas etapas del ensayo.

El panel, cuya máxima presión aplicada es de 7 kgf/cm², consiste en una serie de buretas graduadas y alimentadas con agua; que se conectan en las distintas válvulas de la cámara triaxial.



(a) Cámara triaxial.



(b) Marco de carga.



(c) Panel para controlar presiones y volúmenes.

Figura 4.1: Componentes del equipo triaxial Humboldt.

4.2.2. Equipo GDS Instruments

El segundo equipo utilizado en el presente trabajo de investigación, corresponde al equipo triaxial marca GDS Instruments, cuyo detalle fue presentado en la Sección ??.

4.3. Procedimiento de Ensayos

4.3.1. Triaxial Saturado

Confección de Probeta Para la preparación de las muestras, se agrega una masa conocida de suelo a una bolsa plástica, se añade agua hasta obtener una humedad del 5 % y se mezcla hasta homogeneizar el suelo.

El armado de las probetas de suelo, se desarrolló mediante el método de apisonamiento húmedo o wet tamping, que consiste en compactar una muestra de arena de relave en capas de masa conocida, con el objetivo de conseguir una densidad relativa específica. Se utiliza un molde de bronce, cuyas dimensiones son 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Aplicación de CO_2

Una vez que la probeta se encuentra montada en la cámara triaxial, se procede a circular dióxido de carbono CO_2 por el interior del esqueleto granular del suelo, el cuál ingresa por debajo de muestra y escapa por la parte superior. Este procedimiento tiene como objetivo, reemplazar las moléculas de aire que quedan alojadas en los intersticios, por un gas más liviano que facilita la saturación. La aplicación de CO_2 tiene una duración de 30 minutos.

Saturación

El proceso de saturación, se lleva a cabo mediante la circulación de agua destilada y desaireada, por dentro de la muestra de suelo. Este fluido se ingresa por debajo de la muestra y desemboca por la parte superior. Para asegurar una correcta saturación, se colecta en una vaso de precipitado un excedente de 200 ml de agua. Considerando la permeabilidad de la arena de relave utilizada, este proceso tarda entre 20 a 30 minutos.

Para validar la saturación, se debe calcular el parámetro B de Skempton, según la Ec. 4.1. Se registra el cambio en la presión de poros Δu , generado por el aumento en la presión de cámara $\Delta\sigma_3$, al momento de establecer el confinamiento isotrópico efectivo del ensayo. Se considera que las probetas se encuentran correctamente saturadas, si se obtiene $B \geq 0,95$.

$$B = \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta u} \geq 0,95 \quad (4.1)$$

Donde:

$\Delta\sigma_3$ = Variación de presión de confinamiento, kgf/cm².

Δu = Variación en la presión de poros, kgf/cm².

Consolidación

Durante la etapa de consolidación, se permite el drenaje de las presiones de poros, generadas al momento de establecer el confinamiento isotrópico efectivo. Por lo tanto, cambio volumétrico en la muestra de suelo.

Se mide para ciertos instantes de tiempo, la variación del contenido de agua dentro de la muestra, hasta alcanzar una estabilización en el cambio volumétrico. En el caso de la arena de relave utilizada, este proceso tarda entre 15 a 20 minutos.

Aplicación de Esfuerzo Desviador

Posterior al proceso de consolidación, se da inicio a la aplicación del esfuerzo desviador axial, mediante un desplazamiento vertical controlado que se desarrolla a una tasa constante de 0.13 mm/min, hasta alcanzar un 20 % de deformación axial. En el caso de probetas de 10 cm de altura, esta etapa tiene una duración 2 hrs 30 min.

Durante la ejecución de esta etapa, se debe registrar el desplazamiento axial y la carga resistida por la probeta de suelo. Además, se debe conocer el cambio volumétrico, en caso de realizar un ensayo triaxial con respuesta drenada. Si se implementa un ensayo con respuesta no drenada, se debe tener control de las presiones de poros generadas.

Índice de Vacíos Post-Ensayos

La evaluación del índice de vacíos al finalizar el ensayo, se realizó según la metodología propuesta por Verdugo y Ishihara (1996), la cuál se basa en la Ec. 4.2.

$$e = \frac{(V_i - V_f) + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s \quad (4.2)$$

Donde:

V_i = Volumen en la muestra de suelo una vez finalizada la etapa de corte, cm^3 .

V_f = Volumen en la muestra una vez realizado el procedimiento señalado por Verdugo y Ishihara (1996), cm^3 .

G_s = Peso específicos de los sólidos.

W_d = Peso seco de la probeta, grs.

ω_r = Humedad de la muestra una vez el procedimiento señalado por Verdugo y Ishihara (1996).

4.3.2. Determinación de la Curva Característica Suelo-Agua

Confección de Probeta

La preparación de las muestras utilizadas para desarrollar este ensayo, se realiza mediante el método de apisonamiento húmedo, al igual que para un ensayo triaxial convencional.

Sin embargo, se deben fabricar probetas con el mayor contenido de agua admisible para manipular el material, con el objetivo de disminuir el tiempo necesario de saturación. Con la arena de relave utilizada para el presente trabajo, es posible confeccionar muestras con una humedad máxima de 18%.

Cabe señalar, que para determinar la curva de succión se requiere una probeta de menor tamaño; por lo tanto, se compactan sólo dos capas de suelo húmedo, generando una muestra de 5 cm de diámetro y 4 cm de altura.

Saturación

Para desarrollar un ensayo parcialmente saturado en el equipo triaxial GDS Instruments, la muestra de suelo debe estar inicialmente en una condición de saturación total, con el objetivo de tener control sobre la succión aplicada. Es decir, la succión matricial al comenzar el ensayo es nula.

El proceso de saturación se lleva a cabo circulando agua por dentro de la probeta, en dirección ascendente; el agua destilada y desaireada que ingresa a los intersticios, debe recorrer el espesor del disco poroso de alto valor de entrada de aire. Dado que este elemento es de baja permeabilidad, el tiempo de saturación está dado por el valor de su conductividad hidráulica.

En particular, el tiempo de saturación para la probeta utilizada en este ensayo, varía entre 24 y 36 hrs.

Etapas de Succión

El ensayo que permite determinar la curva característica suelo-agua, mediante el uso del equipo triaxial GDS Instruments, consta de una serie de etapas en la que se declaran distintos valores de presión de aire y presión de poros, que definen la succión matricial aplicada.

Se establece que los distintos esfuerzos se han aplicado correctamente, una vez que el cambio volumétrico de la muestra es constante, al igual que el grado de saturación proporcionado por el software GDSLab.

Por cada etapa de succión aplicada, se obtiene el grado de saturación que presenta la muestra, ambos parámetros conforman la curva característica suelo-agua. En la Sección 3.2.5 se explica con mayor detalle el procedimiento utilizado para el presente ensayo.

4.3.3. Triaxial Parcialmente Saturado

Confección de Probeta

La probeta confeccionada para este tipo de ensayos, fue elaborada mediante el método de apisonamiento húmedo o wet tamping, compactando 5 capas de suelo húmedo. El contenido de agua usado para el armado de la muestra, considera el máximo admisible para la manipulación del material, con el objetivo de disminuir el tiempo de saturación.

De igual forma que para un ensayo triaxial convencional, la implementación de este ensayo, considera una muestra de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Saturación

El proceso de saturación es análogo al realizado durante la determinación de la curva característica suelo-agua, presentado en la Sección 4.3.2.

Conforme a las dimensiones de la probeta utilizada para un ensayo triaxial parcialmente saturado, el tiempo requerido para la saturación del esqueleto granular, varía de 2 a 3 días.

Al término de la etapa de saturación de la muestra de suelo, es posible asumir que la succión matricial en la probeta es nula.

Generar Succión y Consolidación

La siguiente etapa consiste en generar la succión matricial, con el objetivo de conseguir un estado parcialmente saturado del material. Utilizando el software GDSLab, se define la presión de confinamiento, la presión de aire y la presión de poros; los últimos dos parámetros determinan la succión matricial.

Se establece que la succión matricial ha sido correctamente aplicada, una vez que se estabiliza el cambio volumétrico de la probeta, lo que se traduce además una consolidación isotrópica al estado de esfuerzo definido.

Aplicación de Esfuerzo Desviador

Finalmente, se aplica un esfuerzo desviador axial a la muestra de suelo. Esta etapa es definida en el software GDSLab, en donde se debe precisar la deformación máxima, el confinamiento, la succión matricial y el tiempo de duración de la etapa de corte. Para más detalle del procedimiento, ver la Sección 3.3.1.

El tiempo de desarrollo de esta etapa, debe considerar el tipo de ensayo triaxial realizado. En caso de realizar un ensayo triaxial parcialmente saturado a succión constante, es decir, se admite el drenaje tanto de la fase de aire como del agua, la duración debe tener en cuenta la baja permeabilidad del disco poroso de alto valor de entrada de aire, para la disipación de las presiones de poros.

Durante la investigación realizada por Rahardjo et al. (2004), se utilizó una velocidad de deformación axial de 0,0009 mm/min, para ensayos triaxiales parcialmente saturados del tipo CD, correspondiente al consolidado drenado; que permite alcanzar el 20 % de deformación en 15 días para una muestra de 10 cm de altura. Mientras que para ensayos triaxiales del tipo CW, es decir, consolidados isotrópicamente y con la aplicación de la carga a volumen de agua constante, se usó una velocidad de deformación de 0,009 mm/min; alcanzando el 20 % de deformación en 1 día y 12 hrs.

En particular, para el presente trabajo, el esfuerzo desviador se aplicó durante 2 días y 12 hrs hasta alcanzar el 20 % de deformación axial; por tal motivo, se utilizó una velocidad controlada de desplazamiento vertical equivalente a 0,0056 mm/min. Se determinó esta condición, considerando los plazos que rigen el presente trabajo y que permiten completar el programa de ensayos establecido.

Cada ensayo triaxial parcialmente saturado, considerando todas las etapas que intervienen en el procedimiento, tuvo una duración aproximada de 8 días.

5. Resultados de Ensayos

5.1. Ensayos de Caracterización

Se realizó una granulometría completa a una muestra representativa de la arena de relave, mediante tamices y análisis hidrométrico. La Fig. 5.1 muestra la distribución del tamaño de los granos obtenida; de la cuál se infiere que el material presenta un porcentaje predominante de arena fina, equivalente al 86.8 %; mientras que el contenido de finos, bajo la malla #200, corresponde al 3.9%. Según la clasificación USCS, el suelo califica como arena mal graduada (SP).

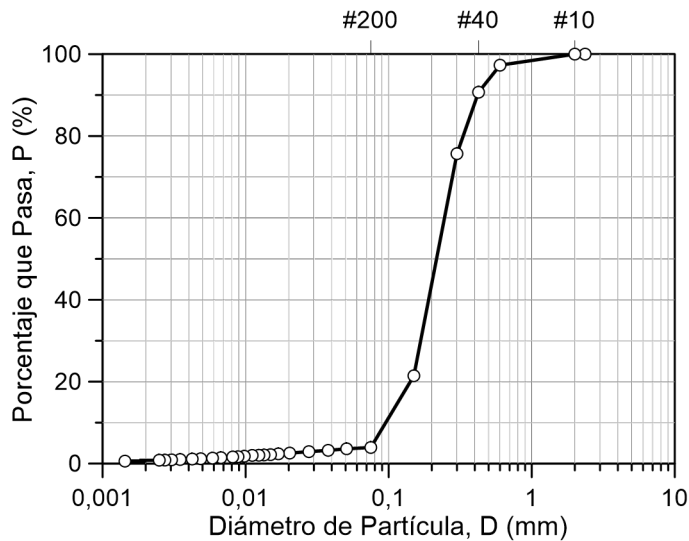


Figura 5.1: Curva de distribución granulométrica completa.

La Tabla 5.1 presenta un resumen de las propiedades índices características del material, obtenidas de los diferentes ensayos de laboratorio.

Tabla 5.1: Resumen de propiedades índices de la arena de relave utilizada.

Ensayos		Valor	Unidad
Granulometría	Tamaño máximo de partículas	2	mm
	Porcentaje de finos (<0.075 mm)	3,9	%
	D_{60}	0,246	mm
	D_{30}	0,167	mm
	D_{10}	0,095	mm
	Coficiente de uniformidad (C_u)	1,196	-
	Coficiente de curvatura (C_c)	2,575	-
Densidad Relativa	Densidad máxima	1,68	t/m ³
	Densidad mínima	1,36	t/m ³
Gravedad específica de los sólidos (G_s)		2,73	-

5.2. Ensayos Triaxiales Convencionales

Se realizaron ensayos triaxiales convencionales en dos equipos, con el objetivo de determinar el desempeño del equipo automatizado GDS Instruments, en comparación al equipo Humboldt. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

5.2.1. Ensayos Triaxiales CID

La Fig. 5.2 muestra los resultados obtenidos de triaxiales CID, a tres confinamientos distintos, con la probeta confeccionada a densidad relativa del 40 %, para evaluar el comportamiento drenado del material, en un estado inicial suelto.

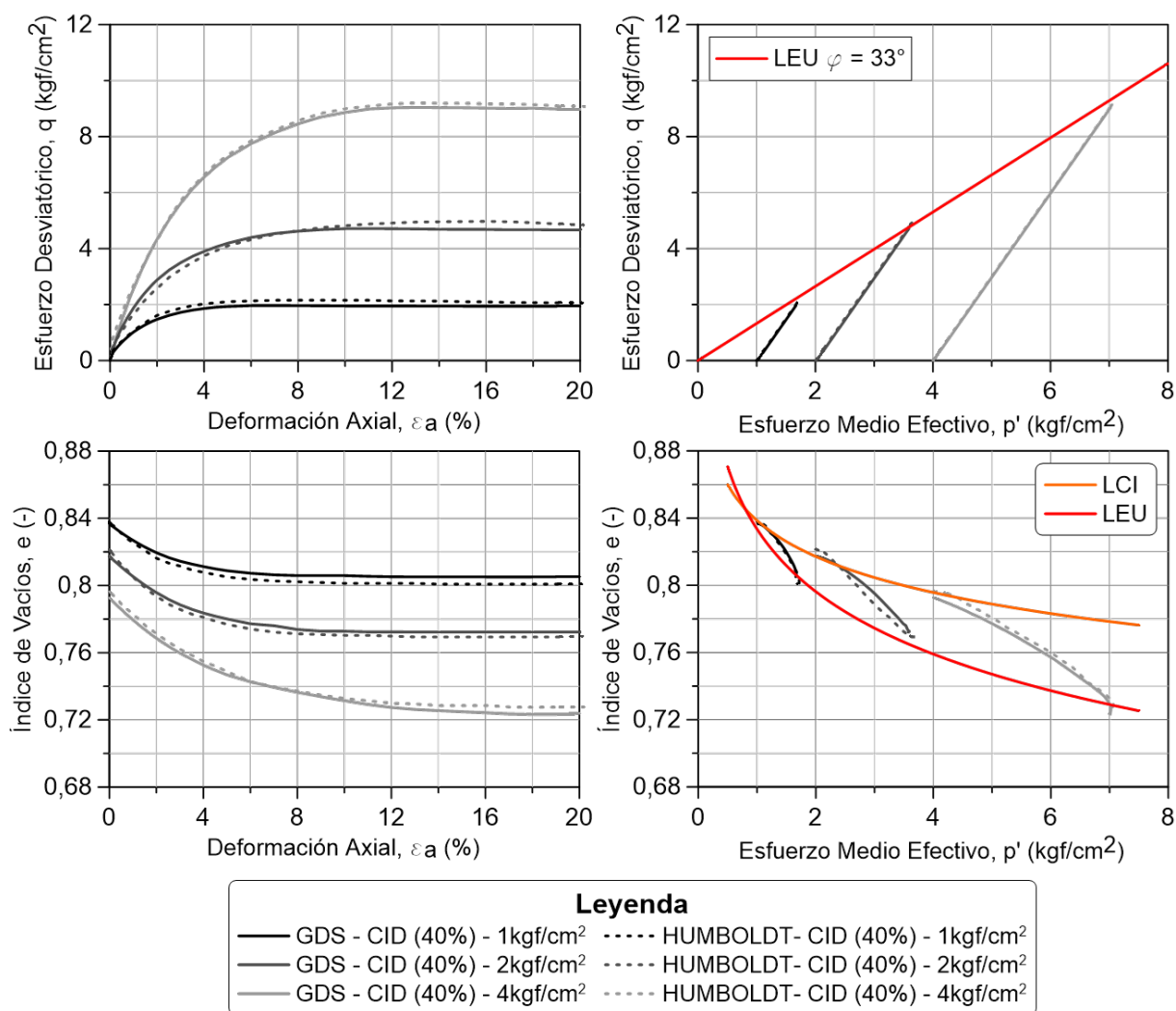


Figura 5.2: Resultados de ensayos triaxial CID con muestra a DR=40 %.

La Fig. 5.3 resume los resultados de triaxiales CID, de una muestra confeccionada a densidad relativa del 60 %, con el objetivo de determinar el comportamiento drenado del material, en un estado inicial más denso.

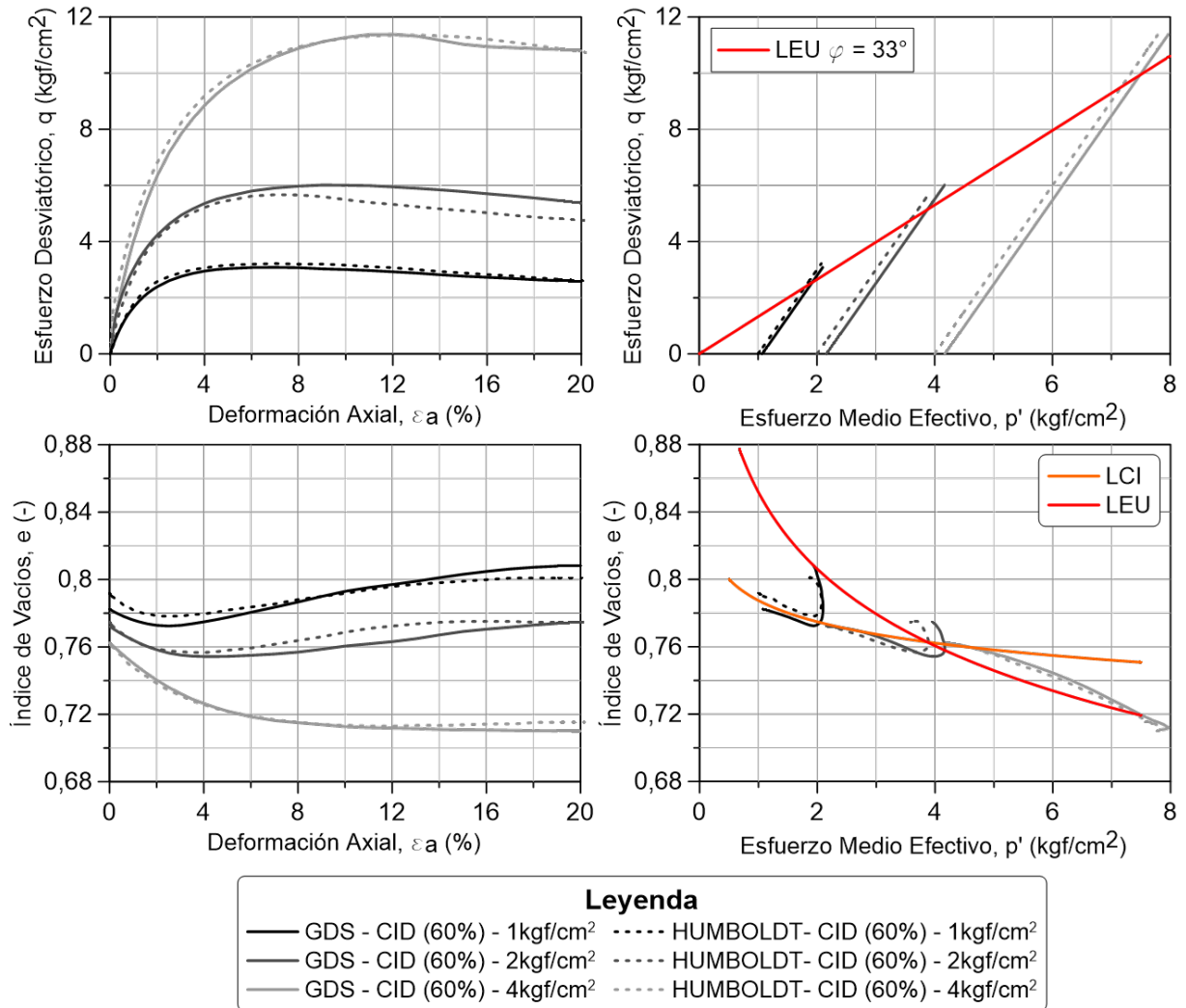


Figura 5.3: Resultados de ensayos triaxial CID con muestra a DR=60 %.

5.2.2. Ensayos Triaxiales CIU

La Fig. 5.4 presenta los resultados obtenidos de triaxiales estáticos CIU, para estudiar la resistencia no drenada del material, con una muestra de suelo confeccionada a densidad relativa del 40% y determinar el comportamiento en estado inicial suelo.

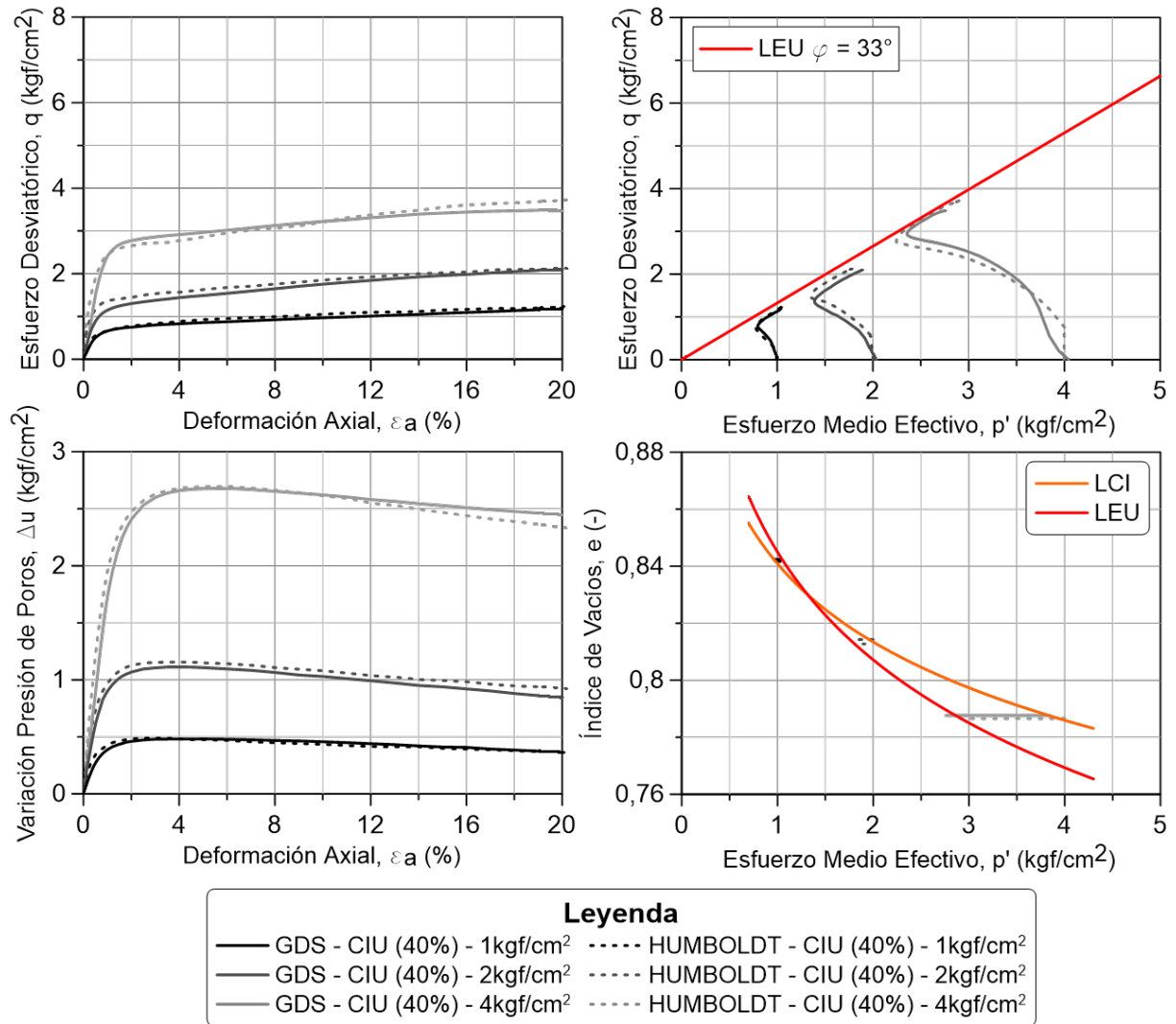


Figura 5.4: Resultados de ensayos triaxial CIU con muestra a DR=40%.

La Fig. 5.5 muestra los resultados obtenidos de triaxiales CIU, a partir de una probeta confeccionada a densidad relativa del 60 %, para estudiar la resistencia no drenada y el comportamiento del material, en un estado inicial más denso que el caso anterior.

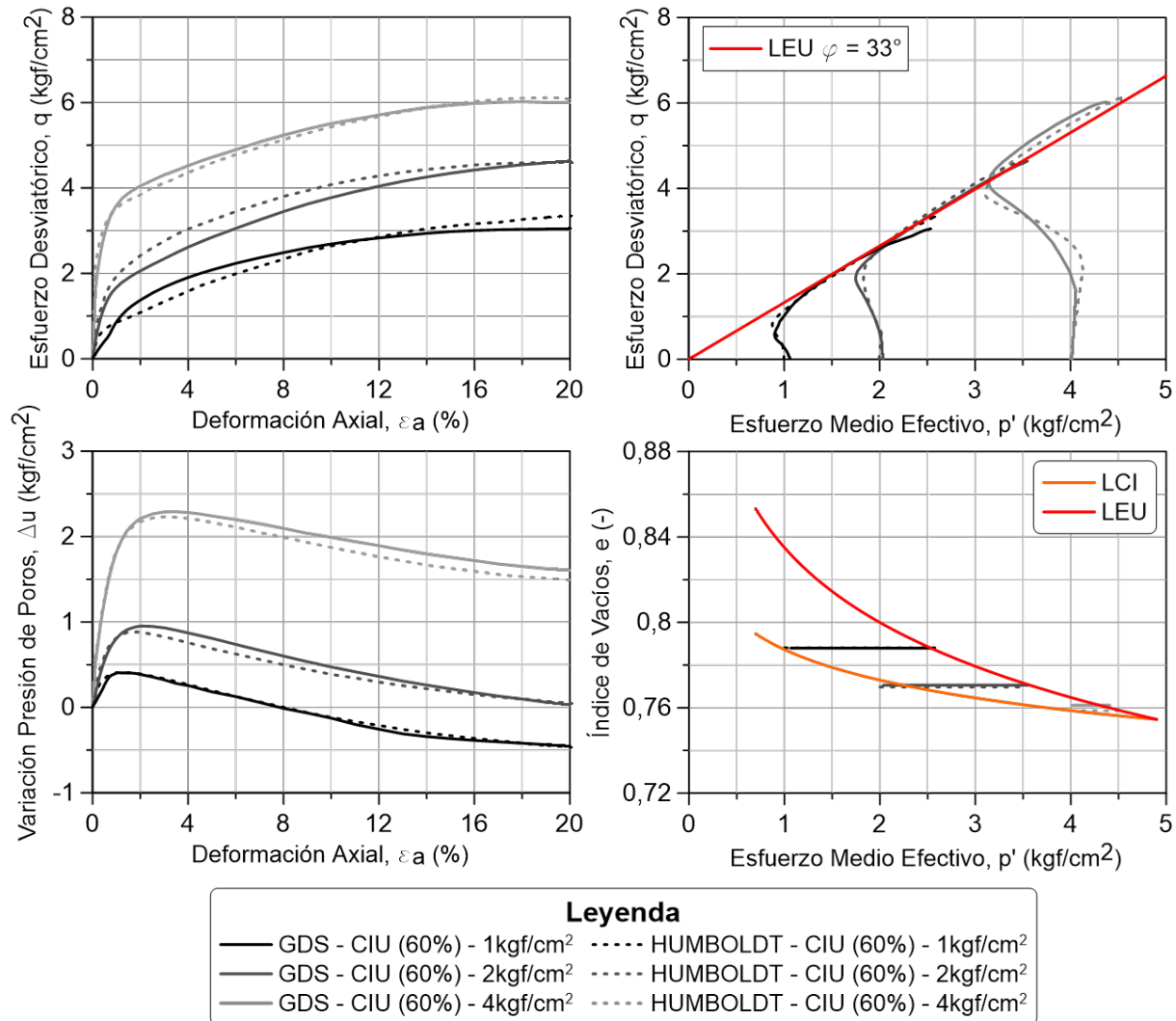


Figura 5.5: Resultados de ensayos triaxial CIU con muestra a DR=60 %.

5.2.3. Resistencia Mecánica del Suelo Saturado

La Fig. 5.6 presenta la línea de estado último, obtenida a partir de la totalidad de los ensayos triaxiales convencionales realizados. Con la pendiente M , definida por la Ec. 5.1, se determina el ángulo de fricción interna del material. Los parámetros de resistencia en condición saturada del suelo, se resumen en la Tabla 5.2.

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi}{3 - \sin \phi} \tag{5.1}$$

Tabla 5.2: Parámetros de resistencia del material en condición saturada.

Parámetro de Resistencia	Valor	Unidad
Ángulo de fricción interna	33	°
Cohesión	0	kgf/cm ²

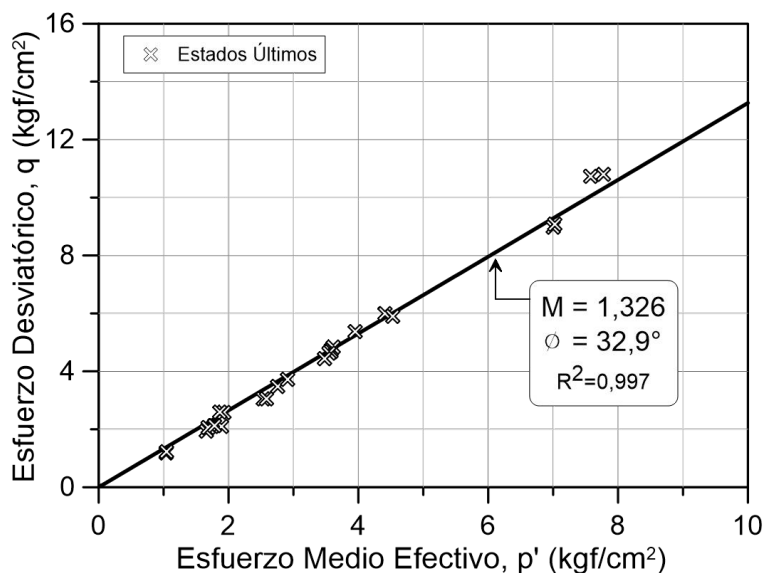


Figura 5.6: Parámetros de resistencia saturados.

Tabla 5.3: Valores típicos de ángulo de fricción interno para relaves, Blight (2013)

Material		ϕ' [°]
Cobre	Arenas	33 - 37
	Lamas	33 - 37
Taconita	Arenas	34,5 - 36,5
	Lamas	33,5 - 35
Plomo	Arenas	33,5 - 35
	Lamas	30 - 36
Oro	Lamas	28 - 40,5
Desecho fino de carbón		22 - 39
Bauxita	Lamas	42
Relave de yeso		32

La Fig. 5.7 resume, en un diagrama $e - p'$, las líneas de consolidación isotrópica, tanto para la muestra de suelo confeccionada a una densidad relativa del 40%, como también la fabricada a densidad relativa del 60%. Además, se muestra la línea de estado último, definida a partir de los índices de vacíos que alcanza la muestra al 20% de deformación.

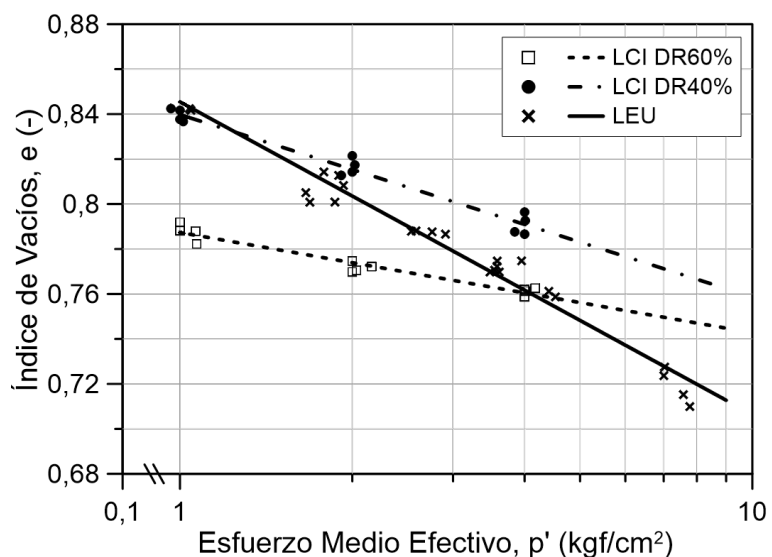


Figura 5.7: Caracterización del material en el espacio p - q .

5.3. Curva de Succión - SWCC

5.3.1. Resultados Experimentales

La Tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos experimentalmente, a partir de un ensayo en el equipo triaxial GDS Instruments modificado, y que permiten establecer la curva característica del suelo. La probeta utilizada fue confeccionada a una densidad relativa del 60% y el confinamiento efectivo aplicado durante el ensayo corresponde a 1 kgf/cm^2 . El proceso completo tuvo una duración aproximada de 8 días.

Tabla 5.4: Resultados experimentales de la curva característica suelo-agua.

Succión Matricial [kPa]	Grado de Saturación [%]	Contenido de Humedad [%]
0,0	100,0	28,75
1,0	90,0	25,88
2,0	19,0	5,46
3,0	13,0	3,74
3,5	7,5	2,16
5,0	3,0	0,86
6,0	2,8	0,81
8,5	2,7	0,78
11,0	2,7	0,78
17,0	3,0	0,86
22,0	3,3	0,95

5.3.2. Ajuste de Datos Experimentales

Se realizó un primer ajuste de los datos experimentales, utilizando la Ec. 2.22 propuesta por Fredlund y Xing (1994), que permite caracterizar el grado de saturación del material para cualquier valor de succión matricial. Además, el parámetro de ajuste n_f que representa la tasa de desaturación, es utilizado en el modelo que permite estimar la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado propuesto por Goh et al. (2010), cuyos resultados se presentan en la Fig. 5.16.

Tabla 5.5: Parámetros para ajustar la curva SWCC según Fredlund y Xing (1994).

Parámetro de Ajuste	Valor	Unidad
Succión matricial residual	0,05	kgf/cm ²
Humedad de saturación	28,75	%
Valor de entrada de aire (a_f)	1,23	-
Tasa de desaturación (n_f)	7,34	-
Contenido de agua residual (m_f)	1,24	-

Se realizó un segundo ajuste, según la Ec. 2.24 propuesta por Pereira y Fredlund (2000), con el objetivo de comparar resultados.

Tabla 5.6: Parámetros para ajustar la curva SWCC según Pereira y Fredlund (2000).

Parámetro de Ajuste	Valor	Unidad
Humedad residual	0,8	%
Humedad de saturación	28,75	%
Valor de entrada de aire (a_p)	0,95	-
Tasa de desaturación (n_p)	58,98	-
Contenido de agua residual (m_p)	0,04	-

5.3.3. Estimación Teórica de SWCC

Se implementó una estimación teórica de la curva característica suelo-agua, basada en el modelo propuesto por Fredlund et al. (2002), descrito en la Sección 2.2.5; cuyo parámetro de entrada corresponde a la curva granulométrica completa que describe al material.

La Fig. 5.8(a) muestra el ajuste de la distribución granulométrica obtenida a partir de antecedentes de laboratorio, según la Ec. 2.9; y la discretización utilizada para establecer partículas de tamaño único. La Tabla 5.7 indica los parámetros del ajuste, que definen la curva granulométrica de la arena de relave.

En cuanto a la Fig. 5.8(b), presenta las diferentes curvas de succión obtenidas para un esqueleto granular considerando partículas monotamaño, de acuerdo con la discretización mencionada en el párrafo anterior.

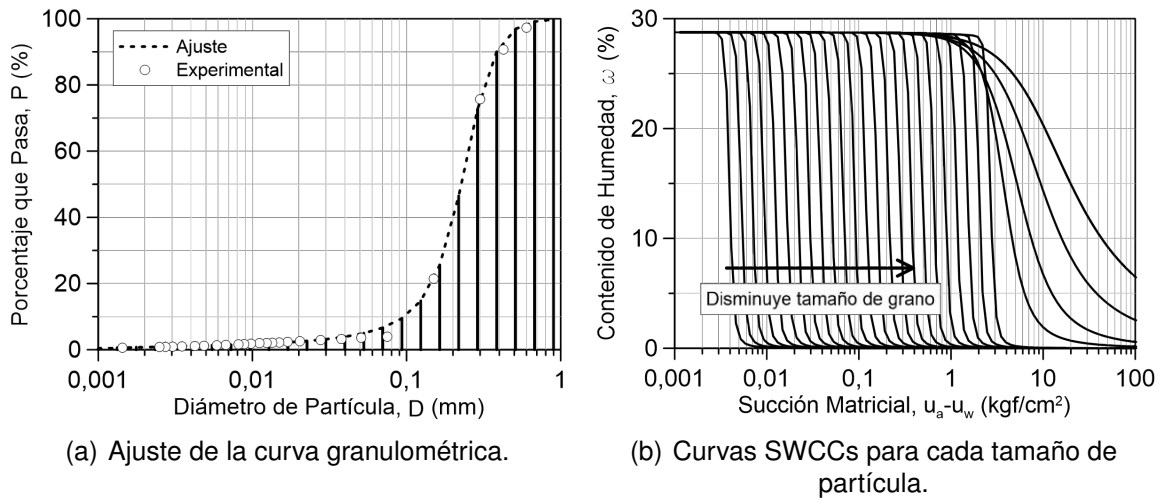


Figura 5.8: Implementación del modelo propuesto por Fredlund et al. (2002).

Tabla 5.7: Parámetros para ajustar la curva granulométrica.

Parámetro de Ajuste	Valor
Quiebre inicial (a_{gr})	0,269
Pendiente máxima (n_{gr})	4,466
Curvatura (m_{gr})	1,512
Diámetro residual de partícula (d_r)	0,111
Diámetro mínimo de partícula (d_m)	0,001

El modelo teórico para estimar la curva característica suelo-agua, considera un valor de valor de entrada de aire obtenido a partir del modelo de capilaridad, descrito en la Sección 2.2.2.

La Fig. 5.9 muestra como cambia la curva de succión, otorgando distintos valores del ángulo de contacto α , en la Ec. 2.12 que define el modelo de capilaridad.

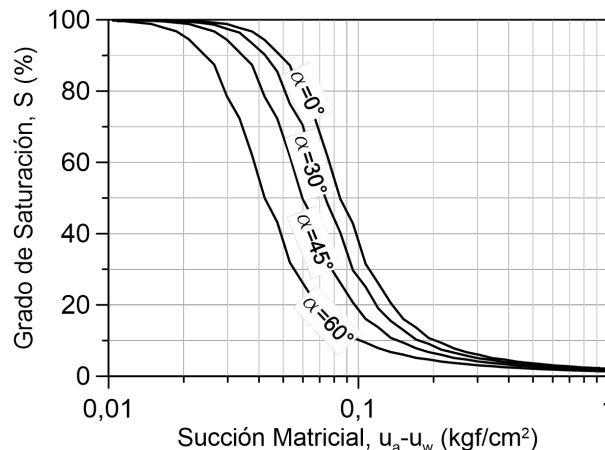


Figura 5.9: Variación en la curva de succión según el parámetro α .

Finalmente, la Fig. 5.10 presenta la curva característica suelo-agua obtenida experimentalmente, utilizando un modelo predictivo y por medio de los ajustes propuesto por Fredlund y Xing (1994) y por Pereira y Fredlund (2000). El ángulo de contacto α requerido por el modelo, tuvo que ser calibrado según los resultados experimentales, decretando que el valor representativo equivale a 80° .

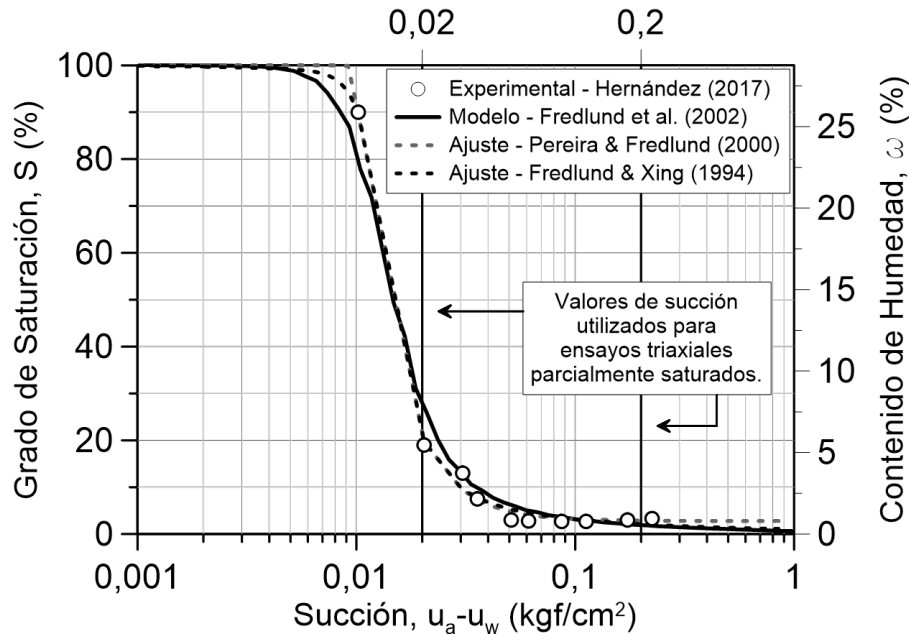


Figura 5.10: Curva de succión obtenida para la arena de relave utilizada.

5.4. Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados

La Fig. 5.11 muestra los resultados de los ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente y en respuesta drenada, para muestras en condición parcialmente saturada. Las probetas fueron confeccionadas a una densidad relativa del 60 %, sometidas a tres niveles de confinamiento efectivo y desaturadas hasta lograr dos valores de succión matricial, correspondiente a 0,02 y 0,20 kgf/cm². Este último parámetro se mantiene constante durante la etapa de corte. Además, se presenta el ensayo equivalente, pero en condición saturada, en consecuencia la succión durante las distintas etapas del ensayo triaxial es nula.

La teoría de suelos parcialmente saturados, indica que el ángulo de fricción interna ϕ' que describe a un material, se mantiene constante, independiente de la succión matricial presente en el esqueleto granular. El efecto en la resistencia al corte que genera la succión, se aprecia como un incremento de la cohesión. Esta condición no se aprecia en los ensayos realizados en el presente trabajo, debido a que la muestra presenta un índice de vacíos post-consolidación distinto según el confinamiento isotrópico aplicado, y la succión matricial afecta de distinta manera según el grado de empaquetamiento de las partículas.

En el diagrama $p' - q$ de la Fig. 5.11, se observan las líneas de estado último que caracterizan la arena de relave para distintas condiciones de saturación, obtenidas utilizando la teoría de suelos saturados.

La Tabla 5.8 resume los parámetros resistentes de la arena de relave, para los distintos valores de succión matricial aplicados.

Tabla 5.8: Parámetros de resistencia de la arena de relave según succión matricial.

$u_a - u_w$ [kgf/cm ²]	ϕ' [°]
0,00	34,1
0,02	35,4
0,20	35,8

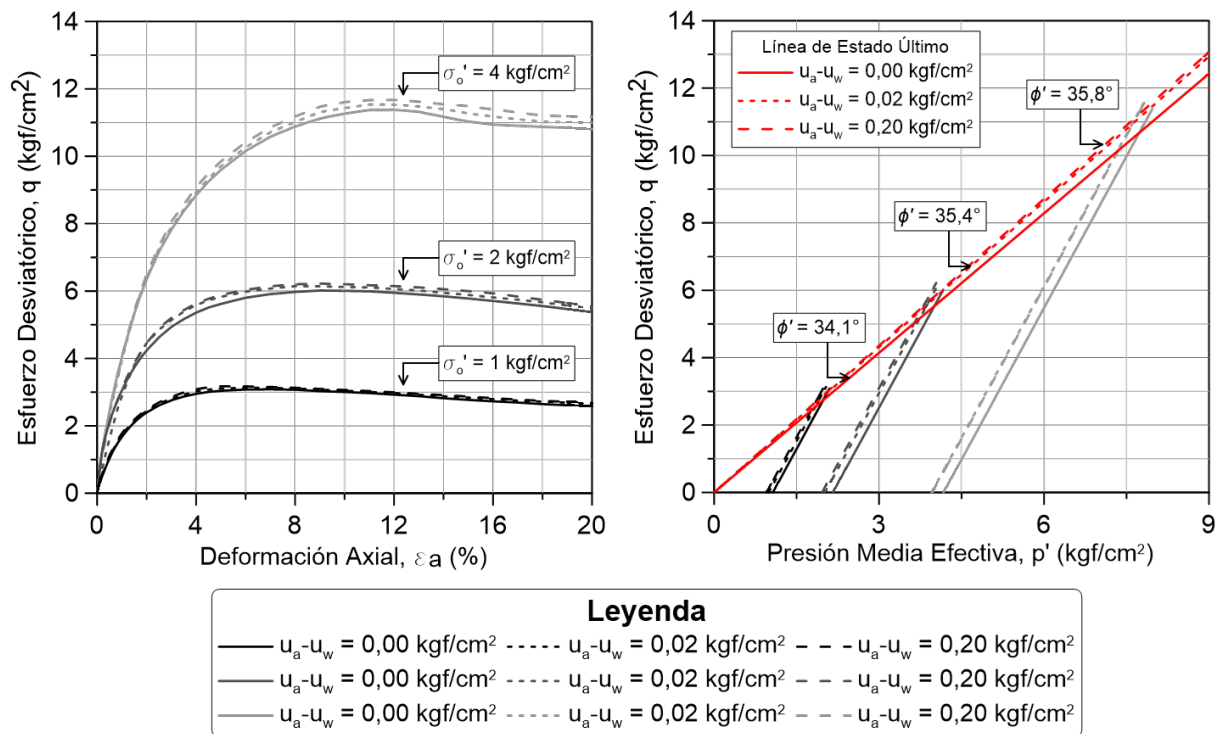


Figura 5.11: Resultados de ensayos triaxiales drenado saturados y parcialmente saturados.

En las Figs. 5.12, 5.13 y 5.14 se presentan los resultados de los ensayos triaxiales de muestras con distinto nivel de succión matricial, separados según el confinamiento efectivo aplicado.

En los diagramas $p' - q$ se esquematizan una línea de estado último para cada valor de succión matricial; las cuales fueron determinadas considerando una característica que señala la teoría de resistencia al corte para suelos parcialmente saturados, que corresponde a la conservación del ángulo de fricción interna del material en condición saturada.

El ángulo de fricción interna del material saturado, se obtuvo con los tres ensayos triaxiales del tipo CID, ejecutados a la muestra confeccionada a 60 % de densidad relativa, que arrojan un valor de 34.1° .

Considerando el ángulo de fricción interna presentado en el párrafo anterior, se puede determinar la cohesión aparente que genera la succión matricial para los distintos confinamientos isotrópicos. No se determina el ángulo ϕ^b que representa la tasa de crecimiento de la cohesión aparente con respecto a la succión matricial, ya que como se indica en la Sección 2.2.11, este parámetro varía cuando la succión presente en el material excede el valor de entrada de aire.

La Tabla 5.9 recopila los resultados de la cohesión aparente generada según confinamiento y succión matricial, que se traducen en un aumento de resistencia al corte por parte del material.

Tabla 5.9: Parámetros de resistencia parcialmente saturados según confinamiento.

σ'_0 [kgf/cm ²]	$u_a - u_w$ [kgf/cm ²]	C_{ap} [kgf/cm ²]
1,0	0,02	0,029
	0,20	0,065
2,0	0,02	0,085
	0,20	0,135
4,0	0,02	0,231
	0,20	0,269

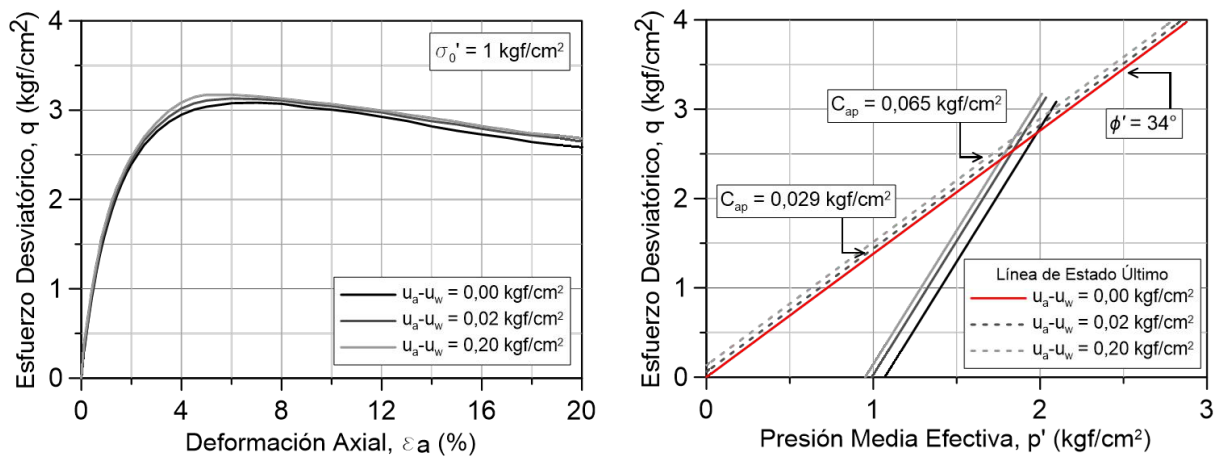


Figura 5.12: Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 1 kgf/cm^2 .

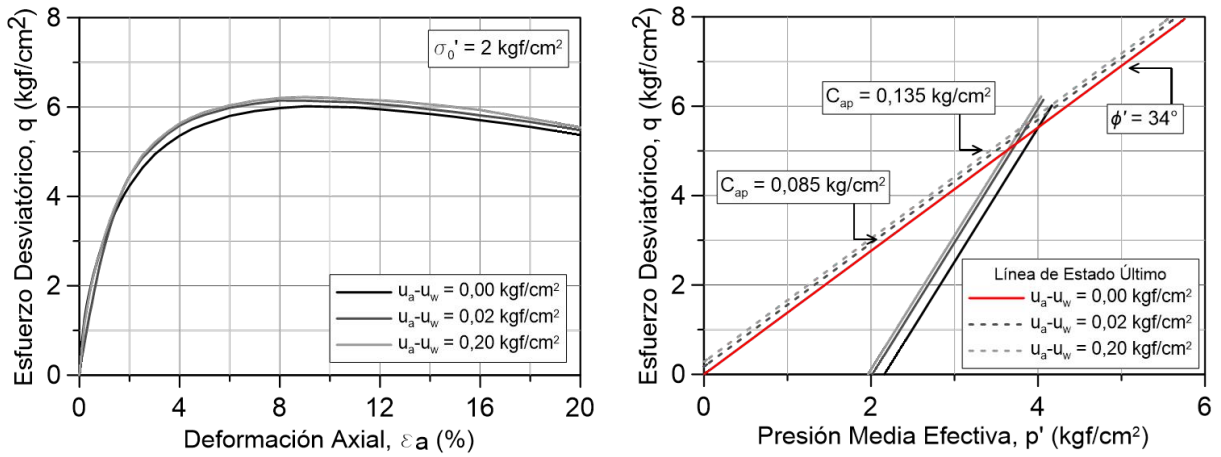


Figura 5.13: Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 2 kgf/cm².

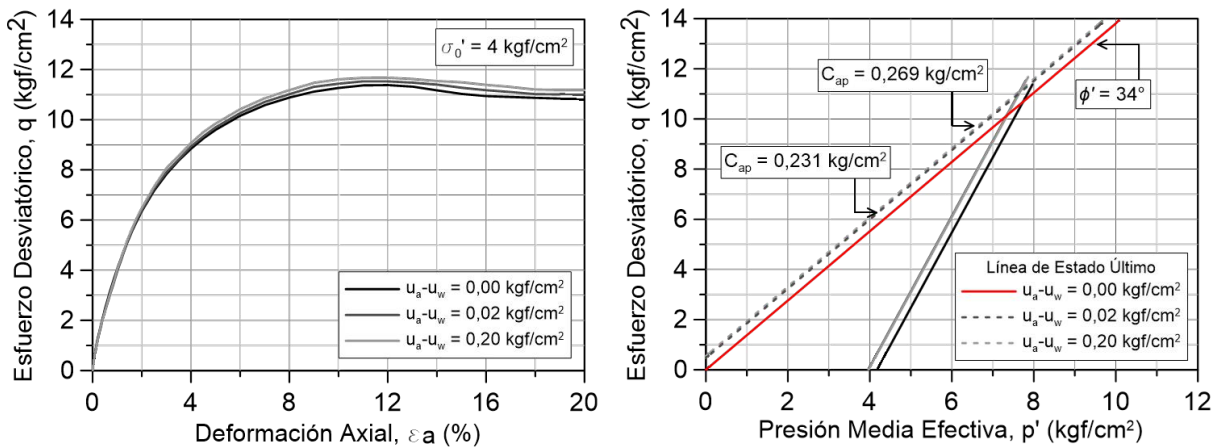


Figura 5.14: Parámetros de resistencia de la arena parcialmente saturada para confinamiento de 4 kgf/cm².

La Fig. 5.15 muestra a relación que existe entre el incremento de cohesión aparente con la succión matricial en el suelo, para los tres confinamientos analizados en el presenta trabajo. Queda en evidencia la no linealidad de la envolvente de falla para suelos parcialmente saturados, que se menciona en la Sección 2.2.11, y que demuestra que cuando el material se encuentra en condiciones residuales de saturación, el incremento de resistencia al corte decae, o bien, se estabiliza en un valor constante.

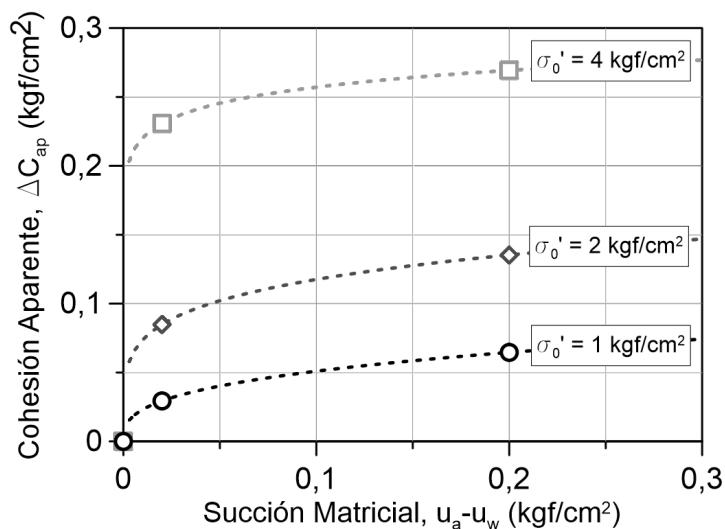


Figura 5.15: Variación de la cohesión aparente con respecto a la succión matricial.

La Fig. 5.16 presenta la estimación de la variación que existe en la cohesión aparente del material con el incremento de la succión matricial, dichas curvas fueron obtenidas por tres modelos teóricos que requieren como parámetro inicial, propiedades que determinan la curva característica suelo-agua del material, tal como se define en la Sección 2.2.11.

Los modelos presentados son característicos de una muestra confeccionada a 60% de densidad relativa y sometida a un confinamiento isotrópico de 1 kgf/cm². Debido a que para el presente trabajo, sólo se determinó la curva de succión para dichas condiciones. En la Fig. 5.16 se adjuntan además los resultados experimentales.

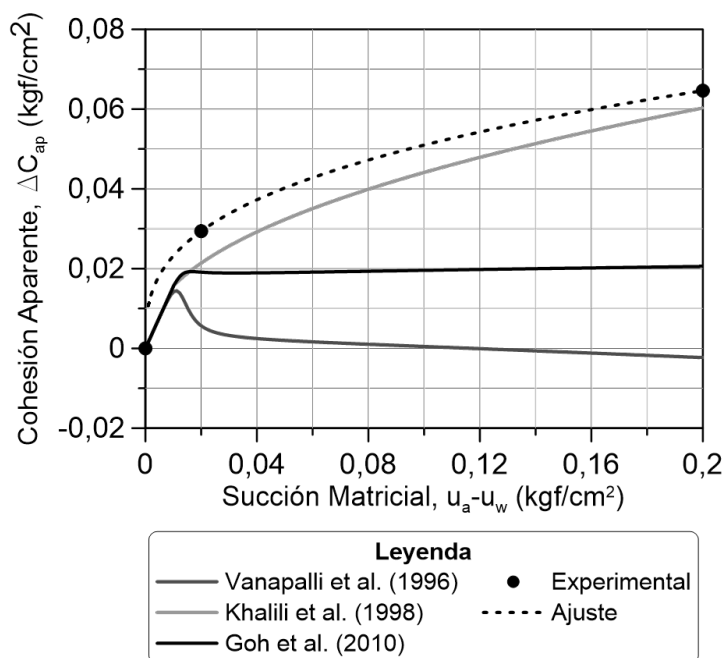


Figura 5.16: Comparación de modelos para estimar cohesión aparente con datos experimentales.

La Fig. 5.17 muestra como varía el índice de vacíos, para los distintos valores de succión matricial y confinamientos aplicados durante los ensayos triaxiales parcialmente saturados. Además, se presenta la modificación que existe en la línea de estado último en el diagrama $e - p'$, para cada succión matricial aplicada a la muestra de suelo.

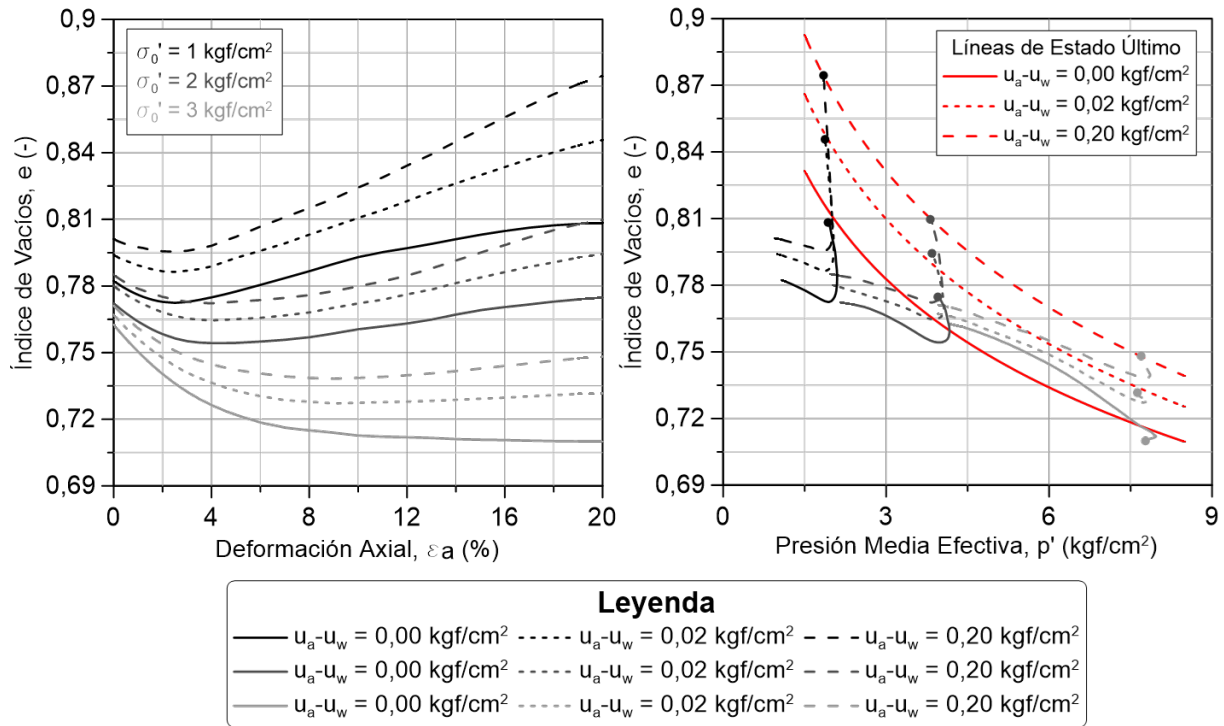


Figura 5.17: Variación del índice de vacíos para los distintos ensayos triaxiales parcialmente saturados.

6. Discusión y Análisis de Resultados

6.1. Ensayos Triaxiales Saturados

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos triaxiales convencionales del tipo CID, presentados en la Fig. 5.2 y 5.3, indican que la probeta confeccionada al 40 % de densidad relativa, alcanza un estado último mediante una tendencia contractiva, para los tres confinamientos analizados; comportamiento atribuible al bajo grado de empaquetamiento de la muestra utilizada. En lo que respecta a la probeta armada a un densidad relativa del 60 %, exhibe un comportamiento dilatante en los dos confinamientos menores, correspondientes a 1 y 2 kgf/cm²; a diferencia de la muestra ensayada a un confinamiento de 4 kgf/cm², cuya tendencia es contractiva. En el diagrama $e - p'$, se observa que la variación del índice de vacíos durante la etapa de corte para este ensayo en particular, se desarrolla por sobre la línea de estado último.

De la Fig. 5.4 se establece que la resistencia no drenada de la muestra remoldeada a una densidad relativa del 40 %, obtenida a partir de ensayos triaxiales convencionales, esta dada por una tendencia dilatante para el menor de los confinamientos aplicados. Los otros ensayos presentan un comportamiento contractivo, según el diagrama $e - p'$. Sin embargo, en el gráfico $q - \varepsilon_a$ no se configura un peak de resistencia, que caracteriza a una tendencia contractiva en respuesta no drenada. Dicho fenómeno es consecuencia del uso de pistón de carga dirigido, que permite movilizar mayor resistencia del esqueleto granular y evitar una localización temprana de la banda de corte. La Fig. 5.5 presenta los resultados de ensayos triaxiales del tipo CIU, que consideran una probeta confeccionada a una densidad relativa del 60 %. La resistencia se desarrolla mediante una tendencia dilatante, que se aprecia en la totalidad de los gráficos.

La Fig. 5.6 sintetiza los estados últimos alcanzados por el material en la totalidad de los ensayos triaxiales convencionales, y permite definir los parámetros de resistencia en condición saturada de la arena de relaves. Se obtiene un ángulo de fricción interna de 33° y una cohesión nula. Dichos valores son consistentes con los determinados en investigaciones anteriores que utilizaron material semejante. Santos (2011) caracteriza relave integral extraído del mismo depósito que la arena utilizada, con un ángulo de fricción interna de 34°. Por otra parte, Osorio (2009) establece que el material presenta un ángulo de fricción interna de 33°. Conejera (2016) determina un ángulo de fricción interna de 32°, para muestras de relave integral confeccionadas por apisonamiento húmedo. En la Tabla 5.3, se observa que el valor obtenido, se encuentra dentro de los rangos establecidos en la literatura.

Como se señala en el programa experimental, detallado en la Sección 4.1, los ensayos triaxiales convencionales fueron realizados en dos equipos disponibles en el Laboratorio de Sólidos de la Universidad de Chile. La comparación de los resultados obtenidos en ambos instrumentos, permite establecer que el equipo triaxial GDS Instruments, se encuentra correctamente calibrado y apto para desarrollar el principal tema de investigación de presente trabajo de título.

El gráfico presentado en la Fig. 5.7, contiene las curvas de consolidación isotrópica obtenidas para las dos densidades de confección, evaluadas en los ensayos triaxiales convencionales. Se aprecia variación en la compresibilidad de la arena de relaves, según el grado de empaquetamiento definido para la confección de la muestra. La probeta confeccionada en un estado más suelto, correspondiente a una densidad relativa de 40 %, presenta una mayor compresibilidad que la muestra confeccionada a 60 % de densidad relativa. La ocurrencia de este fenómeno es correcto y ha sido ampliamente analizado en la literatura, como por ejemplo la investigación desarrollada por Maureira (2012).

6.2. Curvas Características Suelo Agua

A partir de la Fig. 5.9, se puede observar como varía la curva característica suelo-agua, según el ángulo de contacto α que determina el valor de entrada de aire del material, en el modelo teórico para estimar la curva SWCC propuesto por Fredlund et al. (2002). Dicho parámetro se puede relacionar con la mojabilidad de los granos de suelo por parte del agua. La finos presentes en la arena de relaves analizada, califican como no plásticos, en consecuencia, presentan una baja afinidad con el agua, lo que se representa con el alto valor del ángulo de contacto α definido para calibrar el modelo.

El conjunto de curvas presentado en la Fig. 5.10, representa la curva característica suelo-agua descrita por la arena de relaves. La curva está caracterizada por un valor de entrada de aire cuyo valor es cercano a 1 kPa. Y luego del periodo de transición, alcanza una humedad residual del 0,8 % a una succión matricial aproximada de 0,05 kgf/cm². Los niveles de succión matricial que presenta el material durante una condición parcialmente saturada, son considerablemente bajos, pero se encuentran en el rango de valores que describe un suelo arenoso con bajo contenido de finos no plásticos.

Se puede observar que el procedimiento teórico para estimar la curva característica suelo-agua, correspondiente al modelo propuesto por Fredlund et al. (2002), permite conocer correctamente la curva que describe al material, sin embargo, necesita ser calibrado con el valor de entrada de aire del suelo. Las ecuaciones que permiten ajustar los datos de laboratorio, propuestas por Fredlund y Xing (1994) y por Pereira y Fredlund (2000), que se han aplicado en el presente trabajo, cumplen de buena manera su cometido, siendo la primera de ellas la que mejor representa el comportamiento que exhibe la saturación del material, con respecto a la succión matricial.

6.3. Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados

Las líneas de estado último que se observan en la Fig. 5.11, muestran que al considerar un cambio en el ángulo de fricción interna, el aumento de la succión matricial en el suelo genera un crecimiento de dicho ángulo. Al aplicar una succión de $0,02 \text{ kgf/cm}^2$, el ángulo de fricción interna aumenta de $34,1^\circ$, determinado en condición saturado, a un valor de $35,4^\circ$. Mientras que al generar una succión matricial de $0,20 \text{ kgf/cm}^2$, el ángulo aumenta de $34,1^\circ$ a $35,8^\circ$. Comparando las dos condiciones parcialmente saturadas que se analizaron en este trabajo, se puede determinar que a pesar de aumentar en un orden de magnitud la succión matricial, el ángulo de fricción interna exhibe un leve aumento de $0,4^\circ$, lo que indica que el material al alcanzar una condición residual de saturación, no presenta un mayor cambio en el aumento de la resistencia.

La teoría establece que la condición de saturación parcial de un suelo, no provoca cambios en el ángulo de fricción interna. Mas bien, se genera una cohesión aparente que desplaza la línea de estado último, en forma paralela a la determinada en condición saturada del suelo. Para observar este efecto, se debe aplicar el esfuerzo desviatorio del ensayo triaxial, a muestras que alcancen un índice de vacíos equivalente, luego de la consolidación isotrópica para los distintos confinamientos establecidos. De esta manera, la curva característica suelo-agua que determina el comportamiento del suelo parcialmente saturado, es la misma.

Los curvas tensión-deformación que se muestran en las Figs. 5.12, 5.13 y 5.14, indican que el comportamiento dilatante que presenta la arena de relaves en condición saturada, se replica para los ensayos triaxiales llevados a cabo en el suelo parcialmente saturado. Las líneas de estado último que se presentan, consideran un ángulo de fricción interna equivalente al obtenido al evaluar la condición saturada del material, cuyo valor es $34,1^\circ$. Como consecuencia, se puede determinar la cohesión aparente que genera el estado parcialmente saturado del suelo, para cada confinamiento y succión matricial aplicada.

Se puede establecer que el aumento de confinamiento, genera una mayor densificación de la arena producto de la consolidación isotrópica, por lo tanto, aumenta el valor de entrada de aire del suelo. Como consecuencia, se produce una mayor tasa de crecimiento en la cohesión aparente del material. La Fig. 5.15 muestra el fenómeno descrito y exhibe también, que una vez alcanzadas las condiciones residuales de saturación, el incremento en la cohesión tiene que estabilizarse en un valor constante, es necesario evaluar mayores valores de succión matricial para ver si la cohesión se mantiene o decae.

En cuanto a la Fig. 5.16, permite determinar que el modelo para estimar la resistencia al corte al partir de la curva característica suelo-agua, que se ajusta de mejor manera al suelo analizado en el presente trabajo, corresponde al propuesto por Khalili y Khabbaz (1998).

A partir de la Fig. 5.17 es posible observar que las muestras ensayadas a un mismo confinamiento isotrópico, presentan un valor diferente de índice de vacío post-consolidación, dicho factor es consecuencia de que al desaturar el material para generar la succión matricial establecida, el volumen de aire movilizado dentro de la muestra es mucho mayor que la disminución del volumen de agua, en la etapa de aplicación de presión de aire y presión de agua. Por otra parte, se puede apreciar que a medida que aumenta la succión matricial en los distintos ensayos disminuye la contractividad de las muestras y aumenta la dilatancia. En particular, la muestra ensayada a un confinamiento de 4 kgf/cm^2 , al estar saturada presenta un comportamiento contractivo durante toda la etapa de corte; mientras que en condiciones de saturación parcial el suelo exhibe un comportamiento dilatante.

Con respecto a las líneas de estado último que se presentan en la Fig. 5.17, se observa un desplazamiento vertical en las curvas a medida que aumenta la succión matricial, este fenómeno representa el aumento de cohesión que genera la saturación parcial de un material.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de título, permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Los ensayos triaxiales convencionales que se desarrollaron en el equipo triaxial GDS Instruments y en el instrumento análogo de marca Humboldt permitieron establecer que el primero de ellos, se encuentra calibrado y apto para evaluar el comportamiento geomecánico saturado de un suelo.
- El equipo triaxial GDS Instruments permite determinar la resistencia al corte de un material parcialmente saturado, en diversos escenarios (ver Tabla 2.4). En el presente trabajo sólo se desarrolló uno de la variedad que permite el equipo. Además, posibilita de forma correcta, la estimación experimental de la curva característica suelo-agua.
- Para ejecutar un ensayo parcialmente saturado, ya sea determinar la curva característica o realizar un ensayo triaxial, la etapa más crítica corresponde a la correcta saturación inicial de la muestra de suelo. Llevar a cabo correctamente este procedimiento permite controlar la succión matricial inicial, cuyo valor es nulo. Una segunda etapa crítica, referente sólo a un ensayo triaxial parcialmente saturado, corresponde a la aplicación del esfuerzo desviatorio, ya que dependiendo de la permeabilidad del disco poroso utilizado, se debe elegir una duración de la etapa de corte que permita una correcta disipación de las presiones de poro.
- El modelo teórico para estimar la curva característica suelo-agua propuesto por Fredlund et al. (2002), corresponde a una herramienta útil para estimar los rangos de succión matricial, que se generan al variar el grado de saturación del material; considerando que sólo requiere la distribución granulométrica completa. Sin embargo, para obtener una curva SWCC de mayor precisión, el modelo debe ser calibrado con el valor de entrada de aire representativo del suelo.
- La curva de succión determinada experimentalmente, comprende valores de succión matricial bajos, presentando un valor de entrada de aire de $0,01 \text{ kgf/cm}^2$ y una succión residual cercana a $0,05 \text{ kgf/cm}^2$, acorde a lo establecido en la literatura para un suelo arenoso. Dado que la precisión de los componentes del equipo triaxial que controlan las presiones aplicadas en los vacíos, tanto de agua como de aire, es de $0,01 \text{ kgf/cm}^2$, el procedimiento experimental para ensayos con bajos valores de succión matricial, resulta engorroso producto de la variabilidad en la adquisición de datos.

- Admitiendo una variación en el ángulo de fricción interna, obtenido para cada nivel de succión matricial generada en las muestras de suelo, se observa un aumento de $34,1^\circ$ a un máximo de $35,8^\circ$. Este factor puede resultar favorable en los distintos proyectos que involucren la arena de relaves parcialmente saturada. En particular, se mejora la estabilidad de los taludes que componen el muro del tranque de relaves.
- Manteniendo constante el ángulo de fricción interna y considerando el efecto de la densificación producto de la consolidación isotrópica en la determinación de los parámetros resistentes parcialmente saturados; la cohesión aparente generada en el esqueleto granular, aumenta proporcionalmente al confinamiento efectivo aplicado durante el ensayo triaxial. Esto se debe principalmente a la variación que existe en la curva característica suelo-agua, que depende del grado de empaquetamiento de las partículas, y que define el comportamiento de los suelos parcialmente saturados.
- La resistencia última alcanzada por un material saturado, en condición drenada, está determinado por el confinamiento efectivo al que está sometido, independiente del índice de vacíos que configure el esqueleto granular. En cambio, la resistencia última que alcanza un suelo en condición parcialmente saturada, con respuesta drenada, queda definida por el confinamiento efectivo y por el índice de vacíos post-consolidación de la muestra.
- En el presente trabajo de investigación, el índice de vacíos post-consolidación de las muestras considerando distintos confinamientos isotrópicos efectivos y utilizando un mismo valor de succión matricial, toma valores distintos según la magnitud del confinamiento. Por lo tanto, no es posible observar el efecto en la línea de estado último correspondiente a un aumento en la cohesión aparente, manteniendo constante el valor del ángulo de fricción interna que se obtiene de ensayos triaxiales saturados.
- La succión matricial contribuye al esfuerzo efectivo de un suelo parcialmente saturado principalmente cuando es menor al valor de entrada de aire (Fredlund et al., 2012). Por lo tanto, en aquellos materiales que presentan un alto valor de dicho parámetro, es de real importancia considerar el efecto de la saturación parcial en la resistencia al corte, debido a que los beneficios pueden ser considerables al momento de diseñar.

7.2. Recomendaciones

A continuación se presentan recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones:

- Determinar el efecto del confinamiento efectivo en el desarrollo de curvas características suelo-agua y analizar como varía el valor de entrada de aire del suelo producto de la consolidación isotrópica. En particular, para el presente trabajo sólo se determinó una curva de succión, por lo tanto, no fue posible observar como variaba el valor de entrada de aire para los otros confinamientos utilizados en los ensayos triaxiales parcialmente saturados.

- Evaluar el efecto de la fábrica de la muestra, en el desarrollo de la curva característica suelo-agua. En este trabajo sólo se ensayaron muestras preparadas con apisonamiento húmedo. Sin embargo, Fredlund et al. (2012) indica que la curva de succión depende del método utilizado para elaborar la muestra y también de la historia de tensiones.
- Estudiar la variación de la curva característica suelo-agua de distintos suelos, por el método de secado y humedecimiento. Ya que el equipo presente en el laboratorio de sólidos, permite desarrollar los ciclos de histéresis llevados a cabo por Pham (2002) en su respectiva investigación.
- Analizar el comportamiento parcialmente saturado de un material con mayor contenido de finos, que comprenda la determinación de la curva característica suelo-agua y la ejecución de distintos ensayos triaxiales parcialmente saturados, es de esperarse que los valores de succión matricial alcanzados sean más altos que los obtenidos en el presente trabajo. En particular, se sugiere utilizar relave integral, cuyo contenido de finos es cercano al 60 %.
- Determinar la resistencia al corte de un material parcialmente saturado, a través de los distintos ensayos triaxiales que proporciona el equipo GDS Instruments, destacando principalmente el ensayo consolidado drenado (CD), el ensayo consolidado y cargado a contenido de agua constante (CW) y el ensayo consolidado no drenado (CU).
- Evaluar el efecto de la velocidad de aplicación del esfuerzo desviatorio durante un ensayo triaxial parcialmente saturado. Ya que considerando la baja permeabilidad del disco poroso que conforma el pedestal de la cámara triaxial, es probable que el drenaje de la fase agua, no sea el correcto y se esté evaluando una resistencia que en parte es no drenada. En el presente trabajo se utilizó una velocidad de 0,0056 mm/min, con la cuál se obtiene el 20 % de deformación axial de una muestra de 10 cm de altura en 2 días y 12 hrs. Se recomienda disminuir dicha velocidad, según lo analizado por Rahardjo et al. (2004).
- Generar un procedimiento de confección de la probeta, que disminuya los tiempos de saturación a través del disco poroso (HAEPD). En particular, durante el presente trabajo se utilizó arena con un alto contenido de humedad en la elaboración de la muestra, correspondiente al valor máximo de 18%, que permitió una correcta manipulación durante el proceso de montaje de la probeta.
- Evaluar la resistencia al corte en muestras de alta densidad para disminuir la consolidación producto del confinamiento isotrópico. De este modo, se espera que las probetas presenten un valor de entrada de aire similar que permita observar el efecto de la saturación parcial en la línea de estado último, correspondiente al aumento de cohesión aparente con un ángulo de fricción interna equivalente al obtenido de ensayos triaxiales saturados.
- Proponer una ecuación que permita estimar la resistencia al corte en función de la succión matricial, tal como las que se presentan en la Sección 2.2.11, que sea específicamente determinada a partir de propiedades características de los relaves.

- Considerar la compra de un disco poroso con capacidad máxima de succión de 1/2 bar de alto flujo, tal como se define en la Tabla 2.3, para acelerar las etapas de saturación y aplicación de esfuerzo desviatórico, en ensayos triaxiales parcialmente saturados en suelos con bajos niveles de succión matricial como arenas.

8. Bibliografía

- Aitchison, G. D., Russam, K., y Richards, B. G. (1966). *Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils*. Statement of the Review Panel, In *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*.
- Alonso, E. y Gens, A. (2010). *Unsaturated Soils*. CRC Press/Balkema.
- Barrera, S., Valenzuela, L., y Campaña, J. (2011). *Sand Tailings Dams: Design, Construction and Operation*. Proceedings Tailings and Mine Waste.
- Bishop, A. y Blight, G. (1963). *Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Unsaturated Soils*. Geotechnique, Vol. 13.
- Blight, G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. Taylor & Francis Group.
- Blight, G. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. Taylor & Francis Group.
- Coleman, J. (1962). *Stress/Strain Relations for Partly Saturated Soils*. Geotechnique, Vol. 12.
- Conejera, C. (2016). *Efecto de la Fábrica y la Estructura en la Resistencia No Drenada de Relave Integral*. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Das, B. M. y Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. Global Engineering.
- Donald, I. B. (1956). *Shear Strength Measurements in Unsaturated Non-Cohesive Soils with Negative Pore Pressures*. Proceedings of the Second Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Drumright, E. E. y Nelson, J. D. (1995). *The Shear Strength of Unsaturated Tailings Sand*. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, Francia, Vol 1.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., y Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group, 2nd edition.
- Fredlund, D., Rahardjo, H., y Fredlund, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D. y Xing, A. (1994). *Equations for the Soil-Water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 31.
- Fredlund, D. G. (1973). *Volume Change Behaviour of Unsaturated Soils*. Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alberta, Edmonton.
- Fredlund, D. G. y Morgenstern, N. R. (1977). *Stress state variables for unsaturated soils*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103.

- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., y Widger, R. A. (1978). *The Shear Strength of Unsaturated Soils*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 15.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., y Barbour, S. L. (1996). *The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength of the Soil-Water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 32.
- Fredlund, M. (2005). *SoilVision - A Knowledge-Based Soils Database - Theory Manual*. SoilVision Systems Ltd.
- Fredlund, M., Wilson, G., y Fredlund, D. (1997). *Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size- Distribution and Volume-Mass Properties*. 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils.
- Fredlund, M., Wilson, G., y Fredlund, D. (2002). *Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 39.
- Gan, J. (1986). *Direct Shear Strength Testing of Unsaturated Soils*. M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Goh, S. G., Rahardjo, H., y Leong, E. C. (2010). *Shear Strength Equations for Unsaturated Soil Under Drying and Wetting*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136.
- Khalili, N. y Khabbaz, M. (1998). *A Unique Relationship for χ for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils*. Geotechnique, Vol. 48.
- Lee, I. M., Sung, S. G., y Cho, G. C. (2005). *Effect of Stress State on the Unsaturated Shear Strength of Weathered Granite*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 42.
- Lu, N. y Likos, W. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Maureira, S. (2012). *Respuesta Cíclica de Arena de Relaves en un Amplio Rango de Presiones*. Tesis de Magíster Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile.
- McKee, C. R. y Bumb, A. C. (1987). *Flow-Testing Coalbed Methane Production Wells in the Presence of Water and Gas*. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, Vol. 2.
- Nishimura, T. y Fredlund, D. G. (2002). *Hysteresis Effects Resulting from Drying and Wetting under Relatively Dry Conditions*. Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils.
- Osorio, B. (2009). *Resistencia Estática y Cíclica de Relaves Integrales*. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Pereira, J. H. y Fredlund, D. G. (2000). *Volume Change Behavior of Collapsible Compacted Gneiss Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126.

- Pham, H. Q. (2002). *An Engineering Model of Hysteresis for the Soil-Water Characteristic Curve*. Tesis de Magíster, Universidad de Saskatchewan, Saskatoon.
- Rahardjo, H., Boo Heng, O., y Eng Choon, L. (2004). *Shear Strength of a Compacted Residual Soil from Consolidated Drained and Constant Water Content Triaxial Tests*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 41.
- Ramírez, N. (2007). *Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves*. Investigación Externa, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Röhm, S. A. y Vilar, O. M. (1995). *Shear Strength of an Unsaturated Sandy Soil*. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, Francia, Vol 1.
- Santos, E. (2011). *Comportamiento Monótono y Cíclico No Drenado de Arenas de Relaves Integrales*. Tesis de Magíster Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile.
- Terzaghi, K. (1936). *The Shear Strength of Saturated Soils*. Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Vol. 1.
- Vanapalli, S. y Fredlund, D. (2013). *Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength*. Advances in Unsaturated Geotechnics.
- Vanapalli, S., Fredlund, D., Pufahl, D., y Clifton, A. (1996). *Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 33.
- Verdugo, R. y Ishihara, K. (1996). *The steady state of sandy soils*. Soils and Foundations Vol. 36.
- Vilar, O. M. (2006). *A Simplified Procedure to Estimate the Shear Strength Envelope of Unsaturated Soil*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 43.
- Vukovic, M. y Soro, A. (1992). *Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition*. Water Resources Publications.
- Wan Soo, K. y Borden, R. (2011). *Influence of soil type and stress state on predicting shear strength of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal Vol. 48.

A. Anexos

A.1. Ecuaciones Utilizadas por GDSLab.exe

A.1.1. Cálculos para Triaxial Estándar

- Fuerza Axial, F_a (kN):

$$F_a = F_v + \sigma_r \cdot A_c \quad (\text{A.1})$$

Donde:

F_v = Fuerza vertical medida por medio de la celda de carga (kN).

A_c = Área corregida (mm^2).

- Área corregida, A_c (mm^2):

$$A_c = \frac{\left(\pi \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \cdot H_0 \right) + \Delta V}{H_0 - \Delta H} \quad (\text{A.2})$$

Donde:

D_0 = Diámetro inicial de la probeta (mm).

H_0 = Altura inicial de la probeta (mm).

ΔH = Desplazamiento axial (mm).

ΔV = Cambio volumétrico (mm^3).

- Deformación Axial, ε_a (%):

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 \quad (\text{A.3})$$

- Variación Promedio del Diámetro, ΔD (mm):

$$\Delta D = 2\sqrt{\frac{A_c}{\pi}} - D_0 \quad (\text{A.4})$$

- Deformación Radial, ε_r (%):

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \cdot 100 \quad (\text{A.5})$$

- Esfuerzo Axial, σ_a (kPa):

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A_c} \quad (\text{A.6})$$

- Esfuerzo Axial Efectivo, σ'_a (kPa):

$$\sigma'_a = \sigma_a - u_w \quad (\text{A.7})$$

Donde:

u_w = Presión de poros (kPa).

- Esfuerzo Radial Efectivo, σ'_r (kPa):

$$\sigma'_r = \sigma_r - u_w \quad (\text{A.8})$$

Donde:

σ_r = Presión de cámara aplicada (kPa).

- Esfuerzo Desviatorio, q (kPa):

$$q = \sigma_a - \sigma_r \quad (\text{A.9})$$

- Presión Media Total, p (kPa):

$$p = \frac{\sigma_a + 2 \cdot \sigma_r}{3} \quad (\text{A.10})$$

- Presión Media Efectiva, p' (kPa):

$$p' = p - u_w \quad (\text{A.11})$$

- Razón de Esfuerzo Total Aplicado, η (-):

$$\eta = \frac{\sigma_a}{\sigma_r} \quad (\text{A.12})$$

- Razón de Esfuerzo Efectivo Aplicado, η (-):

$$\eta = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_r} \quad (\text{A.13})$$

- Deformación por Corte, γ (-):

$$\gamma = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_r) \quad (\text{A.14})$$

- Esfuerzo Medio, s (kPa):

$$s = \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} \quad (\text{A.15})$$

- Esfuerzo de Corte Máximo, τ (kPa):

$$\tau = \frac{q}{2} \quad (\text{A.16})$$

A.1.2. Cálculos para Triaxial Parcialmente Saturado

- Volumen Inicial de Sólidos, en la Muestra V_s (mm³):

$$V_s = \frac{W_s}{G_s} \cdot 1000 \quad (\text{A.17})$$

Donde:

W_s = Peso del suelo seco (grs).

G_s = Gravedad específica del suelo multiplicada por la densidad del agua (gr/cm^3).

- Volumen Inicial de Vacíos en la Muestra, V_v (mm^3):

$$V_v = V_0 - V_s \quad (\text{A.18})$$

Donde:

V_0 = Volumen inicial de la muestra (mm^3).

- Grado de Saturación Inicial, S (%):

$$S = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (\text{A.19})$$

Donde:

V_w = Volumen inicial de agua (mm^3).

- Volumen Inicial de Agua en la Muestra, V_w (mm^3):

$$V_w = V_v \cdot \frac{S}{100} \quad (\text{A.20})$$

- Volumen Inicial de Aire en la Muestra, V_a (mm^3):

$$V_a = V_v \cdot \frac{100 - S}{100} \quad (\text{A.21})$$

- Succión Matricial, (kPa):

$$\text{Matric Suction} = u_a - u_w \quad (\text{A.22})$$

Donde:

u_a = Presión de aire (kPa).

- Constante kRT (Ley de Gases Ideales $PV = kRT$):

$$kRT = (u_a + u_{atm}) \cdot (V_a + V_C + \Delta V_C + V_{p1} + V_{p2}) \quad (\text{A.23})$$

Donde:

u_{atm} = Presión atmosférica (kPa).

V_C = Volumen inicial de aire en el controlador (mm^3), ver Fig. A.1.

ΔV_C = Volumen de aire aplicado por controlador (mm^3).

V_{p1} = Volumen de aire en línea que conecta cap superior con válvula (mm^3).

V_{p2} = Volumen de aire en línea que conecta válvula con controlador de aire (mm^3).

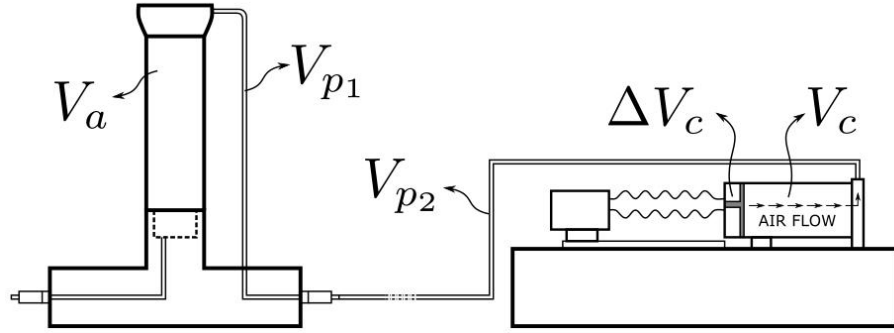


Figura A.1: Esquema de cada volumen de aire presente en el sistema.

- Volumen de agua corregido, V'_w (mm^3):

$$V'_w = V_w + V_{BP} \quad (\text{A.24})$$

Donde:

V_{BP} = Volumen aplicado por controlador de back-pressure (mm^3).

- Volumen de Aire en el Sistema, $V_{a_{system}}$ (mm^3):

$$V_{a_{system}} = \frac{kRT}{(u_a + u_{atm})} \quad (\text{A.25})$$

- Volumen de Aire en la Muestra Corregido, V'_a (mm^3):

$$V'_a = V_{a_{system}} - (V_{p1} + V_{p2}) - V_c + \Delta V_c \quad (\text{A.26})$$

- Grado de Saturación Corregido, S' (%):

$$S' = \frac{V'_w}{V'_w + V'_a} \cdot 100 \quad (\text{A.27})$$

- Variación Volumétrica de la Muestra, ΔV (mm^3):

$$\Delta V = \Delta V'_a + \Delta V'_w \quad (\text{A.28})$$

Donde:

$\Delta V'_a$ = Variación en el contenido de aire de la muestra (mm^3).

$\Delta V'_w$ = Variación en el contenido de agua de la muestra (mm^3).

A.2. Resultados de Ensayos Triaxiales Saturados

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,013
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,805

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

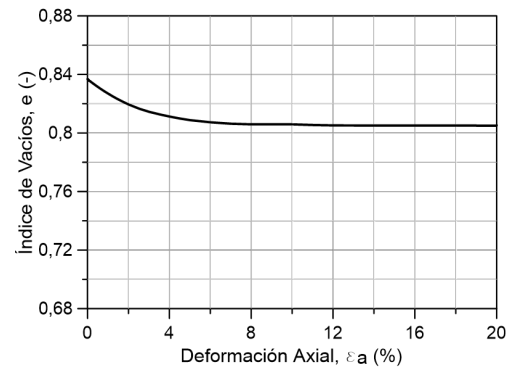
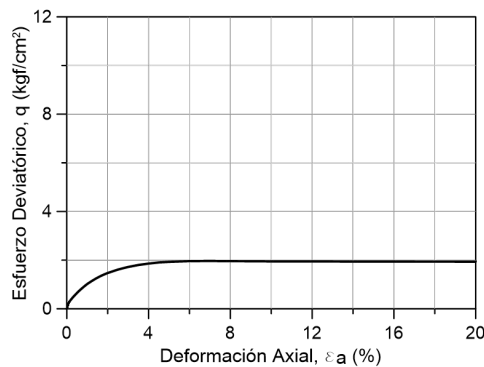
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	1,013	0,000	0,837
0,116	1,108	0,285	0,835
0,212	1,142	0,385	0,834
0,323	1,179	0,498	0,833
0,417	1,206	0,580	0,832
0,505	1,233	0,659	0,831
0,601	1,259	0,736	0,831
0,714	1,287	0,822	0,829
0,805	1,309	0,889	0,829
0,919	1,336	0,969	0,828
1,006	1,354	1,023	0,827
1,206	1,391	1,133	0,825
1,406	1,425	1,235	0,824
1,610	1,456	1,328	0,822
1,807	1,482	1,406	0,821
2,022	1,506	1,479	0,819
2,522	1,553	1,618	0,817
3,010	1,587	1,723	0,814
3,523	1,615	1,805	0,813
4,006	1,633	1,860	0,811
4,517	1,649	1,907	0,810
5,020	1,656	1,929	0,809
6,015	1,667	1,961	0,807
7,021	1,668	1,966	0,806
8,015	1,666	1,960	0,806
9,026	1,665	1,956	0,806
10,005	1,663	1,951	0,806
11,012	1,663	1,948	0,805
12,011	1,662	1,948	0,805
13,023	1,661	1,945	0,805
14,011	1,660	1,942	0,805
15,008	1,661	1,942	0,805
16,019	1,660	1,940	0,805
17,013	1,660	1,940	0,805
18,005	1,659	1,937	0,805
19,005	1,659	1,937	0,805
20,010	1,658	1,936	0,805

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,020
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,772

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

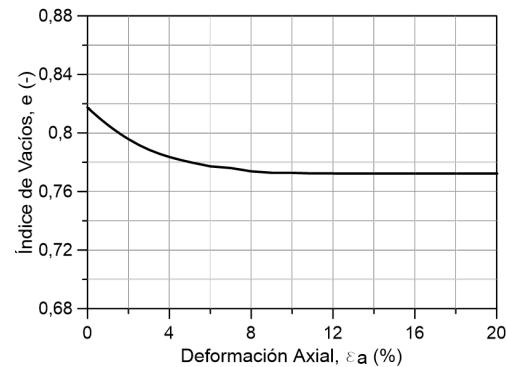
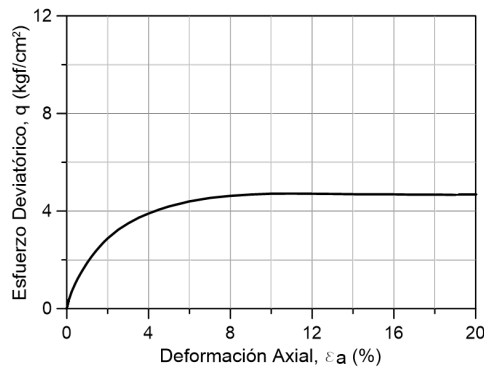
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	2,020	0,000	0,817
0,111	2,148	0,384	0,816
0,220	2,239	0,656	0,815
0,304	2,295	0,824	0,813
0,416	2,364	1,033	0,812
0,529	2,427	1,222	0,811
0,614	2,470	1,350	0,810
0,727	2,525	1,515	0,808
0,809	2,563	1,630	0,808
0,919	2,612	1,776	0,806
1,004	2,649	1,888	0,805
1,221	2,735	2,145	0,803
1,412	2,803	2,351	0,801
1,611	2,868	2,543	0,799
1,823	2,932	2,738	0,797
2,020	2,985	2,896	0,796
2,524	3,100	3,240	0,792
3,017	3,187	3,502	0,788
3,529	3,264	3,732	0,786
4,019	3,322	3,907	0,784
4,521	3,374	4,062	0,782
5,005	3,417	4,192	0,780
6,005	3,486	4,398	0,777
7,015	3,533	4,539	0,776
8,001	3,560	4,622	0,774
9,012	3,579	4,677	0,773
10,006	3,590	4,711	0,773
11,009	3,592	4,716	0,772
12,003	3,590	4,711	0,772
13,020	3,587	4,702	0,772
14,004	3,583	4,690	0,772
15,004	3,581	4,684	0,772
16,003	3,581	4,684	0,772
17,017	3,577	4,672	0,772
18,006	3,579	4,677	0,772
19,009	3,575	4,664	0,772
20,018	3,578	4,674	0,772

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,010
B-Value (-)	0,95
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,724

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

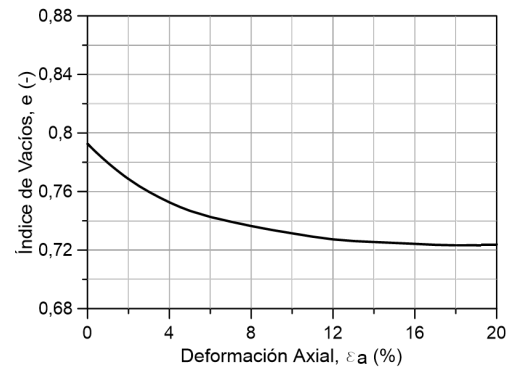
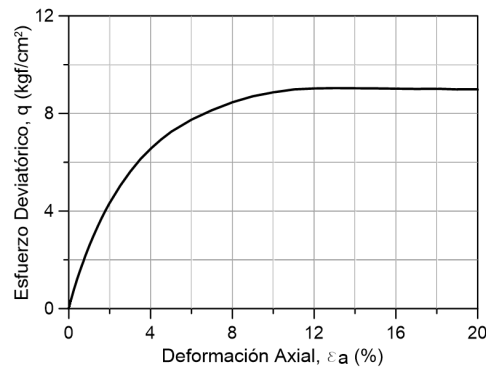
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	4,010	0,000	0,793
0,110	4,131	0,362	0,791
0,221	4,244	0,703	0,790
0,303	4,318	0,926	0,788
0,415	4,419	1,227	0,787
0,505	4,493	1,449	0,786
0,619	4,584	1,723	0,784
0,704	4,648	1,914	0,783
0,810	4,733	2,170	0,782
0,921	4,812	2,408	0,780
1,006	4,872	2,586	0,779
1,202	5,002	2,976	0,777
1,426	5,141	3,394	0,775
1,616	5,252	3,728	0,773
1,807	5,356	4,039	0,771
2,004	5,457	4,343	0,769
2,520	5,692	5,046	0,764
3,009	5,883	5,619	0,760
3,514	6,056	6,138	0,756
4,032	6,202	6,577	0,752
4,519	6,322	6,935	0,749
5,023	6,430	7,260	0,747
6,018	6,594	7,753	0,743
7,011	6,723	8,138	0,739
8,029	6,832	8,467	0,736
9,005	6,912	8,706	0,734
10,019	6,966	8,867	0,731
11,034	7,006	8,988	0,729
12,011	7,019	9,026	0,727
13,023	7,023	9,041	0,726
14,017	7,021	9,035	0,725
15,013	7,019	9,027	0,725
16,011	7,015	9,016	0,724
17,016	7,012	9,006	0,724
18,010	7,014	9,013	0,723
19,028	7,005	8,986	0,723
20,009	7,002	8,975	0,724

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,801

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

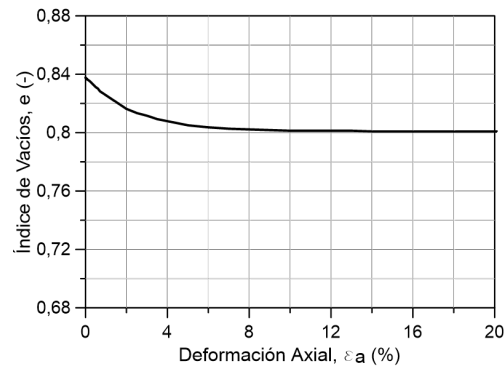
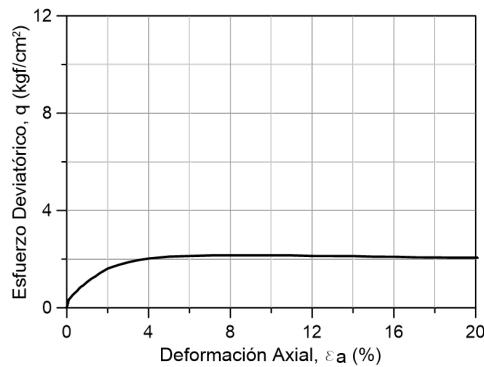
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	1,000	0,000	0,838
0,100	1,111	0,334	0,836
0,201	1,146	0,437	0,835
0,301	1,180	0,539	0,834
0,402	1,205	0,616	0,833
0,502	1,231	0,692	0,831
0,603	1,265	0,794	0,830
0,703	1,290	0,869	0,828
0,804	1,307	0,920	0,827
0,904	1,332	0,995	0,826
1,005	1,357	1,071	0,826
1,206	1,399	1,196	0,824
1,407	1,432	1,295	0,822
1,607	1,473	1,419	0,820
1,808	1,506	1,517	0,818
2,009	1,538	1,615	0,816
2,512	1,586	1,758	0,813
3,014	1,624	1,873	0,812
3,516	1,654	1,963	0,809
4,019	1,676	2,027	0,808
4,521	1,689	2,066	0,806
5,023	1,701	2,104	0,805
6,028	1,710	2,130	0,804
7,033	1,718	2,155	0,803
8,037	1,718	2,155	0,802
9,042	1,718	2,155	0,802
10,047	1,718	2,154	0,801
11,051	1,718	2,153	0,801
12,056	1,710	2,129	0,801
13,061	1,709	2,127	0,801
14,065	1,708	2,125	0,801
15,070	1,700	2,100	0,801
16,075	1,699	2,097	0,801
17,080	1,690	2,071	0,801
18,084	1,689	2,067	0,801
19,089	1,688	2,063	0,801
20,094	1,686	2,058	0,801

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
<hr/>	
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,000
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,770

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

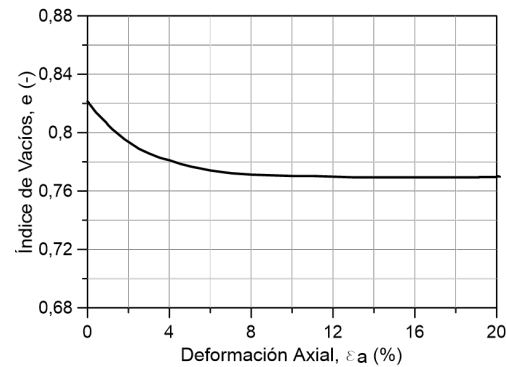
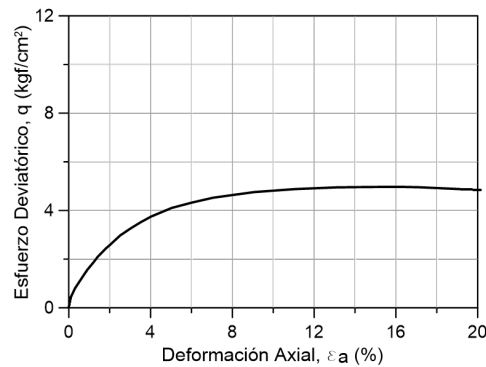
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	2,000	0,000	0,821
0,101	2,147	0,440	0,820
0,201	2,207	0,620	0,818
0,302	2,267	0,800	0,816
0,403	2,309	0,928	0,814
0,504	2,352	1,056	0,813
0,604	2,395	1,184	0,811
0,705	2,437	1,311	0,810
0,806	2,479	1,438	0,808
0,907	2,522	1,565	0,807
1,007	2,555	1,666	0,805
1,209	2,622	1,867	0,802
1,410	2,698	2,093	0,800
1,612	2,756	2,267	0,798
1,813	2,813	2,440	0,795
2,015	2,863	2,588	0,794
2,518	2,993	2,978	0,789
3,022	3,088	3,264	0,786
3,526	3,174	3,522	0,783
4,029	3,251	3,752	0,781
4,533	3,310	3,930	0,779
5,037	3,369	4,106	0,777
6,044	3,443	4,330	0,774
7,051	3,508	4,524	0,772
8,059	3,547	4,642	0,771
9,066	3,585	4,756	0,771
10,074	3,607	4,820	0,770
11,081	3,627	4,881	0,770
12,088	3,639	4,916	0,770
13,096	3,650	4,950	0,769
14,103	3,653	4,959	0,769
15,110	3,656	4,967	0,769
16,118	3,658	4,973	0,769
17,125	3,652	4,957	0,769
18,132	3,639	4,918	0,769
19,140	3,626	4,878	0,769
20,147	3,613	4,838	0,770

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,728

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

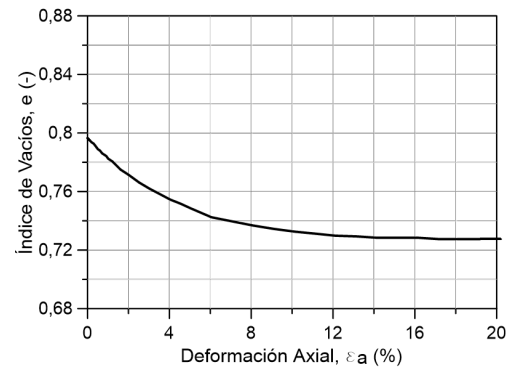
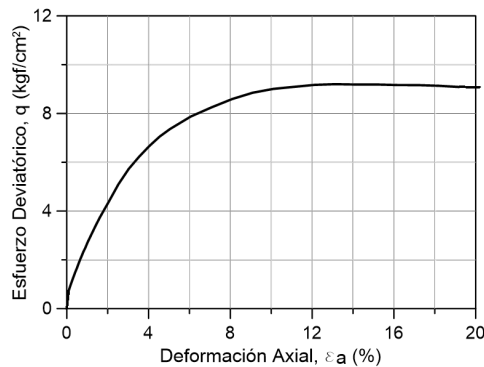
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	4,000	0,000	0,796
0,101	4,251	0,754	0,795
0,202	4,338	1,013	0,794
0,303	4,415	1,246	0,793
0,404	4,493	1,478	0,791
0,505	4,561	1,683	0,789
0,606	4,638	1,914	0,788
0,707	4,706	2,119	0,786
0,808	4,775	2,324	0,785
0,909	4,834	2,502	0,784
1,010	4,902	2,705	0,782
1,212	5,020	3,060	0,781
1,414	5,138	3,413	0,778
1,616	5,246	3,739	0,775
1,818	5,346	4,038	0,773
2,020	5,445	4,336	0,771
2,525	5,700	5,100	0,766
3,030	5,910	5,730	0,762
3,535	6,076	6,227	0,758
4,040	6,223	6,669	0,755
4,545	6,352	7,056	0,752
5,050	6,455	7,365	0,748
6,060	6,624	7,873	0,742
7,070	6,749	8,248	0,740
8,080	6,863	8,589	0,737
9,090	6,950	8,850	0,734
10,100	7,003	9,009	0,733
11,110	7,031	9,093	0,731
12,120	7,058	9,173	0,730
13,130	7,068	9,203	0,729
14,140	7,062	9,185	0,728
15,150	7,063	9,188	0,728
16,160	7,055	9,165	0,728
17,170	7,054	9,163	0,728
18,180	7,045	9,136	0,728
19,190	7,029	9,087	0,728
20,200	7,026	9,077	0,728

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,069
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,808

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

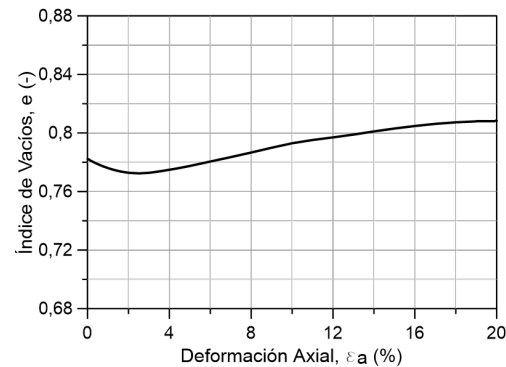
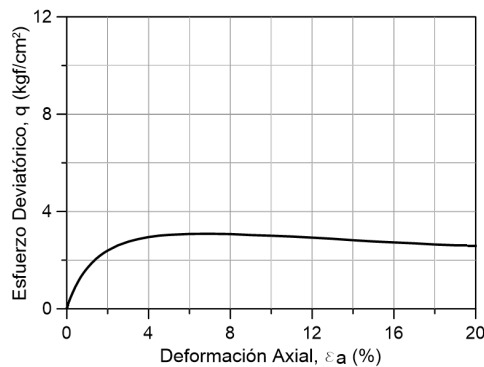
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	1,069	0,000	0,782
0,110	1,170	0,303	0,781
0,203	1,236	0,500	0,781
0,308	1,303	0,703	0,780
0,415	1,368	0,898	0,779
0,502	1,414	1,035	0,779
0,608	1,469	1,201	0,778
0,711	1,517	1,342	0,777
0,824	1,563	1,481	0,777
0,916	1,597	1,582	0,776
1,026	1,635	1,698	0,776
1,220	1,696	1,879	0,775
1,417	1,750	2,042	0,774
1,614	1,795	2,178	0,774
1,822	1,837	2,304	0,773
2,021	1,871	2,405	0,773
2,507	1,939	2,609	0,772
3,032	1,991	2,765	0,773
3,514	2,026	2,871	0,774
4,012	2,053	2,951	0,775
4,522	2,072	3,007	0,776
5,006	2,082	3,039	0,778
6,023	2,095	3,078	0,781
7,017	2,097	3,083	0,784
8,006	2,093	3,072	0,787
9,018	2,079	3,030	0,790
10,029	2,070	3,004	0,793
11,025	2,059	2,971	0,795
12,020	2,044	2,924	0,797
13,023	2,029	2,878	0,799
14,013	2,008	2,818	0,801
15,022	1,992	2,768	0,803
16,019	1,978	2,727	0,805
17,022	1,966	2,690	0,806
18,027	1,950	2,642	0,807
19,021	1,939	2,611	0,808
20,006	1,930	2,582	0,808

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,161
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,775

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

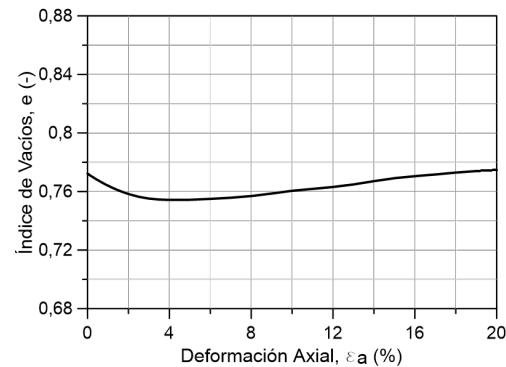
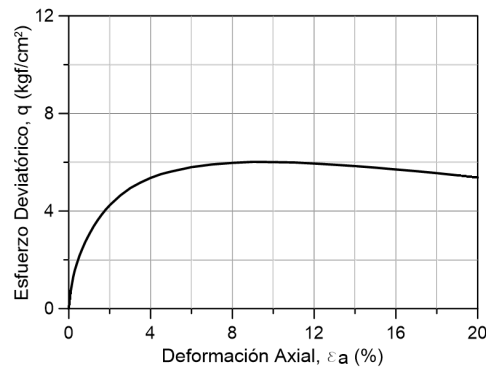
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	2,161	0,000	0,772
0,103	2,413	0,756	0,771
0,213	2,592	1,292	0,770
0,301	2,693	1,594	0,769
0,416	2,796	1,905	0,768
0,522	2,883	2,165	0,768
0,609	2,946	2,354	0,767
0,726	3,022	2,582	0,766
0,806	3,072	2,732	0,765
0,917	3,134	2,917	0,765
1,031	3,194	3,098	0,764
1,219	3,288	3,379	0,763
1,415	3,371	3,631	0,761
1,613	3,447	3,859	0,760
1,808	3,515	4,063	0,759
2,031	3,582	4,263	0,758
2,525	3,709	4,645	0,756
3,014	3,809	4,945	0,755
3,503	3,883	5,166	0,755
4,004	3,948	5,360	0,754
4,509	3,999	5,514	0,754
5,008	4,034	5,620	0,754
6,013	4,095	5,802	0,755
7,004	4,131	5,910	0,756
8,019	4,153	5,976	0,757
9,025	4,167	6,017	0,759
10,012	4,163	6,005	0,761
11,025	4,159	5,992	0,762
12,009	4,144	5,949	0,763
13,004	4,127	5,898	0,765
14,013	4,109	5,843	0,767
15,016	4,087	5,778	0,769
16,026	4,062	5,703	0,771
17,026	4,039	5,632	0,772
18,004	4,013	5,555	0,773
19,020	3,983	5,464	0,774
20,002	3,951	5,370	0,775

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,175
B-Value (-)	0,98
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,710

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

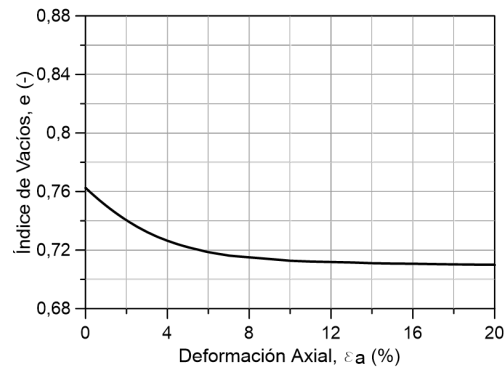
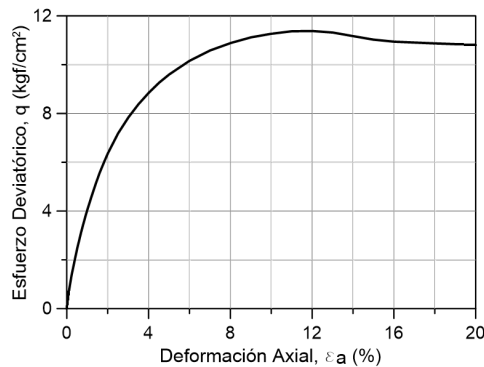
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	4,175	0,000	0,763
0,111	4,428	0,760	0,761
0,222	4,615	1,319	0,760
0,307	4,730	1,664	0,759
0,412	4,872	2,091	0,757
0,515	5,006	2,494	0,756
0,630	5,137	2,886	0,755
0,706	5,225	3,150	0,754
0,814	5,339	3,493	0,753
0,926	5,452	3,833	0,751
1,003	5,525	4,051	0,750
1,204	5,702	4,582	0,748
1,415	5,881	5,118	0,746
1,606	6,030	5,567	0,744
1,820	6,175	6,002	0,742
2,016	6,301	6,379	0,740
2,509	6,570	7,185	0,736
3,016	6,789	7,844	0,732
3,510	6,969	8,384	0,729
4,019	7,128	8,858	0,726
4,518	7,263	9,264	0,724
5,017	7,377	9,606	0,722
6,002	7,561	10,157	0,719
7,011	7,703	10,583	0,716
8,031	7,806	10,893	0,715
9,009	7,882	11,121	0,714
10,007	7,931	11,269	0,713
11,010	7,965	11,370	0,712
12,007	7,968	11,379	0,712
13,021	7,947	11,316	0,712
14,003	7,898	11,170	0,711
15,004	7,850	11,027	0,711
16,024	7,822	10,942	0,711
17,032	7,810	10,907	0,710
18,003	7,799	10,872	0,710
19,015	7,789	10,843	0,710
20,003	7,775	10,800	0,710

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,000
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,801

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

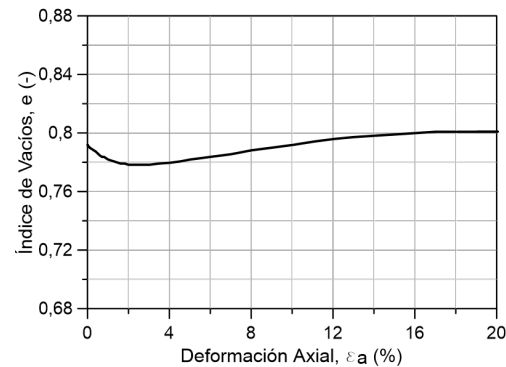
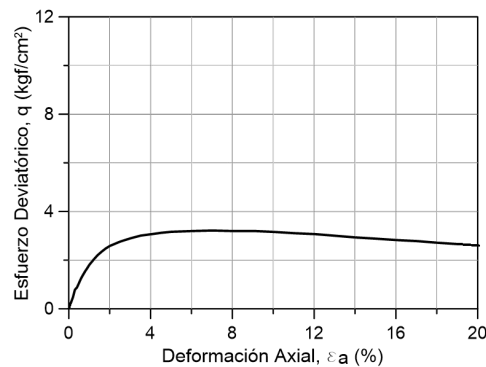
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	1,000	0,000	0,792
0,100	1,081	0,242	0,790
0,201	1,157	0,470	0,789
0,301	1,262	0,785	0,788
0,401	1,292	0,877	0,787
0,502	1,357	1,071	0,786
0,602	1,418	1,255	0,785
0,702	1,469	1,406	0,784
0,802	1,516	1,548	0,784
0,903	1,557	1,671	0,783
1,003	1,603	1,808	0,782
1,204	1,670	2,011	0,781
1,404	1,733	2,200	0,780
1,605	1,782	2,347	0,779
1,805	1,827	2,480	0,779
2,006	1,861	2,584	0,778
2,508	1,921	2,762	0,778
3,009	1,966	2,897	0,778
3,511	2,002	3,007	0,779
4,012	2,021	3,063	0,780
4,514	2,041	3,123	0,781
5,015	2,055	3,164	0,782
6,018	2,065	3,196	0,784
7,021	2,073	3,219	0,785
8,024	2,066	3,197	0,788
9,027	2,067	3,200	0,790
10,030	2,054	3,161	0,792
11,033	2,036	3,109	0,794
12,036	2,023	3,070	0,796
13,039	2,001	3,002	0,797
14,042	1,977	2,932	0,798
15,045	1,960	2,881	0,799
16,048	1,941	2,824	0,800
17,051	1,928	2,783	0,801
18,054	1,905	2,715	0,801
19,057	1,886	2,659	0,801
20,060	1,865	2,596	0,801

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
<hr/>	
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,775

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

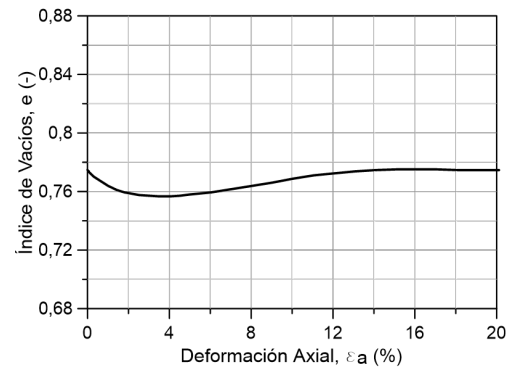
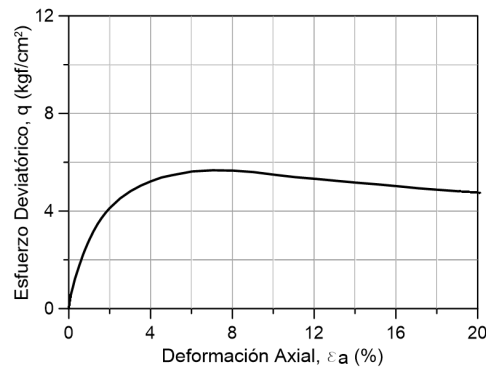
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	2,000	0,000	0,775
0,101	2,189	0,566	0,773
0,201	2,296	0,888	0,772
0,302	2,409	1,228	0,770
0,402	2,494	1,483	0,769
0,503	2,581	1,743	0,768
0,603	2,661	1,983	0,767
0,704	2,742	2,227	0,767
0,804	2,813	2,439	0,766
0,905	2,879	2,636	0,765
1,006	2,941	2,823	0,764
1,207	3,056	3,169	0,763
1,408	3,156	3,468	0,761
1,609	3,239	3,718	0,760
1,810	3,314	3,941	0,759
2,011	3,377	4,130	0,759
2,514	3,507	4,520	0,758
3,017	3,605	4,814	0,757
3,520	3,681	5,042	0,757
4,022	3,741	5,223	0,757
4,525	3,791	5,374	0,757
5,028	3,822	5,466	0,758
6,034	3,875	5,624	0,759
7,039	3,891	5,673	0,762
8,045	3,886	5,659	0,764
9,050	3,866	5,597	0,766
10,056	3,829	5,488	0,769
11,062	3,797	5,390	0,771
12,067	3,773	5,320	0,772
13,073	3,746	5,239	0,774
14,078	3,721	5,163	0,775
15,084	3,698	5,094	0,775
16,090	3,673	5,018	0,775
17,095	3,645	4,935	0,775
18,101	3,622	4,867	0,775
19,106	3,602	4,807	0,775
20,112	3,583	4,748	0,775

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,000
B-Value (-)	0,98
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,715

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

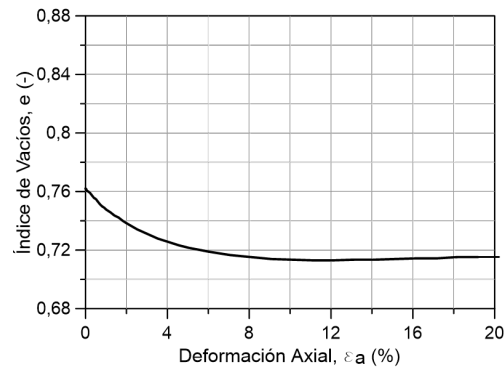
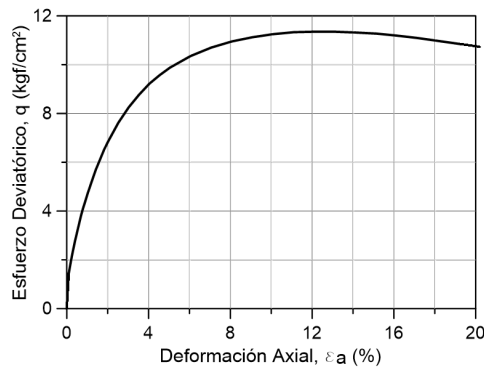
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



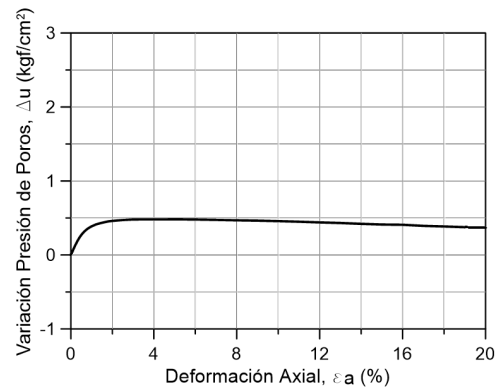
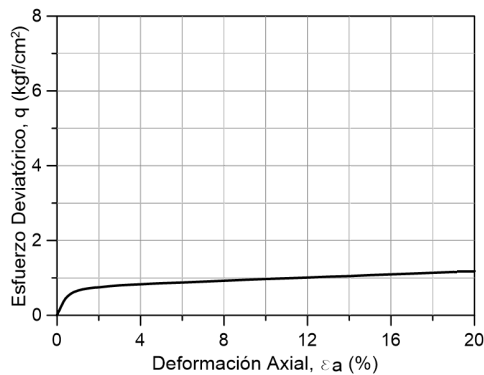
ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	e (-)
0,000	4,000	0,000	0,762
0,101	4,486	1,457	0,760
0,202	4,652	1,955	0,759
0,303	4,794	2,382	0,758
0,404	4,928	2,784	0,756
0,505	5,048	3,143	0,755
0,606	5,165	3,496	0,753
0,707	5,285	3,854	0,751
0,808	5,383	4,149	0,750
0,909	5,471	4,412	0,749
1,010	5,566	4,697	0,748
1,212	5,734	5,201	0,746
1,414	5,894	5,683	0,744
1,616	6,031	6,094	0,742
1,817	6,168	6,504	0,740
2,019	6,284	6,851	0,738
2,524	6,542	7,626	0,734
3,029	6,752	8,255	0,731
3,534	6,922	8,767	0,728
4,039	7,073	9,220	0,726
4,544	7,191	9,572	0,723
5,048	7,293	9,880	0,722
6,058	7,452	10,356	0,719
7,068	7,567	10,701	0,717
8,078	7,651	10,954	0,715
9,087	7,709	11,126	0,714
10,097	7,751	11,253	0,713
11,107	7,777	11,332	0,713
12,116	7,784	11,352	0,713
13,126	7,783	11,349	0,713
14,136	7,773	11,319	0,713
15,145	7,758	11,274	0,714
16,155	7,730	11,191	0,714
17,165	7,697	11,091	0,714
18,174	7,657	10,972	0,715
19,184	7,617	10,852	0,715
20,194	7,577	10,731	0,715

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,010
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,842

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	1,010	0,000	0,000
0,114	0,983	0,140	0,074
0,208	0,964	0,251	0,130
0,319	0,945	0,375	0,191
0,410	0,927	0,452	0,234
0,513	0,906	0,511	0,275
0,612	0,889	0,556	0,307
0,704	0,875	0,590	0,332
0,804	0,863	0,621	0,354
0,926	0,849	0,644	0,376
1,023	0,842	0,665	0,390
1,210	0,828	0,692	0,413
1,424	0,818	0,713	0,430
1,604	0,812	0,728	0,441
1,807	0,804	0,742	0,454
2,003	0,799	0,748	0,460
2,507	0,797	0,778	0,473
3,003	0,798	0,801	0,480
3,516	0,802	0,816	0,480
4,014	0,806	0,829	0,481
4,507	0,811	0,844	0,481
5,006	0,815	0,858	0,482
6,011	0,824	0,878	0,479
7,010	0,836	0,901	0,475
8,002	0,850	0,924	0,468
9,022	0,863	0,950	0,464
10,001	0,877	0,971	0,457
11,019	0,891	0,989	0,449
12,013	0,907	1,010	0,440
13,016	0,922	1,032	0,432
14,009	0,939	1,049	0,421
15,001	0,957	1,074	0,412
16,007	0,967	1,094	0,408
17,015	0,989	1,115	0,393
18,022	1,005	1,138	0,384
19,016	1,022	1,159	0,375
20,010	1,039	1,180	0,365

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,038
B-Value (-)	0,98
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,813

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

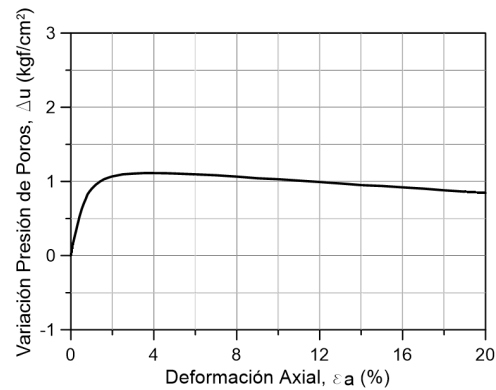
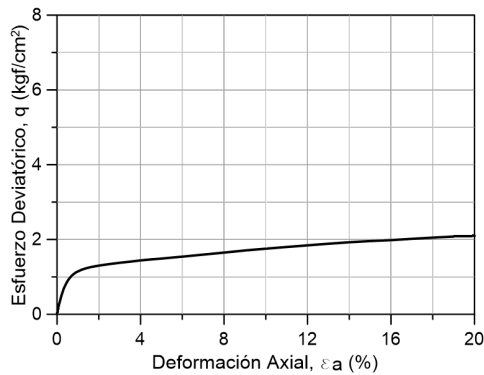
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	2,038	0,000	0,000
0,102	1,965	0,278	0,166
0,215	1,913	0,512	0,295
0,319	1,850	0,687	0,417
0,410	1,783	0,796	0,520
0,515	1,718	0,903	0,621
0,606	1,670	0,970	0,691
0,715	1,620	1,038	0,764
0,806	1,571	1,081	0,827
0,916	1,542	1,123	0,871
1,007	1,519	1,149	0,902
1,204	1,481	1,197	0,956
1,416	1,449	1,234	1,000
1,611	1,427	1,261	1,032
1,805	1,414	1,283	1,052
2,001	1,404	1,302	1,068
2,512	1,390	1,343	1,096
3,001	1,392	1,377	1,105
3,508	1,395	1,408	1,112
4,013	1,405	1,441	1,113
4,517	1,416	1,468	1,111
5,022	1,428	1,491	1,107
6,021	1,457	1,543	1,096
7,003	1,487	1,596	1,083
8,015	1,524	1,651	1,065
9,001	1,564	1,707	1,042
10,009	1,594	1,755	1,029
11,006	1,627	1,800	1,011
12,020	1,661	1,843	0,992
13,004	1,694	1,887	0,973
14,024	1,730	1,927	0,950
15,003	1,752	1,959	0,939
16,009	1,779	1,983	0,920
17,011	1,808	2,019	0,902
18,020	1,842	2,051	0,880
19,002	1,869	2,079	0,862
20,006	1,893	2,098	0,844

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,047
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,788

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

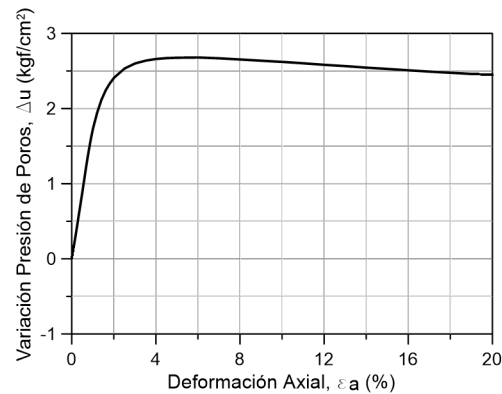
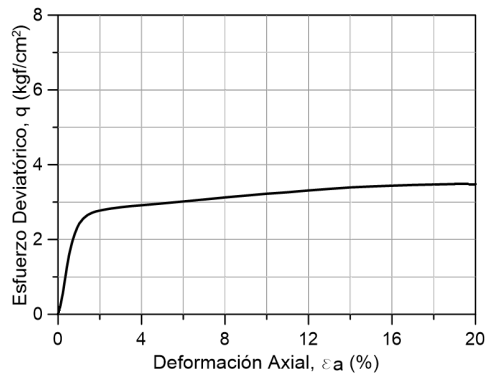
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	4,047	0,000	0,000
0,102	3,942	0,207	0,174
0,223	3,844	0,548	0,385
0,305	3,795	0,838	0,531
0,415	3,729	1,232	0,729
0,518	3,652	1,562	0,916
0,623	3,539	1,822	1,115
0,708	3,440	1,995	1,272
0,812	3,322	2,171	1,449
0,918	3,208	2,316	1,611
1,016	3,114	2,425	1,741
1,207	2,954	2,560	1,946
1,409	2,816	2,652	2,115
1,617	2,705	2,711	2,246
1,805	2,629	2,748	2,334
2,016	2,560	2,775	2,412
2,515	2,455	2,827	2,534
3,011	2,401	2,863	2,601
3,523	2,373	2,893	2,638
4,002	2,359	2,916	2,660
4,501	2,356	2,939	2,671
5,002	2,359	2,965	2,676
6,023	2,373	3,017	2,680
7,001	2,400	3,069	2,670
8,005	2,435	3,126	2,654
9,002	2,468	3,174	2,637
10,010	2,500	3,224	2,621
11,021	2,532	3,264	2,603
12,013	2,569	3,312	2,582
13,009	2,599	3,354	2,566
14,019	2,633	3,394	2,545
15,012	2,659	3,417	2,527
16,010	2,684	3,439	2,509
17,008	2,708	3,459	2,492
18,001	2,727	3,471	2,476
19,018	2,747	3,483	2,461
20,012	2,758	3,476	2,448

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,842

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

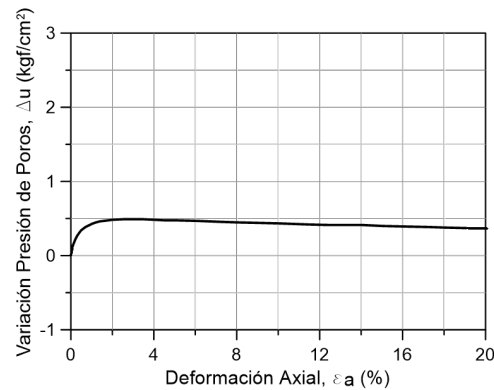
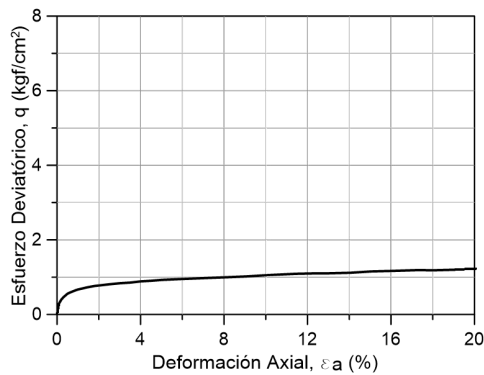
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	1,000	0,000	0,000
0,100	0,959	0,298	0,140
0,201	0,922	0,396	0,210
0,301	0,887	0,460	0,266
0,401	0,862	0,511	0,308
0,502	0,843	0,557	0,343
0,602	0,831	0,584	0,364
0,703	0,817	0,607	0,385
0,803	0,811	0,629	0,399
0,903	0,804	0,652	0,413
1,004	0,796	0,670	0,427
1,204	0,784	0,696	0,448
1,405	0,779	0,722	0,462
1,606	0,779	0,744	0,469
1,807	0,779	0,765	0,476
2,007	0,776	0,777	0,483
2,509	0,780	0,810	0,490
3,011	0,789	0,837	0,490
3,513	0,795	0,855	0,490
4,015	0,813	0,887	0,483
4,517	0,825	0,904	0,476
5,018	0,833	0,926	0,476
6,022	0,848	0,951	0,469
7,226	0,871	0,978	0,455
8,029	0,884	0,995	0,448
9,033	0,899	1,019	0,441
10,037	0,917	1,053	0,434
11,442	0,944	1,091	0,420
12,446	0,955	1,103	0,413
13,048	0,955	1,103	0,413
14,051	0,960	1,119	0,413
15,055	0,985	1,153	0,399
16,159	0,998	1,170	0,392
17,263	1,011	1,189	0,385
18,066	1,017	1,185	0,378
19,070	1,029	1,201	0,371
20,074	1,045	1,227	0,364

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,000
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,814

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

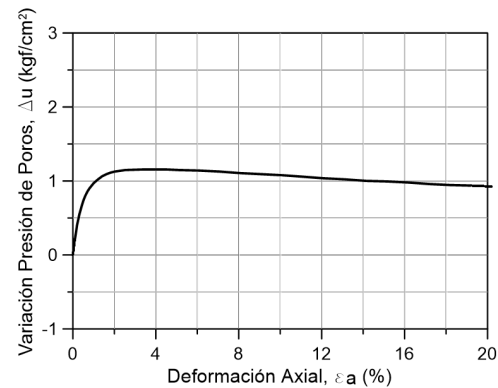
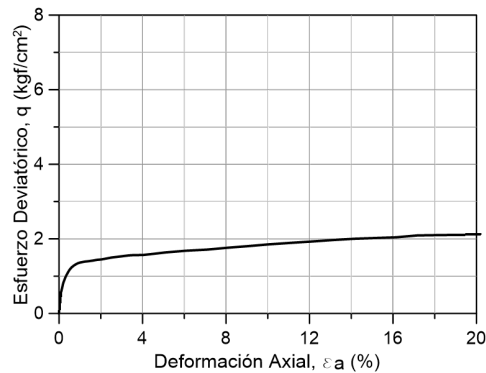
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



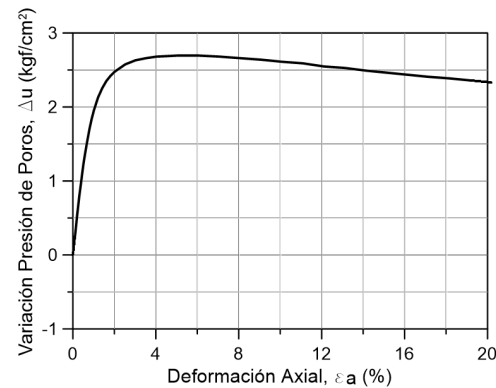
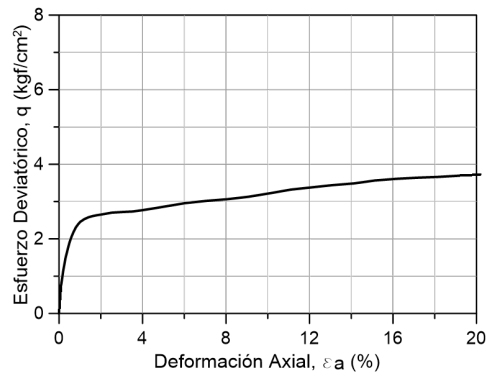
ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	2,000	0,000	0,000
0,101	1,975	0,575	0,217
0,202	1,867	0,820	0,406
0,303	1,784	0,970	0,539
0,404	1,717	1,082	0,644
0,505	1,656	1,174	0,735
0,606	1,608	1,239	0,805
0,707	1,567	1,285	0,861
0,808	1,537	1,321	0,903
0,909	1,511	1,347	0,938
1,010	1,482	1,365	0,973
1,212	1,441	1,390	1,022
1,414	1,403	1,401	1,064
1,616	1,380	1,417	1,092
1,817	1,366	1,437	1,113
2,019	1,356	1,448	1,127
2,524	1,352	1,500	1,148
3,332	1,364	1,556	1,155
3,534	1,366	1,562	1,155
4,039	1,368	1,568	1,155
4,544	1,378	1,600	1,155
5,099	1,397	1,635	1,148
6,058	1,419	1,681	1,141
7,068	1,443	1,711	1,127
8,078	1,481	1,762	1,106
9,087	1,510	1,807	1,092
10,097	1,540	1,855	1,078
11,107	1,574	1,893	1,057
12,116	1,607	1,929	1,036
13,126	1,634	1,969	1,022
14,136	1,667	2,003	1,001
15,145	1,680	2,023	0,994
16,155	1,701	2,043	0,980
17,165	1,738	2,092	0,959
18,174	1,756	2,102	0,945
19,184	1,764	2,106	0,938
20,194	1,784	2,125	0,924

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
<hr/>	
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	40
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,787

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



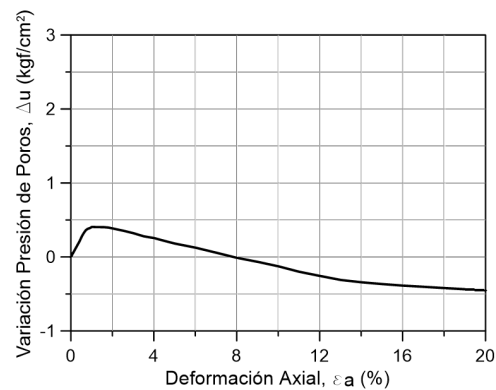
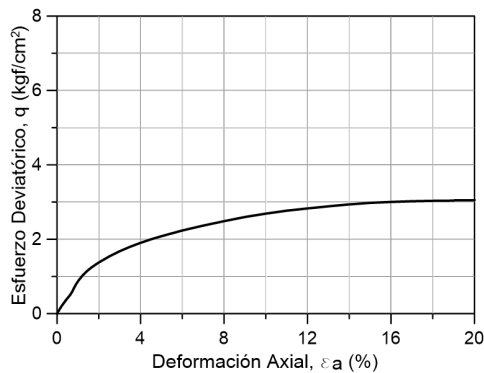
ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	4,000	0,000	0,000
0,101	4,001	0,758	0,252
0,202	3,854	1,158	0,532
0,303	3,706	1,471	0,784
0,404	3,566	1,700	1,001
0,505	3,413	1,914	1,225
0,605	3,290	2,071	1,400
0,706	3,172	2,200	1,561
0,807	3,055	2,310	1,715
0,908	2,955	2,388	1,841
1,009	2,865	2,455	1,953
1,211	2,715	2,529	2,128
1,413	2,606	2,580	2,254
1,614	2,519	2,612	2,352
1,816	2,456	2,634	2,422
2,018	2,406	2,652	2,478
2,523	2,325	2,703	2,576
3,027	2,275	2,721	2,632
3,532	2,251	2,734	2,660
4,036	2,244	2,774	2,681
4,541	2,251	2,818	2,688
5,045	2,260	2,865	2,695
6,054	2,291	2,959	2,695
7,063	2,325	3,019	2,681
8,072	2,361	3,064	2,660
9,081	2,404	3,129	2,639
10,090	2,463	3,222	2,611
11,099	2,517	3,320	2,590
12,108	2,579	3,382	2,548
13,117	2,620	3,441	2,527
14,126	2,670	3,486	2,492
15,135	2,724	3,565	2,464
16,144	2,767	3,610	2,436
17,153	2,806	3,641	2,408
18,162	2,834	3,662	2,387
19,171	2,872	3,693	2,359
20,180	2,910	3,722	2,331

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,065
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,788

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	1,065	0,000	0,000
0,108	1,045	0,104	0,054
0,210	1,023	0,197	0,108
0,316	0,997	0,281	0,161
0,422	0,970	0,359	0,215
0,516	0,934	0,427	0,273
0,615	0,908	0,493	0,321
0,715	0,897	0,581	0,361
0,802	0,912	0,679	0,379
0,906	0,938	0,786	0,389
1,017	0,953	0,883	0,406
1,214	1,002	1,021	0,404
1,419	1,040	1,137	0,404
1,621	1,072	1,229	0,402
1,815	1,104	1,307	0,397
2,010	1,139	1,378	0,386
2,521	1,224	1,543	0,356
3,004	1,302	1,679	0,322
3,512	1,386	1,800	0,279
4,016	1,445	1,906	0,255
4,506	1,513	1,999	0,218
5,001	1,576	2,081	0,182
6,016	1,686	2,238	0,125
7,001	1,796	2,367	0,058
8,009	1,906	2,486	-0,012
9,009	1,997	2,599	-0,066
10,013	2,088	2,689	-0,126
11,010	2,188	2,768	-0,200
12,016	2,265	2,830	-0,257
13,016	2,338	2,886	-0,311
14,007	2,386	2,937	-0,342
15,021	2,424	2,978	-0,367
16,003	2,453	3,003	-0,387
17,006	2,475	3,022	-0,403
18,002	2,496	3,031	-0,420
19,015	2,514	3,037	-0,436
20,015	2,536	3,051	-0,454

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, DR (%)	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,034
B-Value (-)	0,95
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,771

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

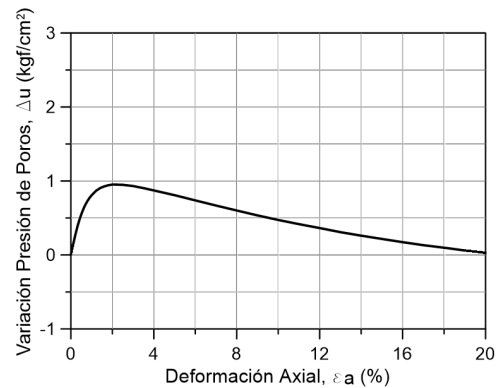
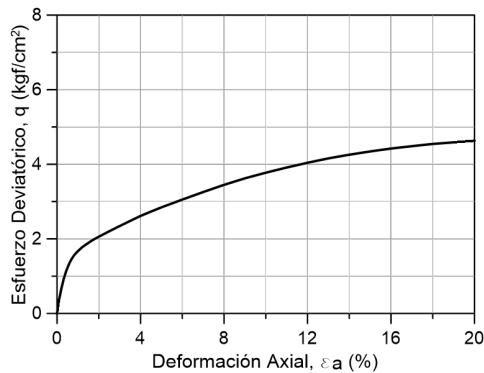
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



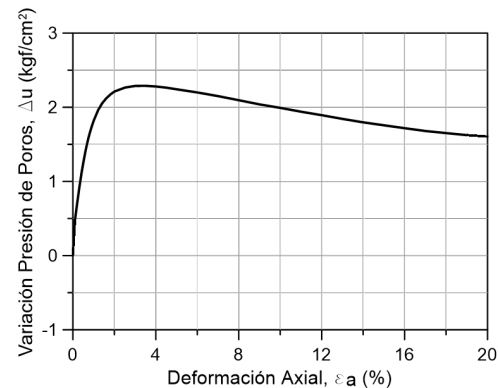
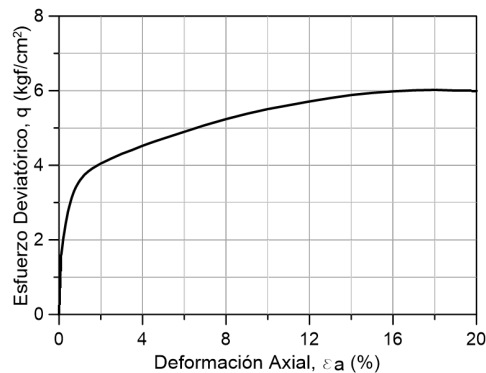
ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	2,034	0,000	0,000
0,103	2,024	0,383	0,138
0,202	1,995	0,662	0,259
0,318	1,956	0,926	0,387
0,413	1,922	1,098	0,477
0,507	1,892	1,239	0,554
0,617	1,862	1,378	0,631
0,712	1,837	1,473	0,688
0,807	1,817	1,553	0,734
0,907	1,798	1,619	0,775
1,001	1,783	1,673	0,808
1,211	1,760	1,780	0,867
1,422	1,749	1,862	0,906
1,601	1,751	1,930	0,926
1,804	1,758	1,999	0,942
2,023	1,770	2,066	0,953
2,505	1,820	2,205	0,948
3,006	1,884	2,346	0,931
3,516	1,960	2,486	0,902
4,005	2,033	2,616	0,872
4,505	2,105	2,733	0,840
5,020	2,177	2,849	0,807
6,015	2,316	3,056	0,737
7,011	2,452	3,258	0,667
8,005	2,583	3,449	0,600
9,016	2,708	3,625	0,534
10,013	2,820	3,776	0,472
11,013	2,922	3,915	0,416
12,004	3,017	4,041	0,363
13,005	3,112	4,158	0,308
14,011	3,192	4,257	0,261
15,017	3,266	4,346	0,216
16,011	3,335	4,423	0,173
17,021	3,398	4,486	0,131
18,009	3,451	4,546	0,098
19,012	3,503	4,587	0,060
20,006	3,548	4,631	0,029

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo GDS Instruments
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,016
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,761

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	4,016	0,000	0,000
0,106	4,058	1,597	0,491
0,207	3,990	2,054	0,710
0,315	3,897	2,425	0,927
0,418	3,811	2,731	1,115
0,502	3,735	2,924	1,255
0,612	3,646	3,142	1,418
0,725	3,562	3,315	1,559
0,808	3,506	3,416	1,649
0,921	3,438	3,527	1,753
1,007	3,394	3,601	1,822
1,218	3,302	3,746	1,963
1,411	3,243	3,841	2,053
1,606	3,202	3,919	2,120
1,822	3,170	3,991	2,176
2,012	3,152	4,049	2,214
2,514	3,146	4,185	2,265
3,012	3,164	4,309	2,288
3,505	3,197	4,411	2,289
4,010	3,244	4,525	2,280
4,517	3,295	4,627	2,264
5,007	3,346	4,718	2,242
6,007	3,450	4,899	2,199
7,007	3,559	5,078	2,150
8,023	3,669	5,242	2,094
9,008	3,771	5,382	2,039
10,011	3,860	5,508	1,992
11,020	3,947	5,611	1,939
12,012	4,027	5,712	1,893
13,012	4,107	5,802	1,843
14,015	4,181	5,885	1,796
15,012	4,240	5,942	1,757
16,014	4,293	5,983	1,718
17,017	4,340	6,009	1,679
18,019	4,372	6,022	1,652
19,014	4,393	6,004	1,624
20,007	4,409	5,991	1,604

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
<hr/>	
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,000
B-Value (-)	0,98
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,788

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

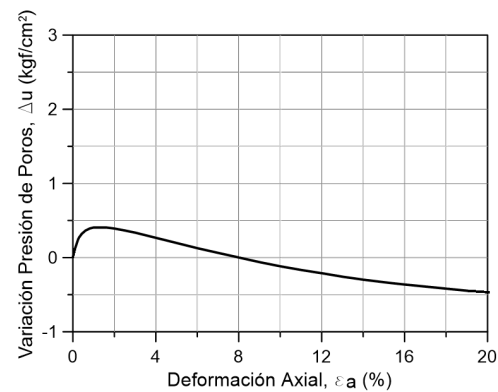
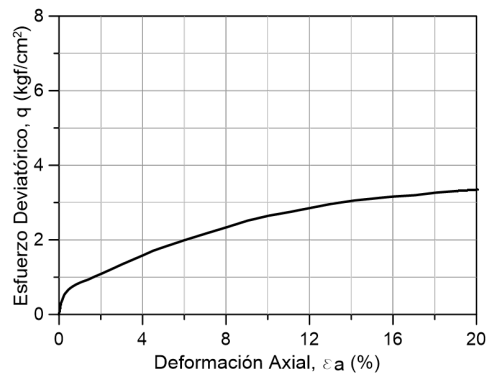
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	1,000	0,000	0,000
0,100	0,985	0,312	0,119
0,251	0,932	0,530	0,245
0,301	0,916	0,567	0,273
0,431	0,896	0,655	0,322
0,522	0,890	0,700	0,343
0,602	0,880	0,732	0,364
0,702	0,878	0,768	0,378
0,803	0,875	0,800	0,392
0,903	0,877	0,827	0,399
1,003	0,879	0,854	0,406
1,214	0,893	0,898	0,406
1,405	0,907	0,938	0,406
1,605	0,924	0,991	0,406
1,806	0,947	1,039	0,399
2,007	0,970	1,087	0,392
2,528	1,042	1,218	0,364
3,010	1,112	1,343	0,336
3,612	1,202	1,487	0,294
4,013	1,262	1,584	0,266
4,515	1,339	1,709	0,231
5,017	1,406	1,807	0,196
6,020	1,539	1,994	0,126
7,023	1,659	2,167	0,063
8,027	1,779	2,337	0,000
9,030	1,901	2,515	-0,063
10,033	2,001	2,647	-0,119
11,037	2,083	2,746	-0,168
12,140	2,173	2,867	-0,217
13,043	2,247	2,964	-0,259
14,097	2,318	3,052	-0,301
15,351	2,385	3,126	-0,343
16,053	2,418	3,162	-0,364
17,057	2,458	3,198	-0,392
18,060	2,509	3,266	-0,420
19,063	2,551	3,309	-0,448
20,067	2,584	3,346	-0,469

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,000
B-Value (-)	0,96
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,770

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

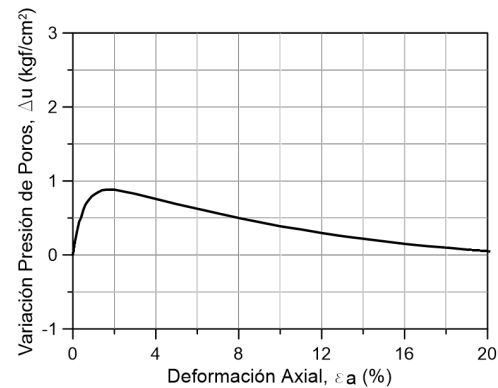
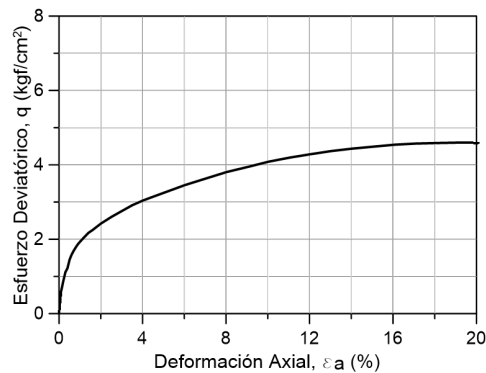
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	2,000	0,000	0,000
0,100	2,020	0,607	0,182
0,201	1,967	0,867	0,322
0,301	1,922	1,109	0,448
0,402	1,897	1,224	0,511
0,502	1,875	1,451	0,609
0,603	1,851	1,589	0,679
0,703	1,844	1,694	0,721
0,804	1,839	1,785	0,756
0,904	1,831	1,866	0,791
1,005	1,833	1,934	0,812
1,205	1,838	2,054	0,847
1,406	1,848	2,170	0,875
1,607	1,867	2,248	0,882
1,808	1,897	2,336	0,882
2,009	1,925	2,422	0,882
2,511	2,013	2,601	0,854
3,014	2,094	2,760	0,826
3,516	2,181	2,917	0,791
4,018	2,258	3,041	0,756
4,520	2,328	3,146	0,721
5,023	2,397	3,249	0,686
6,027	2,529	3,456	0,623
7,032	2,651	3,632	0,560
8,036	2,772	3,808	0,497
9,041	2,874	3,945	0,441
10,045	2,977	4,086	0,385
11,050	3,055	4,194	0,343
12,054	3,135	4,286	0,294
13,059	3,205	4,372	0,252
14,063	3,262	4,438	0,217
15,068	3,314	4,489	0,182
16,072	3,367	4,542	0,147
17,077	3,405	4,573	0,119
18,081	3,431	4,586	0,098
19,086	3,463	4,598	0,070
20,090	3,480	4,586	0,049

Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CIU - Equipo Humboldt
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)
<hr/>	
Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	4,000
B-Value (-)	0,97
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,13
Índice de Vacíos de Estrujado, e_f (-)	0,759

$$e_f = \frac{V_f - V_i + \omega_r \cdot W_d}{W_d} \cdot G_s$$

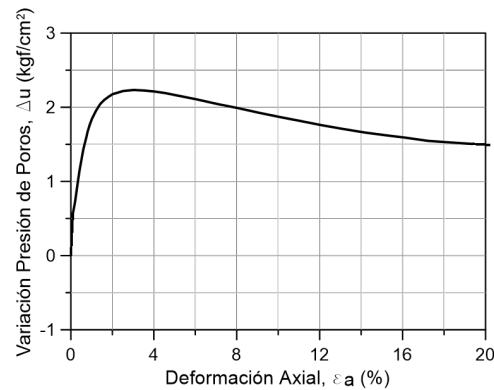
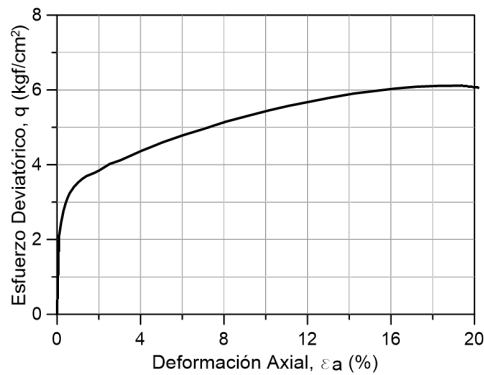
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$p' = p - \Delta u$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{6 \cdot e \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)	Δu (kgf/cm ²)
0,000	4,000	0,000	0,000
0,101	4,130	2,112	0,574
0,202	4,098	2,477	0,728
0,303	3,988	2,756	0,931
0,404	3,858	2,956	1,127
0,505	3,751	3,117	1,288
0,606	3,638	3,241	1,442
0,757	3,511	3,362	1,610
0,807	3,463	3,407	1,673
0,908	3,391	3,464	1,764
1,009	3,334	3,526	1,841
1,211	3,254	3,622	1,953
1,413	3,189	3,698	2,044
1,615	3,147	3,741	2,100
1,817	3,121	3,789	2,142
2,019	3,105	3,846	2,177
2,523	3,121	4,020	2,219
3,028	3,140	4,118	2,233
3,533	3,188	4,242	2,226
4,037	3,244	4,369	2,212
4,542	3,303	4,481	2,191
5,047	3,369	4,597	2,163
6,056	3,490	4,791	2,107
7,065	3,611	4,964	2,044
8,075	3,728	5,148	1,988
9,084	3,841	5,298	1,925
10,195	3,957	5,458	1,862
11,103	4,045	5,574	1,813
12,112	4,138	5,685	1,757
13,122	4,224	5,796	1,708
14,181	4,308	5,900	1,659
15,140	4,365	5,966	1,624
16,150	4,422	6,033	1,589
17,210	4,482	6,086	1,547
18,269	4,510	6,108	1,526
19,380	4,533	6,113	1,505
20,187	4,529	6,059	1,491

A.3. Resultados de Ensayos Triaxiales Parcialmente Saturados

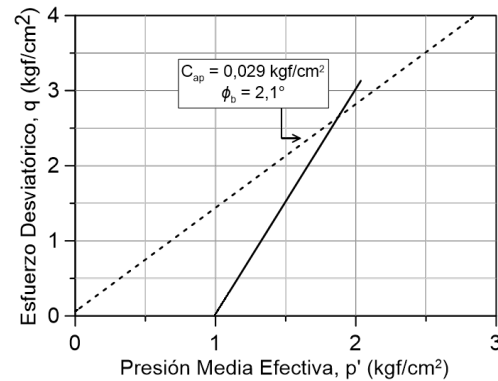
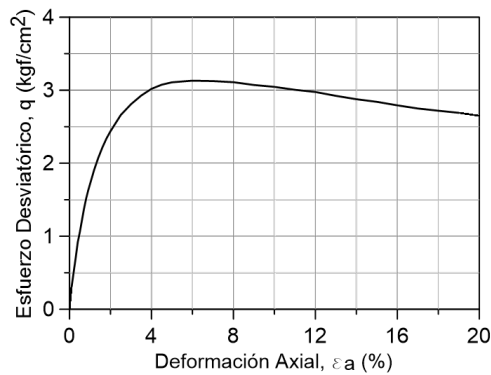
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	0,992
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,02
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	0,992	0,000
0,102	1,095	0,309
0,201	1,160	0,505
0,301	1,226	0,704
0,401	1,298	0,919
0,501	1,342	1,053
0,601	1,395	1,210
0,701	1,448	1,369
0,802	1,494	1,507
0,902	1,532	1,620
1,002	1,564	1,718
1,201	1,628	1,908
1,401	1,683	2,073
1,601	1,730	2,215
1,802	1,771	2,338
2,002	1,805	2,439
2,501	1,878	2,660
3,001	1,928	2,808
3,501	1,967	2,927
4,001	1,998	3,019
4,501	2,017	3,075
5,001	2,028	3,108
6,001	2,035	3,130
7,001	2,033	3,125
8,002	2,028	3,110
9,001	2,015	3,072
10,001	2,007	3,045
11,001	1,993	3,006
12,001	1,984	2,976
13,001	1,966	2,923
14,001	1,950	2,876
15,001	1,939	2,841
16,001	1,923	2,793
17,001	1,908	2,749
18,001	1,898	2,719
19,002	1,888	2,690
20,000	1,874	2,648

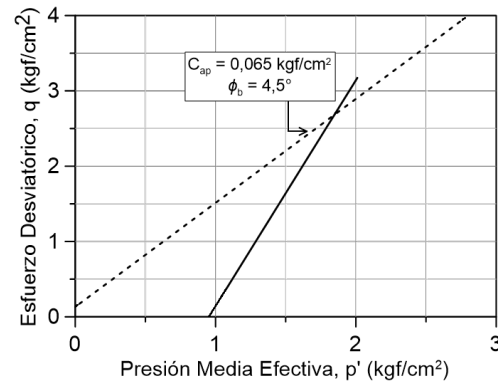
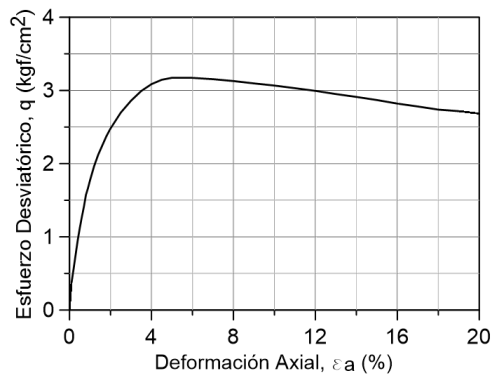
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	0,953
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,20
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	0,953	0,000
0,101	1,079	0,379
0,201	1,141	0,565
0,303	1,208	0,766
0,402	1,273	0,959
0,503	1,328	1,125
0,601	1,377	1,272
0,701	1,423	1,410
0,801	1,477	1,573
0,901	1,508	1,666
1,001	1,544	1,772
1,201	1,609	1,968
1,402	1,661	2,123
1,602	1,703	2,250
1,801	1,745	2,376
2,001	1,780	2,481
2,502	1,852	2,697
3,001	1,906	2,860
3,501	1,950	2,993
4,001	1,982	3,086
4,501	2,001	3,145
5,001	2,010	3,173
6,001	2,010	3,171
7,003	2,004	3,154
8,002	1,996	3,128
9,002	1,985	3,096
10,002	1,975	3,067
11,002	1,963	3,030
12,002	1,951	2,994
13,002	1,936	2,950
14,002	1,923	2,911
15,001	1,909	2,868
16,001	1,893	2,820
17,001	1,880	2,780
18,001	1,866	2,738
19,001	1,858	2,717
20,001	1,847	2,682

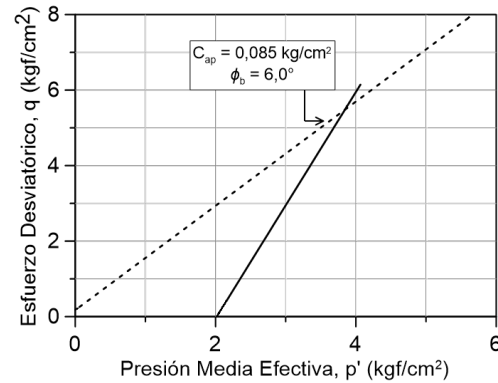
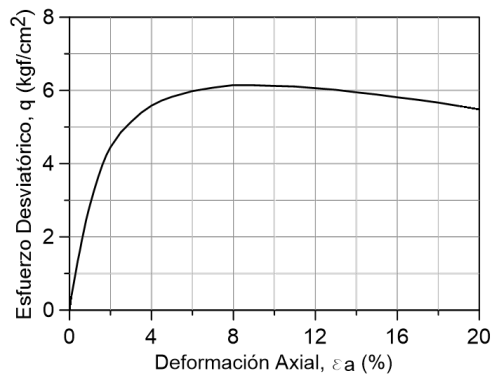
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	2,017
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,02
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	2,017	0,000
0,102	2,154	0,411
0,202	2,257	0,720
0,301	2,359	1,026
0,401	2,464	1,341
0,501	2,552	1,607
0,601	2,651	1,902
0,701	2,739	2,167
0,801	2,829	2,437
0,902	2,907	2,669
1,002	2,978	2,882
1,201	3,108	3,274
1,401	3,228	3,634
1,601	3,337	3,962
1,801	3,429	4,236
2,002	3,501	4,452
2,501	3,635	4,855
3,002	3,730	5,140
3,501	3,814	5,392
4,002	3,879	5,586
4,501	3,925	5,724
5,002	3,959	5,827
6,001	4,011	5,982
7,001	4,042	6,074
8,001	4,065	6,146
9,001	4,064	6,141
10,001	4,058	6,123
11,002	4,052	6,107
12,001	4,037	6,062
13,001	4,022	6,016
14,001	4,000	5,949
15,001	3,979	5,886
16,001	3,954	5,812
17,001	3,932	5,744
18,001	3,906	5,666
19,001	3,875	5,574
20,000	3,844	5,480

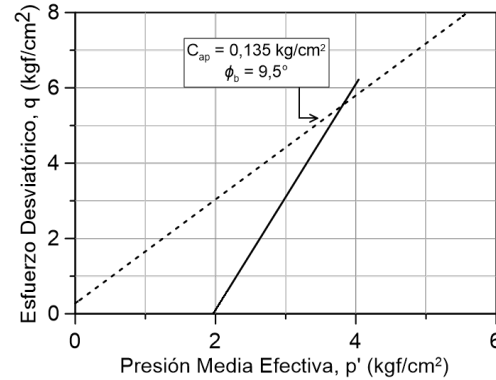
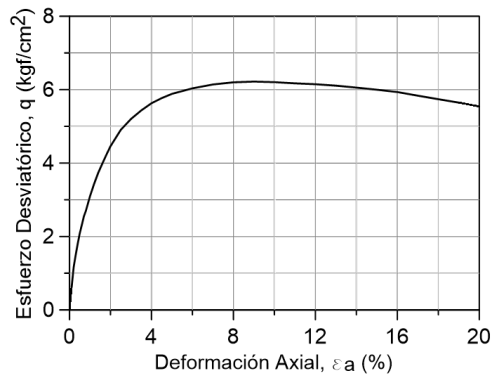
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	1,966
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,20
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	1,966	0,000
0,102	2,171	0,616
0,202	2,355	1,166
0,301	2,465	1,498
0,408	2,575	1,828
0,502	2,665	2,096
0,601	2,738	2,317
0,701	2,815	2,546
0,801	2,868	2,705
0,902	2,935	2,907
1,003	3,001	3,105
1,201	3,111	3,435
1,401	3,211	3,736
1,601	3,295	3,986
1,801	3,376	4,230
2,002	3,452	4,460
2,501	3,601	4,905
3,002	3,700	5,202
3,501	3,777	5,435
4,002	3,843	5,631
4,501	3,889	5,770
5,002	3,928	5,887
6,001	3,978	6,035
7,001	4,013	6,142
8,001	4,032	6,200
9,001	4,039	6,220
10,001	4,034	6,204
11,001	4,023	6,173
12,001	4,015	6,148
13,001	4,002	6,109
14,001	3,984	6,056
15,001	3,965	5,999
16,001	3,944	5,934
17,001	3,911	5,836
18,001	3,879	5,740
19,001	3,848	5,646
20,000	3,813	5,540

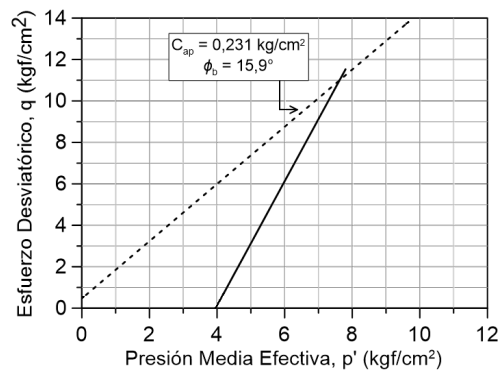
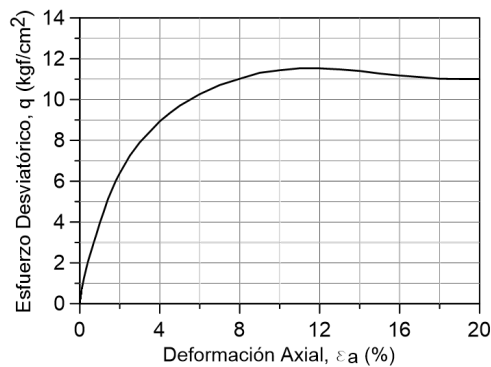
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	3,958
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,02
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	3,958	0,000
0,102	4,205	0,739
0,202	4,369	1,232
0,302	4,507	1,647
0,401	4,636	2,032
0,501	4,746	2,361
0,601	4,852	2,679
0,701	4,960	3,004
0,801	5,061	3,309
0,901	5,167	3,627
1,002	5,279	3,962
1,202	5,467	4,525
1,401	5,661	5,107
1,601	5,815	5,569
1,801	5,966	6,021
2,002	6,091	6,397
2,501	6,375	7,250
3,002	6,594	7,907
3,501	6,765	8,420
4,002	6,937	8,936
4,501	7,071	9,336
5,002	7,193	9,703
6,002	7,381	10,266
7,002	7,529	10,712
8,001	7,631	11,019
9,001	7,729	11,311
10,001	7,770	11,435
11,001	7,802	11,531
12,001	7,802	11,529
13,001	7,784	11,477
14,001	7,759	11,401
15,001	7,716	11,274
16,001	7,684	11,176
17,001	7,659	11,102
18,001	7,632	11,020
19,001	7,628	11,009
20,000	7,625	10,999

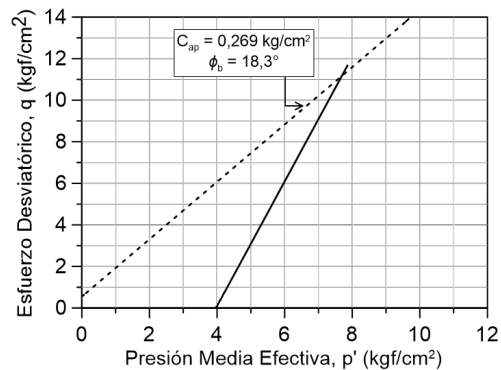
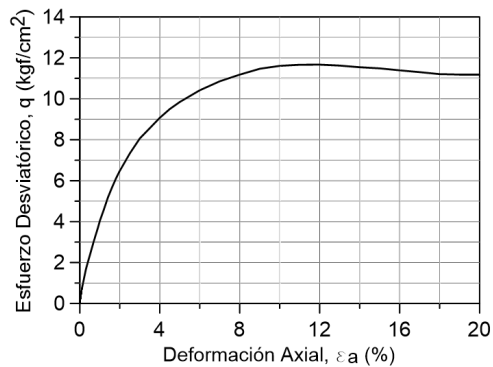
Muestra	Arena de Relave Integral (CF = 3,5 %)
Ensayo	Triaxial CID - Parcialmente Saturado
Probeta	Remoldeada (Wet Tamping)

Densidad Relativa de Confección, $DR(\%)$	60
Presión de Cámara Efectiva, σ_0 (kgf/cm ²)	3,970
Succión Matricial, $u_a - u_w$ (kgf/cm ²)	0,20
Velocidad de Deformación (mm/min)	0,00556

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma - u_a \quad \sigma_3 = \sigma_c - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad p' = p - u_a$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad N = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$$



ε (%)	p' (kgf/cm ²)	q (kgf/cm ²)
0,000	3,970	0,000
0,102	4,210	0,721
0,203	4,367	1,192
0,301	4,520	1,652
0,401	4,641	2,014
0,501	4,753	2,351
0,601	4,871	2,705
0,701	4,985	3,048
0,801	5,093	3,369
0,903	5,200	3,690
1,002	5,317	4,043
1,202	5,501	4,595
1,401	5,693	5,169
1,603	5,853	5,652
1,801	6,000	6,093
2,002	6,131	6,484
2,501	6,414	7,334
3,003	6,659	8,068
3,501	6,826	8,568
4,003	6,995	9,075
4,501	7,137	9,502
5,002	7,252	9,846
6,002	7,442	10,418
7,001	7,589	10,857
8,001	7,697	11,181
9,001	7,792	11,469
10,002	7,839	11,609
11,001	7,858	11,665
12,001	7,860	11,672
13,001	7,844	11,623
14,001	7,817	11,543
15,001	7,799	11,487
16,001	7,766	11,391
17,001	7,737	11,302
18,001	7,705	11,206
19,001	7,697	11,184
20,000	7,694	11,173