



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA
AL CORTE DRENADA DE RELAVES DE COBRE
INTEGRAL EN CONDICIONES PARCIALMENTE
SATURADAS**

JASNA DANNAE ZUÑIGA VERA

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Marzo 2024



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA
AL CORTE DRENADA DE RELAVES DE COBRE
INTEGRAL EN CONDICIONES PARCIALMENTE
SATURADAS**

Memoria de Título presentada por

JASNA DANNAE ZÚÑIGA VERA

como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía

GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

Marzo de 2024

TITULO DE LA TESIS:

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA AL CORTE
DRENADA DE RELAVES DE COBRE INTEGRAL EN CONDICIONES
PARCIALMENTE SATURADAS**

AUTOR:

JASNA DANNAE ZUÑIGA VERA

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el **Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Gonzalo Suazo Fuentealba

Gabriel Villavicencio Arancibia

Matias Silva Illanes

Valparaíso, Chile, Marzo de 2024

Dedicatoria

*A mi familia,
Jasna, Eduardo, Matías y Tomás.*

Resumen

En Chile existen un total de 764 depósitos de relaves, de los cuales un 96% corresponden a depósitos convencionales (SERNAGEOMIN, 2023), en los que los relaves se descargan con un alto contenido de agua. Lo anterior resulta en una serie de problemas de estabilidad física y química de estas obras de almacenamiento. Con el objetivo de reducir el riesgo de falla y generar procesos más sustentables, existe un interés creciente en la industria en la implementación de nuevas tecnologías de manejo de residuos, y en particular, en el uso de relaves filtrados. Esta tecnología es una de las opciones con menor incidencia en incidentes o fallas en comparación a tecnologías convencionales (Franks et al., 2021). Las principales ventajas de esta opción son que al depositar en condición parcialmente saturada es posible eliminar la necesidad de obras de contención de relaves, maximizando la recuperación y reutilización de agua, lo que facilita la implementación de actividades progresivas de cierre y rehabilitación durante etapas operativas (Cacciuttolo et al., 2023).

Un adecuado desarrollo de las etapas de diseño, construcción y operación de depósitos de relaves filtrados requiere del análisis del comportamiento geomecánico del material, y, por ende, de su comportamiento parcialmente saturado. Sin embargo, el análisis en laboratorio de la respuesta tensión-deformación bajo distintas condiciones (i.e. drenada y no drenada) y de la resistencia al corte presenta desafíos relacionados con la medición y control de la presión de poros de agua (u_w) y de aire (u_a) de manera independiente (Fredlund D. et al. 2012).

Existen diversos estudios que han buscado caracterizar la respuesta al corte de relaves filtrados en equipos convencionales con saturación de la muestra (ej. Borja et al. 2019), y sin saturación de las muestras (ej. Dong et al. 2018), como también con equipos que permiten el control y la medición de la presión de poros de aire en condición drenada (ej. Gallardo et al. 2022). La condición no drenada para aire y agua resulta difícil de replicar en laboratorio debido a la cavitación del flujo de aire en el agua. Los resultados de todos estos estudios son consistentes y muestran que existe un aumento en la resistencia al corte al comparar los valores obtenidos con muestras ensayadas bajo las mismas condiciones, pero saturadas. En general, se evidencia un incremento en resistencia al corte al aumentar succión matricial ($u_a - u_w$), lo que sería beneficioso para la estabilidad de depósitos de relaves filtrados e implementación de la tecnología. Sin embargo, estos estudios han sido desarrollados a un rango acotado de succiones matriciales y en su mayoría en relaves provenientes de la industria del hierro y oro.

En ese contexto, la presente investigación explora la respuesta geomecánica y variación de la resistencia al corte drenada de relaves de cobre filtrados mediante la ejecución de ensayos triaxiales sobre muestras parcialmente saturadas cubriendo un amplio rango de succión. Lo anterior mediante la implementación y modificación de un equipo triaxial para permitir el control de la succión matricial

y medición de la respuesta al corte del material seleccionado. Se incluye además el desarrollo de ensayos triaxiales CIU y CID en condición saturada con fines comparativos.

Los ensayos triaxiales fueron ejecutados en condición drenada tanto para la presión de poros de aire como para la presión de poro de agua, considerando muestras preparadas a un 80% de la DMCS y de dimensiones de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Con el objetivo de evaluar distintos rangos de succión matricial, se ejecutaron ensayos bajo succiones de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa a modo de evaluar puntos de distintas áreas de la SWCC (Zona de efecto de borde, Zona de transición y Zona residual). En cuanto a la presiones de confinamiento neta, se realizaron ensayos a altas presiones de 300 y 500 kPa.

Los resultados muestran que, para los valores de succión estudiados, se desarrolla un incremento en el esfuerzo desviador con el incremento de succión y con la presión de confinamiento neta. No obstante, para el caso de la succión matricial se observa que el aumento en resistencia se desarrolla hasta valores de deformación de entre el 10% al 15%. Posterior a ese valor se observa que las probetas ensayadas en estado saturado presentan una resistencia mayor. Se concluye que este comportamiento se ve influenciado por la velocidad de carga durante la etapa de corte, la que al no ser lo suficientemente lenta, no permite el drenaje de la presión de poro de agua, reduciendo la succión hacia el término de la etapa de corte, aumentando así el grado de saturación del material. De acuerdo a estudios desarrollados por diversos autores, este efecto toma mayor significancia a altos valores de succión, como el caso de las probetas ensayadas a succión de 350 kPa, las cuales mostraron una repentina pérdida de resistencia sobre el 15% de deformación.

Para valores de deformación menores al 15% se evidencio un claro aumento de la resistencia con la succión, no obstante, a altas presiones de confinamiento este aumento es menor (>200 kPa). Para el caso de las presiones de confinamiento neta estudiadas en esta investigación, el incremento en el esfuerzo desviador fue de entre el 4% al 20% a deformaciones del 10%, para valores de succión de entre 8 kPa a 350 kPa. Por otro lado, se observa que existe un incremento rápido y significativo en la resistencia al corte del relave a medida que aumenta la succión hasta alrededor de 50 kPa. Sin embargo, más allá de este punto, aunque la resistencia sigue incrementando, la tasa de aumento es menor. Este comportamiento está relacionado con las zonas de la Curva de Retención de Agua en el Suelo (SWCC). En particular, en la zona residual, aunque los valores de succión son altos y los contenidos de humedad son bajos, este efecto no parece influir significativamente en la resistencia al corte en condiciones drenadas.

En cuanto a los parámetros de resistencia al corte, se observa que no se desarrolla cohesión en ninguno de los valores de succión ensayados de acuerdo a las regresiones lineales realizada en el espacio p^{\prime} - q , lo que es consistente dada las características del material. Respecto al ángulo de fricción, si bien en condición de falla los valores son menores y se encuentran condicionados a la velocidad de carga, para valores de deformación axial de 5% y 10% se observa un incremento con el aumento en el valor de succión

Abstract

In Chile, there are 764 tailings deposits, of which 96% are conventional deposits (SERNAGEOMIN, 2023), where tailings are discharged with a high-water content. This results in a series of physical and chemical stability problems in these storage facilities. To reduce the risk of failure and generate more sustainable processes, there is a growing interest in the industry in implementing new waste management technologies, particularly in the use of filtered tailings. This technology is one of the options with the lowest incidence of incidents or failures compared to conventional technologies (Franks et al., 2021). The main advantages of this option are that by depositing in a partially saturated condition, it is possible to eliminate the need for tailings containment structures, maximizing water recovery and reuse, which facilitates the implementation of progressive closure and rehabilitation activities during operational stages (Cacciuttolo et al., 2023).

An adequate development of the design, construction, and operation stages of filtered tailings storage facilities requires the analysis of the geomechanical behavior of the material and, therefore, of its partially saturated behavior. However, laboratory analysis of stress-strain response under different conditions (i.e., drained and undrained) and shear strength presents challenges related to the measurement and control of water (u_w) and air (u_a) pore pressures independently (Fredlund D. et al., 2012).

Several studies have sought to characterize the shear behavior of filtered tailings in conventional equipment with sample saturation (e.g., Borja et al., 2019) and without sample saturation (e.g., Dong et al., 2018), as well as with equipment that allows control and measurement of air pore pressure under drained conditions (e.g., Gallardo et al., 2022). The undrained condition for air and water is difficult to replicate in the laboratory due to the cavitation of air flow in water. The results of all these studies are consistent and show an increase in shear strength when comparing values obtained with samples tested under the same conditions but saturated. In general, an increase in shear strength is evidenced by increasing matric suction ($u_a - u_w$), which would be beneficial for the stability of filtered tailings deposits and the implementation of the technology. However, these studies have been developed within a limited range of matric suctions, mostly in iron and gold tailings.

In this context, this research explores the geomechanical response and variation of drained shear strength of filtered copper tailings by conducting triaxial tests on partially saturated samples covering a wide range of suction. This was done through the implementation and modification of a triaxial apparatus to allow control of matric suction and measurement of the shear response of the selected material. It also includes the development of CU and CD triaxial tests under saturated conditions for comparative purposes.

The triaxial tests were conducted in drained condition for both air and water pore pressures, considering samples prepared at 80% of the Maximum Dry Compaction Density (DMCS) and with dimensions of 50 mm in diameter and 100 mm in height. In order to evaluate different ranges of matric suction, tests were conducted under suctions of 8 kPa, 50 kPa, and 350 kPa to evaluate points from different areas of the SWCC (Border Effect Zone, Transition Zone, and Residual Zone). As for net confining pressures, tests were performed at high pressures of 300 and 500 kPa.

The results show that, for the suction values studied, there is an increase in the deviatoric stress with increasing suction and net confining pressure. However, for the case of matric suction, it is observed that the increase in strength occurs up to deformation values between 10% and 15%. After that value, it is observed that the samples tested in a saturated state present a higher strength. It is concluded that this behavior is influenced by the loading rate during the shear stage, which, not being slow enough, does not allow the drainage of water pore pressure, reducing suction towards the end of the shear stage, thus increasing the degree of saturation of the material. According to studies developed by various authors, this effect becomes more significant at high suction values, such as the case of samples tested at 350 kPa suction, which showed a sudden loss of strength above 15% deformation.

For deformation values lower than 15%, a clear increase in strength with suction is evidenced; however, at high net confining pressures, this increase is smaller (>200 kPa). For the case of net confining pressures studied in this research, the increase in deviatoric stress was between 4% and 20% at 10% deformations, for suction values between 8 kPa and 350 kPa. On the other hand, it is observed that there is a rapid and significant increase in tailings shear strength as suction increases to around 50 kPa. However, beyond this point, although the strength continues to increase, the rate of increase is lower. This behavior is related to the zones of the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC). In particular, in the residual zone, although suction values are high and moisture contents are low, this effect does not seem to significantly influence the shear strength under drained conditions.

Regarding shear strength parameters, it is observed that no cohesion develops in any of the suction values tested according to the linear regressions performed in the p' - q space, which is consistent given the material characteristics. Regarding the friction angle, although in failure condition the values are lower and are conditioned by the loading rate, for axial deformation values of 5% and 10%, an increase is observed with increasing suction value.

Índice General

DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	15
1.1 FALLAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES	17
1.2 NUEVAS TECNOLOGÍAS	20
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA EN ESTUDIO	22
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	24
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	24
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	25
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	26
2.1 DEFINICIÓN DE SUELO PARCIALMENTE SATURADOS	26
2.1.1 <i>Curva de Retención de Agua SWCC</i>	27
2.1.2 <i>Estimación de la Curva de Retención de Agua SWCC</i>	29
2.2 RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS	31
2.2.1 <i>Expresiones en términos de parámetros tensionales p y q</i>	33
2.2.2 <i>Medición de la resistencia al corte en laboratorio</i>	34
CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE	40
3.1 PRODUCCIÓN Y DISPOSICIÓN DE RELAVES FILTRADOS	41
3.2 RESPUESTA AL CORTE DE RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS	44
3.2.1 <i>Estudios experimentales en suelos parcialmente saturados</i>	44
3.3 ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS	46
CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL	53
4.1 MATERIAL Y PROPIEDADES ÍNDICE	53
4.2 PROPIEDADES HIDRÁULICAS	55
4.2.1 <i>Curva de retención de agua</i>	55
4.2.2 <i>Permeabilidad</i>	56
4.3 RESISTENCIA AL CORTE	58
4.3.1 <i>Ensayos Triaxiales Saturados</i>	59

4.3.2	<i>Ensayos triaxiales No Saturados</i>	61
CAPÍTULO 5:	RESULTADOS	65
5.1	ENSAYOS TRIAXIALES SATURADOS	65
5.1.1	<i>Respuesta al corte</i>	65
5.1.2	<i>Parámetros resistentes y línea de estado crítico</i>	71
5.2	ENSAYOS TRIAXIALES PARCIALMENTE SATURADOS.....	73
5.2.1	<i>Succión Matricial Objetivo</i>	73
5.2.2	<i>Respuesta al corte</i>	74
5.2.3	<i>Análisis de la respuesta drenada</i>	81
CAPÍTULO 6:	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	89
6.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES	89
6.2	TRABAJOS FUTUROS	91
CAPÍTULO 7:	REFERENCIAS	93

Índice de Figuras

FIGURA 1-1: VOLUMEN DE RELAVE LIBERADO Y PÉRDIDA DE VIDAS HUMANA DEBIDO A FALLAS O INCIDENTES EN DEPÓSITOS DE RELVES DURANTE EL PERIODO ENTRE 1990 Y 2020. (SANTAMARÍA ET AL., 2019).....	17
FIGURA 1-2: FALLAS EN DEPÓSITO DE RELAVES POR CAUSA ENTRE EL PERIODO DE 1910 AL 2017 (FUENTE: MORRISON, 2022, ADAPTADO DE STRACHAN AND VAN, 2017)	18
FIGURA 1-3: FALLAS EN DEPÓSITOS DE RELAVE (A) MOUNT POLLEY, (B) SAMARCO Y (C) CÓRREGO DO FEIJAO (MORRISON, 2022)	19
FIGURA 1-4: CLASIFICACIÓN DE RELAVES POR CONTENIDO DE SÓLIDOS Y ESFUERZO DE FLUENCIA (KCB, 2017)	22
FIGURA 2-1: ELEMENTO DE SUELO PARCIALMENTE SATURADO (FREDLUND ET AL., 2012)	27
FIGURA 2-2: SWCC TÍPICA Y SUS PRINCIPALES ZONAS (FREDLUND ET AL., 2012)	28
FIGURA 2-3: SWCC PARA DISTINTOS TIPOS DE SUELO (FREDLUND ET AL., 1994)	28
FIGURA 2-4: ENFOQUES PARA LA OBTENCIÓN DE LA SWCC (FREDLUND ET AL., 2012).....	29
FIGURA 2-5: EXTENSIÓN DEL CRITERIO DE FALLA MOHR-COULOMB PARA SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS (FREDLUND ET AL., 2012).....	32
FIGURA 2-6: RELACIÓN ENVOLVENTE DE FALLA M-C Y P-Q (FREDLUND ET AL., 2012)	34
FIGURA 2-7: MODIFICACIONES DEL EQUIPO TRIAXIAL PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYOS EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS (FREDLUND ET AL., 2012)	36
FIGURA 2-8: PEDESTAL DE EQUIPO TRIAXIAL PARA ENSAYOS EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS (FREDLUND ET AL., 2012).....	37
FIGURA 3-1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL PROCESO DE MANEJO DE RELAVES FILTRADOS (CACCIUTTOLO ET AL., 2023).....	42
FIGURA 3-2: DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS, MINA LA COIPA, CHILE (CACCIUTTOLO ET AL., 2023)	42
FIGURA 3-3: BANDAS GRANULOMÉTRICAS POR TIPO DE RELAVE (ICOLD., 2021)	44
FIGURA 3-5: RESULTADOS DE ENSAYOS CONSOLIDADOS DRENADOS EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS (FREDLUND ET AL., 2012).....	45
FIGURA 3-6: RESULTADOS DE ENSAYOS A VOLUMEN DE AGUA CONSTANTE EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS (FREDLUND ET AL., 2012).....	46
FIGURA 3-7: (A) ESFUERZO DESVIADOR Y (B) EXCESO DE PRESIÓN DE POROS VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL PARA TRIAXIALES CU EN RELAVES FILTRADOS (BORJA ET AL. 2020).....	47
FIGURA 3-8: RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE (c , ϕ) Y CONTENIDO GRAVIMÉTRICO DE AGUA (w) PARA RELAVES FINOS PARCIALMENTE SATURADO (DONG ET AL. 2018)	48
FIGURA 3-9: CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE RELAVES FINOS PARCIALMENTE SATURADOS CON DIFERENTE CONTENIDO DE HUMEDAD (DONG ET AL. 2018).....	49
FIGURA 3-10: SWCC A DENSIDADES SECAS DE (A) 16.5 kN/m ³ Y (B) 17.5 kN/m ³ (GALLARDO ET AL. (2022) ..	50
FIGURA 3-11: RESULTADOS TRIAXIALES CD A DENSIDAD SECA DE 16.5 kN/m ³ . (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P-Q, (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA	

VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (D) DIAGRAMA P VERSUS RELACIÓN DE VACÍOS (GALLARDO ET AL. (2022))	51
FIGURA 3-12: RESULTADOS TRIAXIALES CD A DENSIDAD SECA DE 17.5 kN/M ³ . (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P-Q, (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (D) DIAGRAMA P VERSUS RELACIÓN DE VACÍOS (GALLARDO ET AL. (2022))	52
FIGURA 4-1: ESQUEMA EQUIPO TRIAXIAL Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES (FUENTE: HTTPS://WWW.GDSINSTRUMENTS.COM/).....	59
FIGURA 4-2: PROBETA DE RELAVES PARA EJECUCIÓN DE ENSAYOS TRIAXIALES	60
FIGURA 4-3: PROBETA DE RELAVES PARA EJECUCIÓN DE ENSAYOS TRIAXIALES (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	62

Índice de Gráficos

GRÁFICO 1-1: CATASTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE. (FUENTE: CDR SERNAGEOMIN, 2023).....	16
GRÁFICO 4-1: DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL RELAVE EN ESTUDIO	54
GRÁFICO 4-2: DENSIDAD COMPACTADA SECA VERSUS HUMEDAD – PROCTOR MODIFICADO	55
GRÁFICO 4-3: CURVA CARACTERÍSTICA DEL SUELO (SWCC) PARA EL RELAVE EN ESTUDIO	56
GRÁFICO 4-4: PERMEABILIDAD VERSUS PRESIÓN DE CONFINAMIENTO.....	57
GRÁFICO 4-5: PERMEABILIDAD VERSUS SUCCIÓN MATRICIAL.....	58
GRÁFICO 5-1: (A) ESFUERZO DESVIADOR, (B) EXCESO DE PRESIÓN DE POROS, Y (C) RAZÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES EFECTIVOS (C) VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CIU EN RELAVE EN CONDICIÓN SATURADA	67
GRÁFICO 5-2: TRAYECTORIA DE TENSIONES P^{\prime} - Q DE ENSAYOS TRIAXIALES CIU EN RELAVES EN CONDICIÓN SATURADA.....	68
GRÁFICO 5-3: A) ESFUERZO DESVIADOR Y (B) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA, VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CID EN RELAVE EN CONDICIÓN SATURADA	69
GRÁFICO 5-4: TRAYECTORIA DE TENSIONES – ENSAYOS CID EN RELAVES EN CONDICIÓN SATURADA	69
GRÁFICO 5-5: ENVOLVENTE DE FALLA P^{\prime} -Q Y PARÁMETROS RESISTENTES DEL RELAVE	72
GRÁFICO 5-6: RELACIÓN DE VACÍOS E VERSUS ESFUERZO MEDIO EFECTIVO PARA RELAVE – LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO CSL	73
GRÁFICO 5-7: SWCC Y PUNTOS DE SUCCIÓN MATRICIAL PARA ENSAYOS TRIAXIALES PARCIALMENTE SATURADOS.....	74
GRÁFICO 5-8: (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P^{\prime} -Q (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CID EN RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS CON SUCCIÓN MATRICIAL DE 8 kPa.....	77
GRÁFICO 5-9: (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P^{\prime} -Q (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CID EN RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS CON SUCCIÓN MATRICIAL DE 50 kPa.....	78
GRÁFICO 5-10: (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P^{\prime} -Q (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CID EN RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS CON SUCCIÓN MATRICIAL DE 350 kPa.....	79
GRÁFICO 5-11: ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL A PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y CONFINAMIENTO NETA DE 300 kPa.....	83
GRÁFICO 5-12: (A) ESFUERZO DESVIADOR VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL, (B) TRAYECTORIA DE TENSIONES P^{\prime} -Q (C) DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA VERSUS DEFORMACIÓN AXIAL EN ENSAYOS TRIAXIALES CID EN RELAVES PARCIALMENTE SATURADOS CON SUCCIÓN MATRICIAL DE 350 kPa.....	83
GRÁFICO 5-13: ESFUERZO DESVIADOR VERSUS SUCCIÓN MATRICIAL.....	84
GRÁFICO 5-14: ESFUERZO MEDIO NETO VERSUS SUCCIÓN MATRICIAL	84
GRÁFICO 5-15: ENVOLVENTE DE FALLA P^{\prime} -Q, SUCCIÓN DE 8 kPa.....	85

GRÁFICO 5-16: ENVOLVENTE DE FALLA P^* -Q, SUCCIÓN DE 50 KPA.....	86
GRÁFICO 5-17: ENVOLVENTE DE FALLA P^* -Q, SUCCIÓN DE 50 KPA.....	86
GRÁFICO 5-18: ENVOLVENTE DE FALLA P^* -Q, SUCCIÓN DE 50 KPA.....	87
GRÁFICO 5-19: E VERSUS P^* - CSL	88

Índice de Tablas

TABLA 1-1: CLASIFICACIÓN DE RELAVES SEGÚN ESFUERZO DE FLUENCIA (ULRICH, B. 2019)	21
TABLA 2-1: TIPOS DE ENSAYO TRIAXIAL EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y SUS CARACTERÍSTICAS (FREDLUND ET AL., 2012).....	39
TABLA 3-1: TIPOS DE RELAVES (ICOLD, 2021)	43
TABLA 4-1: PROPIEDADES ÍNDICE DEL RELAVE EN ESTUDIO.....	55
TABLA 4-2: PARÁMETROS DE AJUSTE PARA SWCC – MODELO VAN GENUCHTEN	56
TABLA 4-3: PROGRAMA DE ENSAYOS TRIAXIALES CID Y CIU SOBRE RELAVES EN CONDICIÓN SATURADA	61
TABLA 4-4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DISCO CERÁMICO (FUENTE: HTTPS://WWW.SOILMOISTURE.COM/)	61
TABLA 4-5: PROGRAMA DE ENSAYOS TRIAXIALES CID SOBRE RELAVES EN CONDICIÓN PARCIALMENTE SATURADA.....	64
TABLA 5-1: RESULTADOS ENSAYOS TRIAXIALES SATURADOS.....	70
TABLA 5-2: SUCCIÓN MATRICIAL Y CONTENIDO DE HUMEDAD – TRIAXIALES PARCIALMENTE SATURADOS.....	74
TABLA 5-3: RESULTADOS ENSAYOS TRIAXIALES SATURADOS.....	80

CAPÍTULO 1: Introducción

Chile es uno de los principales productores mineros a nivel mundial debido a los múltiples yacimientos y reservas de minerales distribuidas a lo largo del territorio y a las altas tasas de producción de concentrados minerales de las principales compañías mineras del país. De acuerdo a información obtenida de Consejo Minero (<https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>), la participación de Chile en la producción mundial de cobre y molibdeno es del 25% y 18%, respectivamente, posicionando al país como primero y segundo en el ranking de producción mundial para ambos minerales, para cada mineral, respectivamente. Adicionalmente, de acuerdo a cifras publicadas por el Servicio Nacional de Minería y Geología (SERNAGEOMIN), para el año 2022, la producción de cobre anual alcanzó las 5,376,631 toneladas métricas y para el caso del molibdeno las 45,551 toneladas métricas, contribuyendo con lo anterior en un 14.2% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional (Anuario minería 2022, SERNAGEOMIN).

La producción de concentrados minerales trae consigo la generación de residuos mineros, los cuales son generados a partir de los distintos procesos físicos y químicos necesarios para la obtención de minerales de alta ley. Entre los principales residuos se encuentran el material estéril de mina y los relaves, que corresponden al material de estudio de la presente investigación.

En particular, la minería de cobre extrae cantidades significativas de roca desde el yacimiento en explotación, de las cuales se separa aproximadamente un 1% que corresponde a la fracción con valor económico. Para obtener dicha fracción correspondiente al concentrado de cobre u otro mineral, la roca atraviesa por procesos físicos, como el chancado y la molienda, para reducir el tamaño de la roca; y procesos químicos, como la flotación, para separar el material de interés o de valor del resto de la roca. El material restante sin interés económico denomina relave, y corresponde a un material

sólido finamente molido, que, dependiendo de los procesos específicos de cada compañía minera, viene acompañado de un volumen de agua y compuestos químicos.

Debido al nivel de producción de concentrado de cobre, en Chile la tasa de generación de relaves es significativa. De acuerdo a estadísticas del SERNAGEOMIN, se estima que, en Chile, las faenas mineras generan relaves a una tasa de 530 millones de toneladas al año, acumulando 24 mil millones de toneladas en territorio nacional, las cuales son almacenadas en instalaciones de relave a lo largo del país (Anuario de la Minería de Chile, SERNAGEOMIN 2022).

De acuerdo con el catastro de relaves de SERNAGEOMIN realizado en 2023, existen actualmente 764 depósitos de relave distribuidos a lo largo del país, siendo en su mayoría Tranques de relave (80%) y Embalses (16%), correspondientes estrategias de depositación convencional. Se observa en menor medida otras tecnologías de depositación que permiten la disposición de relaves con menor contenido de agua, como lo son los depósitos de relave filtrados, espesados y en pasta. Adicionalmente se destaca que solo un 14% del total de instalaciones se encuentra en estado activo, es decir, con depositación, y el 85% restante se encuentra en estado de abandono o inactividad. El Gráfico 1-1 presenta la distribución por tipo de depósito de las instalaciones de relave en Chile (Fuente: SERNAGEOMIN).

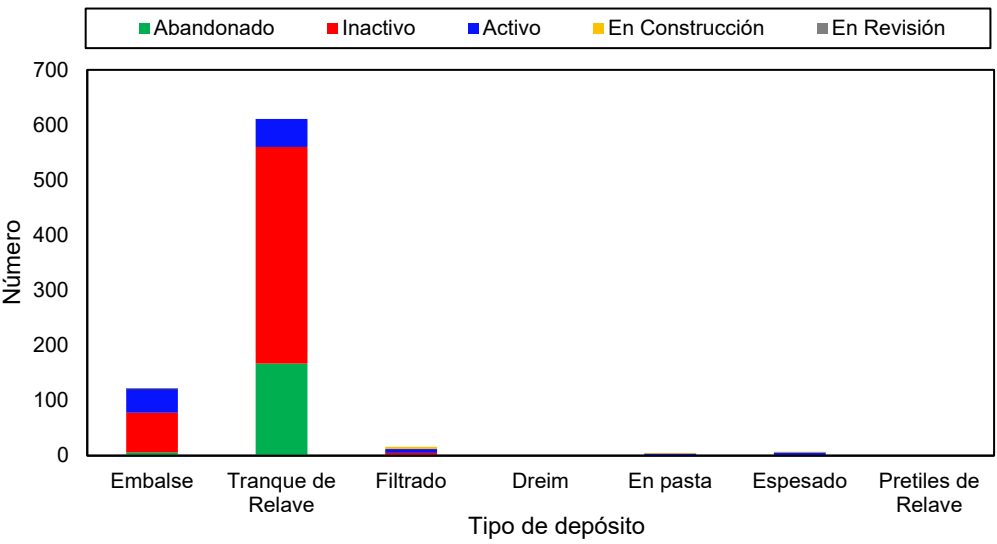


Gráfico 1-1: Catastro de depósitos de relaves en Chile. (Fuente: CDR SERNAGEOMIN, 2023)

Las estrategias de depositación convencional, que corresponden al método de disposición más utilizado en Chile, se caracterizan por depositar y almacenar relaves con un alto contenido de agua debido al proceso de obtención de concentrado, facilitando así el transporte del material desde planta al punto de disposición mediante sistemas hidráulicos. No obstante, diversas problemáticas asociadas a inestabilidad física y química de las instalaciones de relaves son atribuidas al alto contenido de agua, razón por la cual la industria ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan una mayor recuperación de agua, mejorando la seguridad de las instalaciones.

1.1 Fallas en depósitos de relaves

Debido a la envergadura de las instalaciones de relaves en términos de volumen y características del material almacenado, las fallas de estas estructuras representan un riesgo significativo para el medioambiente y las comunidades en las que se encuentran inmersas. Durante las últimas décadas el incremento en las fallas de depósitos de relave con altas consecuencias ha incrementado. De acuerdo a Owen et al. (2020), a nivel global, se han reportado 63 fallas en instalaciones de relave en los últimos 50 años, observándose una tendencia al alza en eventos de falla catastróficas de altas consecuencias desde el año 1990, por lo que se estima que la tasa de fallas posterior al año 2000 ha aumentado a una frecuencia de cinco a seis fallas catastróficas anuales en depósitos de relave. Lo anterior ha despertado en la industria y los distintos stakeholders la preocupación y la necesidad de desarrollar estrategias de gestión que permitan reducir el riesgo de estas instalaciones y las consecuencias de eventos de fallas y/o incidentes.

En términos generales una falla catastrófica puede definirse como una pérdida de contención de los relaves almacenados, a causa de una rotura o brecha, produciéndose una liberación significativa de volumen de material, el cual escurre aguas abajo, impactando en el medioambiente y las comunidades. La Figura 1-1 muestra el volumen de relaves liberado producto de fallas en depósitos de relave alrededor del mundo durante el periodo entre 1910 y 2020, y las pérdidas de vidas humanas por consecuencia de estos eventos (Santamaría et al., 2019). Como se observa, al igual que el incremento en la cantidad de eventos, las consecuencias en el medio ambiente y las comunidades ha incrementado producto del aumento en los volúmenes de relave liberado.

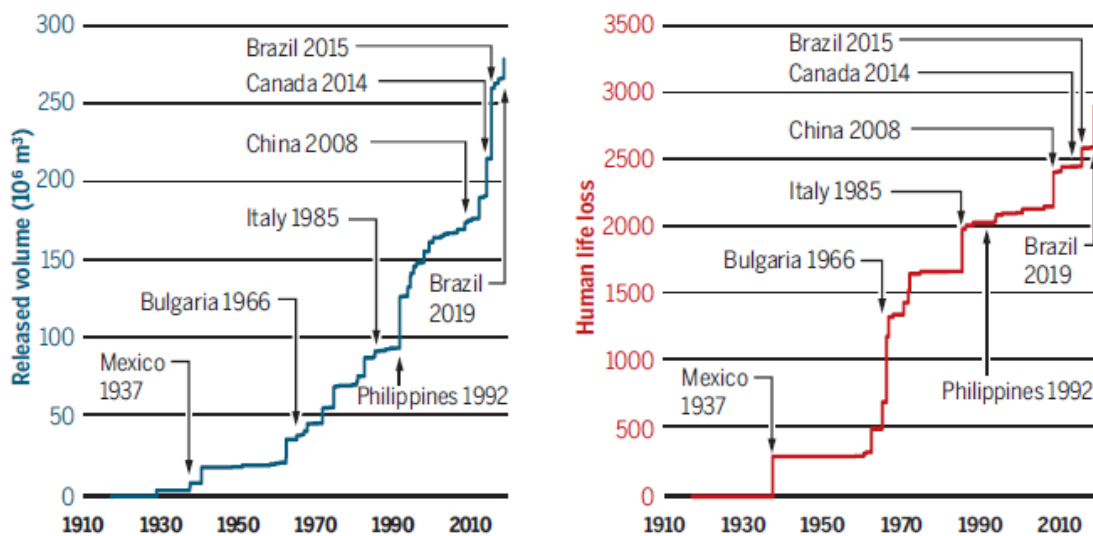


Figura 1-1: Volumen de relave liberado y pérdida de vidas humana debido a fallas o incidentes en depósitos de relaves durante el periodo entre 1910 y 2020. (Santamaría et al., 2019)

La ocurrencia de estos eventos despierta la interrogante sobre cuáles son las principales causas de las fallas o incidentes asociados a la estabilidad de depósitos de relaves. Strachan et al. en 2018 (Strachan et al. 2018) consolidaron información histórica sobre fallas e incidentes en depósitos de relave, determinando los componentes claves atribuibles a las causas de estos eventos, considerando data para el periodo comprendido entre 1910 hasta el 2017. La data fue obtenida principalmente de organizaciones internacionales como ICOLD, USCOLD y U.S Bureau of Reclamation. La Figura 1-2 ilustra la cantidad de fallas en depósitos de relaves por causa para el periodo entre 1910 y 2017. Como se observa, factores asociados a inestabilidad de taludes, eventos sísmicos y rebalse (Overtopping en inglés) son los mecanismos de mayor recurrencia; un aspecto común que influencia en gran medida el desarrollo de estos mecanismos de falla es la inadecuada o insuficiente gestión del agua.

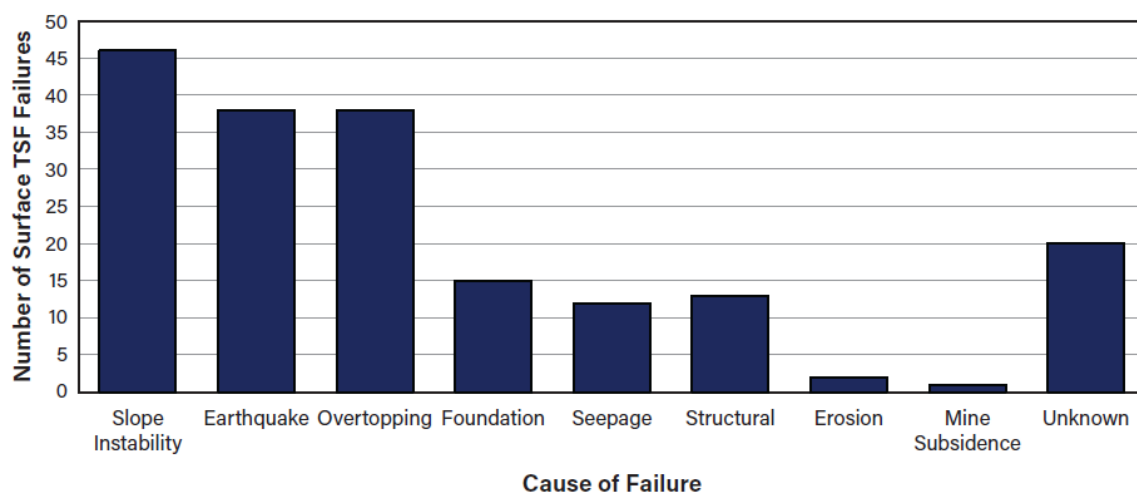


Figura 1-2: Fallas en depósito de relaves por causa entre el periodo de 1910 al 2017 (Fuente: Morrison, 2022, adaptado de Strachan and Van, 2017)

Chile no ha estado exento de eventos de falla en instalaciones de relave. Los depósitos más comunes en Chile, corresponden a los depósitos de relaves convencionales con muros construidos con arenas de relaves, los que representan un alto riesgo en términos de estabilidad física (Villavicencio et al. 2013). Las principales causas de eventos de falla en el país corresponden a eventos sísmicos, los cuales han ocasionado licuefacción sísmica en los muros ocasionando fallas de flujo, inestabilidad de taludes y en algunos casos el rebalse de la instalación. Dentro de las fallas de mayores consecuencias se encuentran la falla del depósito Barahona en 1928, producto del terremoto de Talca, en la Región del Maule; la falla del depósito El Cobre en 1965 como consecuencia del evento sísmico ocurrido La Ligua, Región de Valparaíso y la falla del depósito Las Palmas en el año 2010, ubicado en la Región del Maule, el cual presentó licuefacción y falla de flujo como consecuencia del terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010.

Resulta importante destacar que la industria en Chile ha reaccionado rápidamente ante estos eventos de falla impulsando cambios significativos en normativas y regulaciones. Posterior a la falla del

depósito El Cobre, durante el año 1970 fue promulgado el Decreto Supremo N°86, el cual incluyó requerimientos relacionados con la granulometría de los materiales utilizados para la construcción de muros de contención, el grado de compactación de estos materiales, la prohibición de la construcción de depósitos mediante el método de aguas arriba y la necesidad de evaluar la distancia peligrosa o la trayectoria del flujo de relaves aguas abajo en caso de una eventual falla.

A lo largo del tiempo, similar al caso de Chile, la ocurrencia de fallas de gran envergadura ha movilizado a la industria minera en los diferentes países a realizar cambios en las normativas que regulan la obtención de permisos para la operación de depósitos de relave, los requisitos de diseño y construcción y los requerimientos de cierre para estas instalaciones, que han apuntado a minimizar los impactos que tienen estas estructuras en el medioambiente y en la vida de las personas. No obstante, lo anterior, en la última década, se registraron tres fallas catastróficas con consecuencias severas (Morrison, 2022):

- Falla del depósito de relaves Mount Polley en agosto del 2014, ubicado en British Columbia, Canadá. Debido a la falla, fueron liberados 4.5 millones de m³ de relaves y 10 billones de litros de agua al medioambiente.
- Falla del depósito de relaves Fundao en Noviembre de 2015, ubicado en Mina Gerais, Brasil. Se estima que, debido a la falla, 43 millones de m³ de relaves fueron liberados aguas debajo de la instalación, dejando como consecuencia la pérdida de 19 vidas y la contaminación de 668 km de cursos de agua.
- Falla del depósito de relaves Dam 1 de la mina Córrego do Feijão, ubicado Mina Gerais, Brasil. Debido a la falla, fueron liberados 12 millones de m³ de relaves y material de muro, dejando como consecuencia la muerte de 270 personas, incluidos trabajadores de la compañía minera.

La Figura 1-3 presenta fotografías de las fallas anteriormente mencionadas.



Figura 1-3: Fallas en depósitos de relave (A) Mount Polley, (B) Samarco y (C) Córrego do Feijao (Morrison, 2022)

Debido a las severas consecuencias de la falla de Córrego do Feijão el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM por sus siglas en inglés), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) y los Principios para la Inversión Responsable (PRI por sus siglas en inglés) desarrollaron el Estándar Global para la Gestión de Relaves (GISTM por sus siglas en inglés), el cual tiene por objetivo final el cero daño a las personas y al medio ambiente con tolerancia cero ante la pérdida de vidas humanas, previniendo fallas catastróficas y mejorando la seguridad de las instalaciones de relaves mineros en todo el mundo. Dentro de los protocolos de conformidad del GISTM, se encuentra el requerimiento de que el operador de mineras impulse, para nuevos depósitos, el uso de tecnologías que minimicen los volúmenes de agua y relaves almacenados en superficies (ICMM, 2021). De acuerdo a la investigación desarrollada por William (2021), la implementación de nuevas tecnologías, especialmente aquellas que reducen el contenido de agua en los relaves, podría contribuir en gran medida a la reducción y eliminación de los riesgos, permitiendo abordar problemáticas asociadas a la estabilidad física y química.

1.2 Nuevas tecnologías

En las últimas décadas la industria ha desarrollado e implementado diversas tecnologías de depositación con menor contenido de agua almacenado en los depósitos (ICOLD, 2019). Dentro de las tecnologías con mayor desarrollo y con resultados exitosos a nivel global se encuentran los relaves espesados, relaves en pasta y relaves filtrados. A continuación, una breve descripción de estas tecnologías, incluyendo además la descripción de los depósitos de relave convencional.

- **Relaves convencionales:** como se comentó anteriormente, los relaves por lo general son producidos por procesos de flotación usados para la separación del mineral con valor económico del resto de la roca. Como resultado de este proceso el residuo o relave generado corresponde a una pulpa con concentraciones o contenido de sólidos en peso que varían entre el 15% al 50%, dependiendo de la minera y su respectivo proceso productivo (ICOLD, 2019). El transporte de este tipo de relaves desde planta hasta el depósito se realiza mediante tuberías o canales abiertos, y la descarga se realiza mediante spigot o puntos de descarga los que pueden ser subaéreos o subacuáticos. El relave se deposita en estado suelto tras una estructura de contención que asegura su almacenamiento.

Este tipo de depositación por lo general genera segregación del material: las partículas de relave más gruesas decantan cercanas al punto de descarga y el material fino se transporta con el flujo de la descarga, generando playas con pendientes. El agua liberada durante el proceso de segregación y consolidación de los relaves en el depósito es recolectada en una laguna en la superficie, desde donde, en la mayoría de los casos, es resguardada y retornada al proceso (KCB, 2017)

- **Relaves espesados y relaves en pasta:** la producción de este tipo de relaves incluye un proceso de desaturación mediante espesadores, el cual es realizado previo a la depositación. Luego del proceso de flotación, la pulpa generada pasa por un proceso de espesamiento en tanques abiertos de acero de gran diámetro, que busca acelerar el proceso de sedimentación de los sólidos de la pulpa de relaves, mediante un rastrillo interno giratorio. Los relaves sedimentados salen a través del flujo inferior del espesador y son bombeados y transportados hacia los puntos de descarga. Por otro lado, se produce un desbordamiento superior en el tanque o espesador del agua recuperada en el proceso de espesado, la que es por lo general retornada a la planta para reutilizarla en el proceso. El contenido de sólidos final de la pulpa dependerá de las características del equipo espesador, de las características de los sólidos (granulometría, mineralogía, gravedad específica, entre otros) y del uso de floculantes. No obstante, para este tipo de relaves, el contenido de sólidos en peso se encuentra en el rango de 40% a 75%.
- **Relaves Filtrados:** para producir este tipo de relaves, la pulpa generada en la flotación es desaturada mediante procesos de espesado y filtrado. Existen tres tipos de filtros principales que son usados en minería: filtros de presión, que inyectan la pulpa a presión en una serie de cámaras permitiendo la liberación del agua contenida en la pulpa, filtros de disco cerámico que por capilaridad permiten la eliminación de agua y finalmente los filtros de prensa y vacío. La humedad alcanzada mediante el proceso de filtrado varía entre el 10% y 20%. Este rango de humedad permite generar depósitos en seco o los denominados drystack que no requieren estructuras u obras de contención para permitir el almacenamiento de los residuos.

Adicionalmente al contenido de sólidos, el esfuerzo de fluencia o yield stress es comúnmente utilizado para establecer valores o intervalos límites para cada uno de estos tipos de relave (Ulrich, B. 2019). El esfuerzo de fluencia corresponde a la cantidad de esfuerzo que un fluido necesita para empezar a fluir como un líquido deformable. La Tabla 1-1 presenta los intervalos de valores para la clasificación de relaves basada en el esfuerzo de fluencia.

Finalmente, la Figura 1-4 ilustra esquemáticamente la clasificación de relaves basada en contenido de sólidos de la pulpa y basada en el esfuerzo de fluencia. Como se observa a medida que aumenta el contenido de sólidos producto de la desaturación, hay un incremento en el esfuerzo de fluencia, lo que tiene efectos significativos en la capacidad de fluir de los relaves, por ejemplo, aguas abajo ante un evento de falla.

Tabla 1-1: Clasificación de relaves según esfuerzo de fluencia (Ulrich, B. 2019)

Clasificación de Relave	Esfuerzo de Fluencia (Pa)
Relave convencional	< 5 a 20
Relave espesado	20 a 100

Clasificación de Relave	Esfuerzo de Fluencia (Pa)
Relave en pasta	100 a 800
Relave Filtrado	> 800

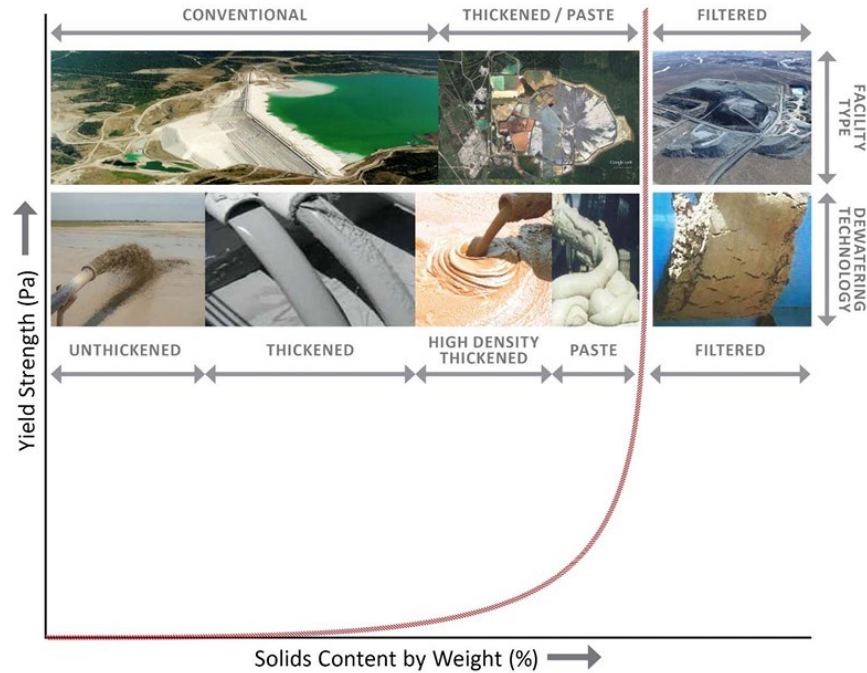


Figura 1-4: Clasificación de relaves por contenido de sólidos y esfuerzo de fluencia (KCB, 2017)

1.3 Definición del problema en estudio

Como se presentó inicialmente, las estrategias de depositación y almacenamiento de relaves tradicionales, como lo son los depósitos convencionales, representan un riesgo para el medio ambiente y las comunidades en las que se encuentran inmersos, debido a las problemáticas asociadas a la estabilidad física y química, las cuales están relacionadas con la cantidad significativa de agua que almacenan estas obras. El agua contribuye de manera significativa en el desarrollo de mecanismos de falla y en las consecuencias aguas debajo de los depósitos de relaves ante una eventual rotura, ya que pulpas de relave con mayor contenido de agua presentan una mayor fluencia.

Como respuesta a las fallas catastróficas ocurridas en las últimas década, la industria ha impulsado estrategias y tecnologías de manejo de relaves que reducen el contenido de agua de la pulpa como parte de sus procesos. Mediante estrategias de desaturación, como procesos de espesados y/o filtrado, se extrae agua de la pulpa, dando origen a los relaves espesados, en pasta y relaves filtrados.

Adicionalmente a la ventaja en la recuperación y reutilización de agua, estas estrategias han demostrado un mejor desempeño en términos de estabilidad física y química, especialmente los relaves filtrados.

Los depósitos de relaves filtrados son una de las opciones con menor incidencia en incidentes o fallas en comparación a otras tecnologías (Franks et al., 2021), siendo una de las alternativas más beneficiosas en términos de la estabilidad física. Dentro de las principales ventajas de estas tecnologías se encuentran las siguientes (Cacciuttolo et al., 2023):

- Al depositar en condición parcialmente saturada es posible eliminar la necesidad de obras de contención de relaves.
- Maximiza la recuperación de agua de la pulpa a partir de los procesos de filtrado, la que posteriormente es reutilizada en el proceso productivo.
- Las instalaciones de relave necesarias para almacenar relaves filtrados son de menor dimensión que otras tecnologías ya que no se deposita en condición de pulpa o saturación.
- Se facilita la implementación de actividades progresivas de cierre y rehabilitación durante etapas operativas

No obstante, las ventajas indicadas, para alcanzar los grados de saturación objetivos para los relaves filtrados que van entre el 60% a 80% (Davies, 2011), la pulpa de relaves requiere pasar por procesos de espesado y filtrado que elevan los costos capitales en comparación a las estrategias convencionales. Debido a lo anterior resulta relevante conocer en detalle los beneficios en términos de estabilidad física y química, y los impactos de esta alternativa en el ciclo de vida de la instalación.

Una adecuado desarrollo de las etapas de diseño, construcción y operación requiere del análisis del comportamiento geomecánico del relave filtrado y, por ende, del comportamiento parcialmente saturado del material. Sin embargo, el análisis en laboratorio de la respuesta tensión-deformación bajo distintas condiciones (i.e. drenada y no drenada) y de la resistencia al corte presenta desafíos relacionados con la medición y control de la presión de poros de agua (u_w) y de aire (u_a) de manera independiente (Fredlund D. et. al. 2012).

Existen diversos estudios que han buscado caracterizar la respuesta al corte de relaves filtrados en equipos triaxiales convencionales con saturación de la muestras como los desarrollados por Borja et al. (2019); estudios que han utilizado equipos triaxiales convencionales, pero sin saturación de las muestras como los llevados a cabo por Dong et al. (2018); y estudios avanzados con equipos que permiten el control y la medición de la presión de poros de aire en condición drenada como los desarrollados por Gallardo et al. (2022). La condición no drenada para aire y agua resulta difícil de replicar en laboratorio debido a la cavitación del flujo de aire en el agua.

Los resultados de estos estudios son consistentes y muestran que existe un aumento en la resistencia al corte al comparar los valores obtenidos con muestras ensayadas bajo las mismas condiciones, pero saturadas. En general, se evidencia un incremento en resistencia al aumentar succión matricial ($u_a - u_w$), sin embargo, aspectos como la densidad inicial y la presión de confinamiento neta condicionan la respuesta. Pese a los estudios y sus resultados, las investigaciones siguen siendo limitadas al no explorar diferentes valores de succión y la respuesta a altas presiones de confinamiento, lo que puede resultar relevante dada las dimensiones de los depósitos de relave.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es caracterizar experimentalmente la respuesta al corte drenada y el comportamiento tensión-deformación de relaves de cobre en condiciones parcialmente saturadas, considerando diferentes variables de estado, en particular, diferentes valores de succión matricial y de presión de confinamiento neta.

1.4.2 Objetivos específicos

A continuación, se detallan algunos de los objetivos específicos de la investigación:

- Evaluar y analizar el comportamiento de relaves en condición saturada imponiendo diferentes variables de estado, a modo de establecer una adecuada base de comparación respecto a las potenciales mejoras en el comportamiento geomecánico de relaves en condición parcialmente saturada.
- Implementar y poner en marcha un equipo triaxial que permita la ejecución de ensayos parcialmente saturados, mediante la adaptación de un equipo triaxial convencional.
- Evaluar, a partir de los resultados de ensayos triaxiales parcialmente saturados, los principales parámetros que controlan que caracterizan la respuesta al corte drenada y el comportamiento tensión-deformación, entre ellos, el ángulo de fricción y la cohesión.
- Construir, a partir de los resultados, la línea de estado crítico del suelo, en condición no saturada.
- A partir de los resultados y el análisis anteriormente mencionado, establecer comparaciones en la respuesta observada de relaves de cobre saturados y parcialmente saturado, a modo de concluir respecto a las mejoras en el desempeño geomecánico.

-
- Extrapolar los resultados obtenidos a la implementación de nuevas tecnologías de depositación de relaves, como depósitos de relaves filtrados, concluyendo respecto a las potenciales mejoras de estas estructuras en términos de desempeño geomecánico y destacando los principales desafíos en etapas de diseño, construcción y operación.

1.5 Estructura de la tesis

A continuación, se presenta una breve descripción de los 7 capítulos que conforman esta tesis:

- **Capítulo 1:** Introducción. Presenta el contexto y fundamenta el problema del estudio.
- **Capítulo 2:** Marco Teórico. Presenta la base teórica de los suelos parcialmente saturados y las consideraciones de la respuesta al corte bajo distintas condiciones.
- **Capítulo 3:** Estado del arte. Presenta el estado del arte de suelos parcialmente saturados, metodología y procedimientos de ensayo para el estudio de la respuesta al corte de suelos en dicha condición y los estudios e investigaciones realizadas para caracterizar el desempeño geomecánico de relaves mineros en condición parcialmente saturada.
- **Capítulo 4:** Estudio experimental. Se describe la metodología seguida en la investigación, presentando el programa experimental y una caracterización de los materiales en estudio.
- **Capítulo 5:** Resultados. Presenta una descripción y análisis de los resultados del plan experimental.
- **Capítulo 6:** Conclusiones y Desafíos Futuros. Presenta el resumen y conclusiones generales del estudio, incluyendo desafíos futuros para próximos trabajos en esta línea de investigación.
- **Capítulo 7:** Referencias.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

En este capítulo se presenta una discusión de los aspectos relevantes que fundamentan el objetivo de la investigación como lo son el comportamiento tensión-deformación y la respuesta al corte de suelos parcialmente saturado. Se presentan además las metodologías y procedimientos de laboratorio existentes para caracterizar el comportamiento geomecánico de suelos parcialmente saturados, en particular mediante ensayos triaxiales.

2.1 Definición de suelo parcialmente saturados

Para comprender el comportamiento de suelos parcialmente saturados y su comportamiento hidráulico y geomecánico resulta relevante conocer cómo se define y cuáles son las fases que presenta como elemento. Para el caso de un suelo saturado este se define como aquel en que todos los poros o espacios intersticiales están llenos de agua. Para el caso de un suelo parcialmente saturado, este se caracteriza por tener tres fases: (1) fase sólida, conformada por las partículas sólidas de material, (2) fase líquida, conformada por el agua presente en sus poros, y (3) fase gaseosa que corresponde al aire presente en los poros o espacios entre partículas sólidas. No obstante, existe una cuarta fase que corresponde a la interfaz aire-agua o también denominada *contractile skin*. Esta interfaz juega un papel importante en la respuesta al corte de suelos no saturado, ya que los cambios en el estado de esfuerzos en esta interfaz pueden hacer variar el contenido de agua y el volumen del suelo, dada la naturaleza compresible del aire.

La Figura 2-1 ilustra de manera esquemática un elemento de suelo parcialmente saturado con las cuatro fases que lo componen.

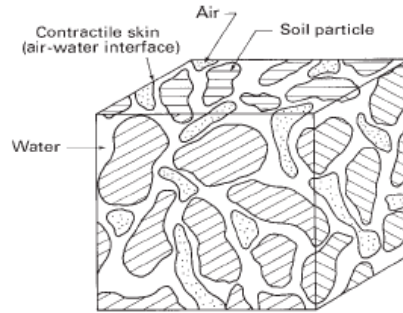


Figura 2-1: Elemento de suelo parcialmente saturado (Fredlund et al., 2012)

2.1.1 Curva de Retención de Agua SWCC

La curva característica del suelo o *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC por sus siglas en inglés) entrega la relación entre el contenido de agua de un suelo (gravimétrico o volumétrico) y la succión matricial. Su determinación es fundamental en el estudio de suelos no saturados ya que describe la capacidad que posee el suelo de retener agua y el esfuerzo que necesita para que comience a desaturar. Adicionalmente la SWCC es utilizada para la estimación de diversos parámetros que permiten describir el comportamiento de suelos no saturados. El contenido gravimétrico o volumétrico de agua corresponde a la cantidad de agua en peso o volumen, respectivamente, contenida en los poros de suelos; y la matriz de succión a la diferencia entre la presión de aire y la presión de agua en el elemento de suelo.

La Figura 2-2 presenta gráficamente una SWCC tipo. Es posible observar las distintas zona de desaturación de la curva, siendo la pendiente del contenido de agua versus la relación de succión del suelo, la capacidad de almacenamiento o retención de agua del suelo. Los puntos clave de la curva son el Valor de Entrada de Aire o *Air-Entry Value* (AEV por sus siglas en inglés) y el valor residual de succión y de contenido de agua. Los puntos anteriormente mencionados delimitan las tres zonas de la curva: Zona de Efecto Límite (Boundary effect zone), Zona de Transición (Transition Zone) y Zona Residual (Residual Zone). La Zona de Efecto Límite, corresponde a la zona que presenta mayor contenido de agua y menor succión. A partir del valor de entrada de aire el suelo comienza a desaturarse y el AEV es el valor de succión requerida para que el aire comience a ingresar a los poros del suelo. En la zona residual, la fase de agua deja de ser continua y los poros del elemento de suelo están ocupados principalmente por aire.

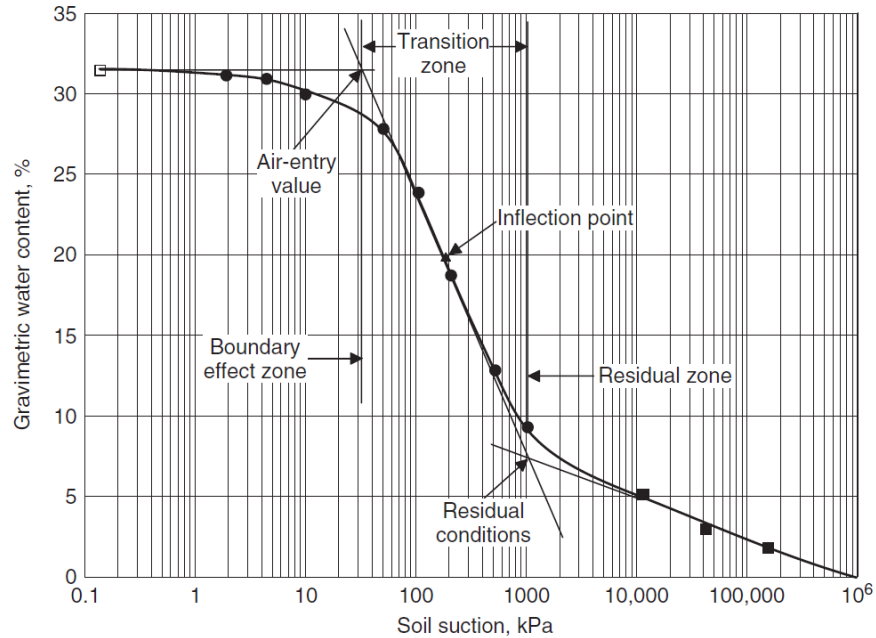


Figura 2-2: SWCC típica y sus principales zonas (Fredlund et al., 2012)

Dentro de los aspectos o propiedades del suelo que influyen en la SWCC se encuentran la textura, la granulometría y el índice de vacíos (Fredlund, Rahardjo & Fredlund 2012). La Figura 2-3 presenta curvas tipo para distintos tipos de suelo, suelos arenosos, limosos y arcillosos. Como se observa, suelos más gruesos o de partículas de mayor tamaño, como las arenas, presenta valores de entrada de aire menor y presentan una menor capacidad de retener agua en comparación con suelos de partículas más finas, como lo son los limos y las arcillas.

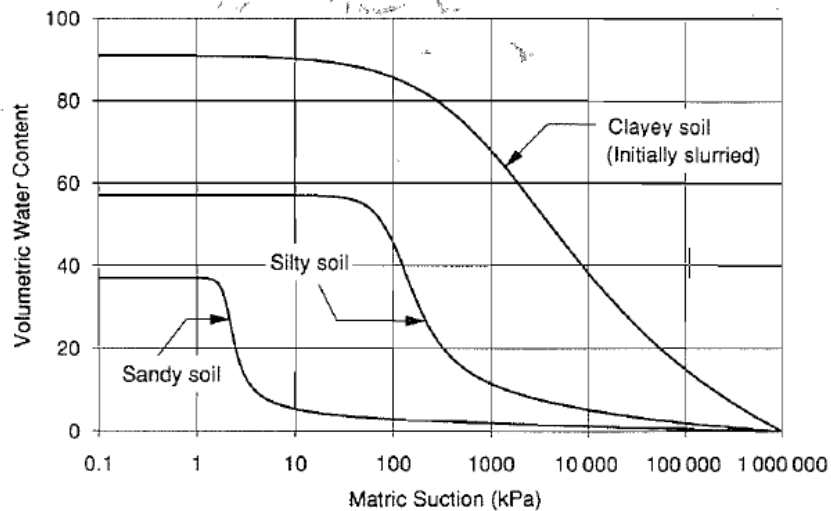


Figura 2-3: SWCC para distintos tipos de suelo (Fredlund et al., 1994)

2.1.2 Estimación de la Curva de Retención de Agua SWCC

La estimación de la SWCC para un suelo supone un paso fundamental en el estudio de suelos parcialmente saturado y el entendimiento de su comportamiento hidráulico y geomecánico. Existen diversos enfoques que pueden ser utilizados para obtener la curva considerando el suelo en estudio; su uso dependerá de la información disponible, la data de laboratorio y la precisión con la que se necesite evaluar la curva de acuerdo al tipo de proyecto, profundidad de la investigación, etc.

La Figura 2-4 presenta los distintos enfoques utilizados en el rubro ingenieril para la determinación o estimación de la SWCC. Por un lado, se encuentran las mediciones en laboratorio del contenido de agua versus la succión, mediante estimaciones basadas en la distribución granulométrica del suelo y de los límites de Atterberg o utilizando antecedentes existentes de suelos similares al suelo en estudio. Cuando se requiere información precisa sobre la curva y la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo para estudios de investigación o etapas avanzadas de ingeniería, la ejecución de pruebas en laboratorio y el posterior ajuste a curvas o modelos empíricos es la alternativa recomendada ya que permite preparar las muestras de suelo a las condiciones reales que se desean estudiar y que influyen significativamente en la curva, como lo son la densidad, la granulometría y la mineralogía del suelo.

Para estimar la SWCC existen diferentes modelos empíricos desarrollados por diversos investigadores que buscan, a partir de mediciones, obtener una curva que describa de manera precisa las condiciones observadas del suelo en laboratorio. Las mediciones son realizadas a partir de una condición de saturación del suelo y mediante la aplicación de succión o presión negativa, el suelo se desatura y el cambio gravimétrico se va controlando en cada medición. Dentro de los modelos empíricos de ajuste más utilizados en la industria se encuentran los desarrollados por Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994), los cuales son presentados brevemente a continuación.

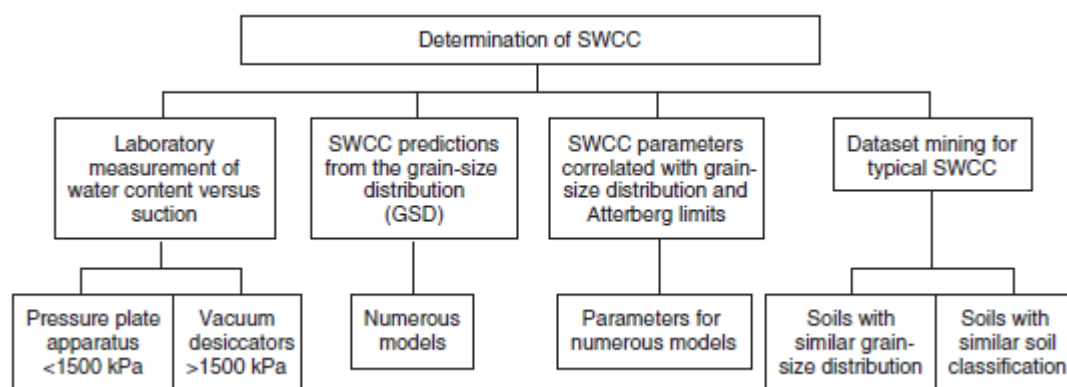


Figura 2-4: Enfoques para la obtención de la SWCC (Fredlund et al., 2012)

2.1.2.1 Van Genuchten (1980)

El modelo desarrollado por Van Genuchten se basó en el modelo desarrollado por Maulem (1976) quien propuso una ecuación para predecir la conductividad hidráulica relativa a partir de la curva de retención de agua. La expresión fue propuesta como un modelo simple para la obtención de la SWCC mediante el ajuste de data experimental a una ecuación con tres parámetros de ajuste y se presenta a continuación en la Ecuación 2.1

$$w(\psi) = \frac{w_s}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Donde

- ψ = cualquier valor de succión de la curva en kPa,
- $w(\psi)$ = contenido gravimétrico de agua a cualquier valor de succión en %,
- w_s = contenido gravimétrico de agua saturado en %,
- a, m, n = parámetros de ajuste adimensionales

2.1.2.2 Fredlund y Xing (1994)

El año 1994, Fredlund et. al (1994) propusieron un modelo para estimar la curva característica del suelo a partir de data experimental. La ecuación propuesta se encuentra basada en la suposición de que la forma de la curva depende de la granulometría de suelo. De acuerdo al autor, le ecuación proporciona un buen ajuste para suelos de arena, limo y arcilla en el rango de succión de 0 a 10^6 kPa. El modelo propuesto se presenta en la Ecuación 2.2.

$$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde

- ψ = cualquier valor de succión de la curva en kPa,
- $w(\psi)$ = contenido gravimétrico de agua a cualquier valor de succión en %,
- w_s = contenido gravimétrico de agua saturado en %,
- a, m, n = parámetros de ajustes adimensionales,
- $C(\psi)$ = Factor de corrección, de acuerdo a lo indicado en la Ecuación 2.3

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left[1 + \left(\frac{1000000}{\psi_r}\right)\right]} \quad (\text{Ec.2.3})$$

Donde

- ψ = cualquier valor de succión de la curva en kPa,
- ψ_r = succión a condiciones residuales en kPa.

2.2 Resistencia al corte de suelos parcialmente saturados

El comportamiento geomecánico y la respuesta al corte de suelos parcialmente saturados es de interés en la ingeniería geotécnica debido a que en la gran mayoría de los proyectos el suelo se encuentra en estado parcialmente saturado, por ende, el entendimiento de como interactúan sus cuatro fases ante las demandas externas y el cambio en su estado tensional resulta relevante. Si bien es común la presencia de suelos en esta condición, poder replicar sus condiciones in-situ en laboratorio es un desafío a la hora de caracterizar su comportamiento tensión-deformación, medir su resistencia considerando los distintos tipos de respuesta y evaluar cómo varían sus fases frente a demandas monótonas y cíclicas.

Diversos investigadores han desarrollado trabajos para definir el comportamiento de suelos parcialmente de estado en función de variables de estado relacionadas con la presión de poro de aire, la presión de poro de agua y la succión matricial. Dentro de las expresiones más utilizadas se encuentran las desarrolladas por Fredlund (Fredlund et al., 1978), quien propuso que la resistencia al corte de suelos parcialmente saturados puede ser expresada en términos de dos variables de estado independiente: (1) por un lado expresada en términos de la succión matricial ($u_a - u_w$) y la presión de aire ($\sigma - u_a$) y (2) por otro lado en términos de la succión matricial ($u_a - u_w$) y la presión de agua ($\sigma - u_w$). No obstante, se ha determinado que la primera opción, correspondiente a las variables de estado $\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$ es la más practica para la resolución de problemas de ingeniería y la determinación de parámetros de resistencia al corte a partir de ensayos de laboratorio. Considerando lo anterior, la ecuación lineal de resistencia al corte puede ser expresada de acuerdo a la Ecuación 2.4.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b \quad (\text{Ec.2.4})$$

Donde

- c' = cohesión efectiva
- $(\sigma_f - u_a)_f$ = esfuerzo normal neto en el plano de falla
- u_a = presión de poro por aire en el plano de falla
- u_w = presión de poro por agua en el plano de falla
- $(u_a - u_w)_f$ = succión matricial en el plano de falla
- φ' = ángulo de fricción interna asociado al esfuerzo normal neto
- φ^b = ángulo que indica la tasa de aumento en resistencia al corte respecto a un cambio en la matriz de succión.

Como se observa, la ecuación corresponde a una extensión de las fórmulas que permiten expresar la resistencia al corte en estado saturado: mientras que para suelos saturados solo una variable de estado es requerida para describir la resistencia al corte, el esfuerzo normal efectivo, para suelos parcialmente saturados son dos, la succión matricial y el esfuerzo normal neto en términos de presión de poro de aire. La influencia de estas variables de estado en la resistencia al corte puede ser representada gráficamente mediante una serie de círculos de Mohr y la envolvente de falla. En suelos parcialmente saturados, la envolvente de falla, asociada a una serie de círculos de Mohr, puede ser representada en un gráfico de tres dimensiones, como se observa en la Figura 2-5, en el que en el eje de las ordenadas se encuentra la resistencia al corte y las dos variables de estado tensional en los ejes de las abscisas.

El intercepto de la envolvente de falla en el eje de las ordenadas corresponde a la cohesión efectiva C' , y su pendiente corresponde a los ángulos ϕ' y ϕ^b con respecto a los ejes $(\sigma_f - u_a)$ y $(u_a - u_w)$, respectivamente. Ambos ángulos se asumen constante. Estos tres parámetros, corresponden a los parámetros de resistencia que permiten relacionar la resistencia al corte de suelos parcialmente saturados con las variables de estado: el incremento en resistencia debido a un incremento en el esfuerzo normal neto es caracterizado por el ángulo ϕ' y el incremento debido a un aumento en la matriz de succión por el ángulo ϕ^b , el cual puede ser menor o igual al ángulo ϕ' .

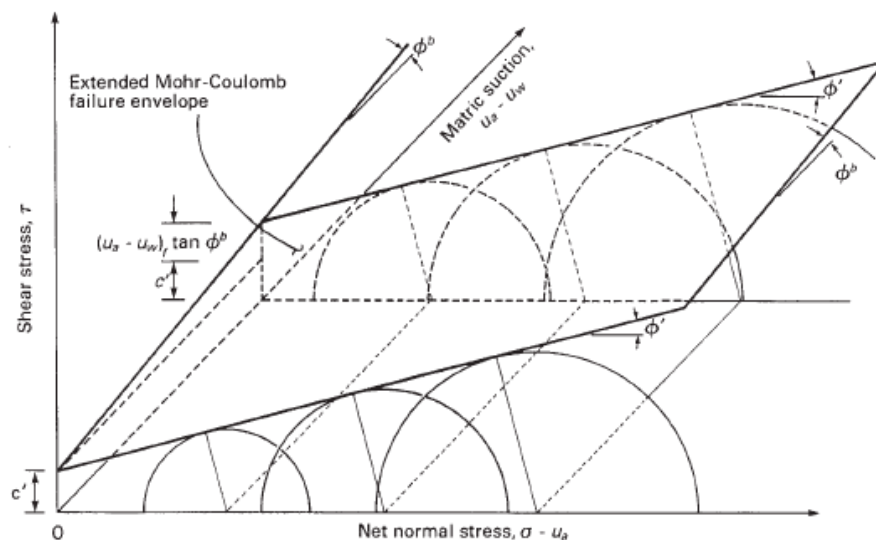


Figura 2-5: Extensión del criterio de falla Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

2.2.1 Expresiones en términos de parámetros tensionales p y q

Las expresiones de resistencia al corte para suelos parcialmente saturados, al igual para suelos saturados, pueden ser expresadas en parámetros tensionales para evaluar la trayectoria de tensiones y el comportamiento del suelo en etapas de corte en ensayos triaxiales. El criterio de falla en términos de las variables tensionales p y q se presenta en las ecuaciones a continuación.

$$q_f = d' + p_f \tan \psi' + r_f \tan \psi^b \quad (\text{Ec.2.4})$$

$$q_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (\text{Ec.2.6})$$

$$p_f = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - u_a \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde,

- q_f = mitad del esfuerzo desviador en la falla
- d' = intercepto en el eje 1 cuando p_f y r_f son iguales a cero
- p_f = tensión normal neta promedio en la falla
- ψ' = ángulo de fricción asociado a la tensión normal neta
- r_f = succión matricial en la falla
- ψ^b = ángulo de fricción asociado a la succión matricial
- σ_1 = esfuerzo principal mayor en la falla
- σ_3 = esfuerzo principal menor en la falla

Es importante mencionar que las envolventes de falla Mohr-Coulomb (M-C) y p-q son superficies diferentes sin embargo ambas se encuentran relacionadas de acuerdo a lo indicado en la Figura 2-7. La relación entre los ángulos asociados a la envolvente de falla p-q y los parámetros resistentes considerando la envolvente de falla M-C está dada por las siguientes ecuaciones

$$\tan \psi' = \sin \varphi' \quad (\text{Ec.2.8})$$

$$\tan \psi^b = \tan \varphi^b \cos \varphi' \quad (\text{Ec.2.9})$$

$$c = \frac{q_f}{\cos \varphi'} - p_f \tan \varphi' \quad (\text{Ec.2.10})$$

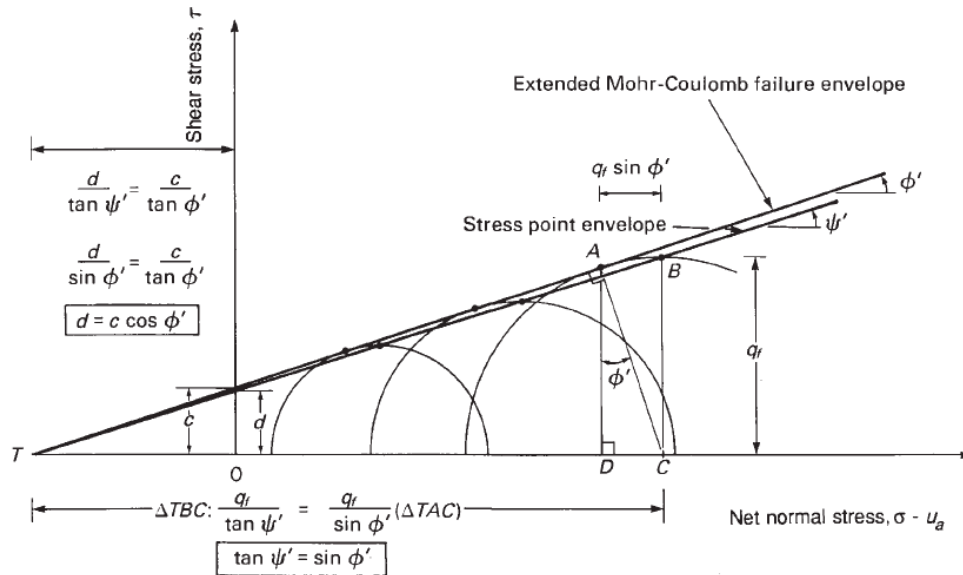


Figura 2-6: Relación envolvente de falla M-C y p-q (Fredlund et al., 2012)

2.2.2 Medición de la resistencia al corte en laboratorio

La resistencia al corte de suelos parcialmente saturada puede ser medida en laboratorio mediante ensayos triaxiales y ensayos de corte directo. Diversos autores han investigado y elaborado procedimientos que permitan recrear en laboratorio las condiciones de un suelo parcialmente saturado a modo de que las mediciones en las distintas etapas de un ensayo sean comparables con el comportamiento in-situ y los resultados puedan ser utilizados en el diseño y verificaciones de proyectos geotécnicos.

El objetivo de esta investigación se centra en la medición de la respuesta al corte mediante ensayos triaxiales, por lo que en el presente capítulo se discutirá sobre la implementación del equipo triaxial a modo de permitir la aplicación y el control de presión de poro de aire y succión matricial. Adicionalmente se discutirá sobre los tipos de ensayo triaxial en función de la respuesta del suelo a evaluar y sus principales etapas.

Para permitir la ejecución de ensayos de respuesta al corte en suelos parcialmente saturados, el equipo triaxial requiere una serie de modificaciones dada la necesidad de aplicar y controlar presión de aire y presión de agua de manera independiente, lo que hace que las diferentes etapas del ensayo triaxial sean de mayor complejidad y necesiten periodos más extensos de tiempo para ser aplicadas.

Dentro de las principales dificultades asociadas a la simulación de la respuesta al corte de suelos parcialmente saturados en laboratorio se encuentra la aplicación de presiones de agua sobre el rango de condiciones encontradas en la práctica (Bocking et al., 1980), las que por lo general pueden ser de

varias atmósferas negativas en la escala de presión absoluta, lo que no es posible de medir directamente en laboratorio ya el fluido cavitaria en los sistemas de medición.

Una de las técnicas más utilizadas para aplicar ambas presiones durante ensayos de resistencia al corte en suelos parcialmente saturados corresponde a la técnica de translación de ejes, que se basa en que ambas presiones de poro, de aire y de agua, son trasladadas en un rango de presión positiva, manteniendo una determinada matriz de succión, dada por la diferencia de ambas presiones, y considerando que los cambios volumétricos en la muestra de suelo por motivo de la aplicación de estas presiones no son significativos.

Para poder aplicar la técnica de translación de ejes, el equipo requiere la incorporación de un disco cerámico con poros finos para la aplicación y control de la presión de poros de agua (u_w). El disco cerámico es hidrófilo presentando afinidad por el agua, lo que permite el movimiento del agua a través del disco. Sin embargo, el disco en función de su porosidad tiene un valor determinado de presión de entrada de aire (AEV) por lo que flujos de aire a presiones menores que dicho valor no pueden fluir o atravesar el disco.

Existen una serie de consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de selección del valor de entrada de aire del disco cerámico y de las presiones de poro de aire y agua que serán aplicadas durante la ejecución del ensayo. La principal corresponde a que el disco poroso en contacto con la probeta o muestra de suelo debe tener un valor de presión de entrada de aire superior a la matriz de succión que será aplicada en el suelo, a modo de que el disco no permita fuga o flujo de presión de aire a través de sus poros. El AEV es el valor de succión matricial a la cual el aire comienza a pasar a través de los poros del disco, por lo que, de ser sobrepasado, el sistema que permite controlar y aplicar la presión de poros de agua se llenaría de aire.

2.2.2.1 Modificaciones Equipo Triaxial

Para la ejecución de ensayos de resistencia al corte en muestras de suelo parcialmente saturadas existen una serie de modificaciones que se deben realizar en el equipo. las que se describen a continuación:

- Incluir un disco cerámico de alto valor de entrada de aire en el pedestal base. El disco debe quedar adherido al pedestal mediante un sello epóxico el cual debe garantizar que durante el desarrollo del ensayo no se produzcan fugas de agua y aire, considerando las presiones que se aplicarán para ambos flujos.
- Se deben generar surcos en el pedestal bajo el disco cerámico a modo de que el agua se distribuya uniformemente a través del disco.

- Se deben disponer de válvulas que permitan la aplicación y control de la presión en la celda, aplicación y control de la presión de aire y aplicación y control de la presión de agua.

Las Figura 2-7 y Figura 2-8 muestran de manera esquemática las componentes del equipo triaxial para la ejecución de ensayos parcialmente saturados. Como se observa en la Figura 2-7, el transductor y el controlador de presión de poros de agua (válvulas A y B) está ubicado en la base del equipo, en la que el pedestal contiene el disco cerámico que posibilita el flujo de agua sin pérdida de presión de aire. Adicionalmente se observa que el transductor y controlador de presión de poro de aire está conectado en el cap superior de la probeta (válvula C). La válvula D corresponde al controlador de presión en la celda que permita la aplicación de las presiones de confinamiento.

La Figura 2-8 muestra la base del pedestal con la inclusión del disco cerámico en la zona central del pedestal, y las válvulas presentadas en la Figura 2-7.

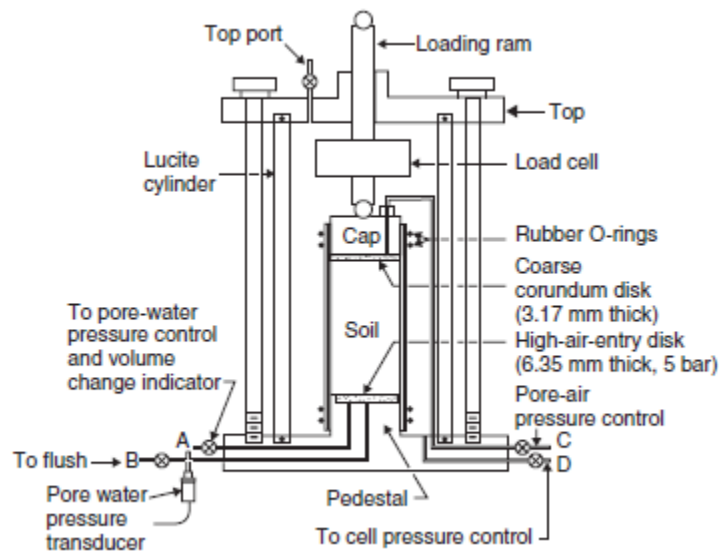


Figura 2-7: Modificaciones del equipo triaxial para la ejecución de ensayos en suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

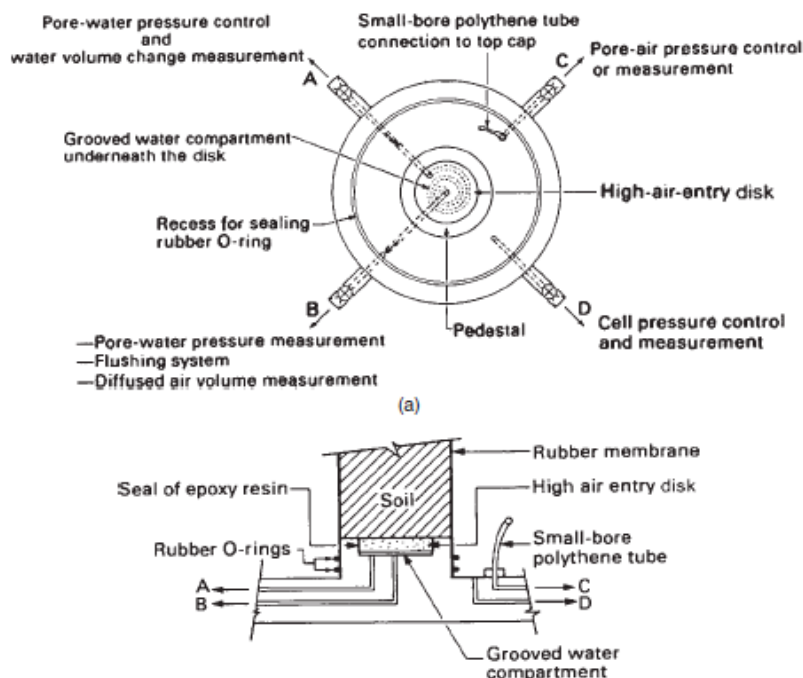


Figura 2-8: Pedestal de equipo triaxial para ensayos en suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

2.2.2.2 Procedimientos para la ejecución de ensayos triaxiales

Al igual que en suelos saturados, existen diferentes tipos de pruebas triaxial que permitan ejecutar este ensayo en suelos parcialmente saturados, a modo de evaluar los distintos tipos de respuesta del suelo y además hacer comparable los resultados con pruebas triaxiales comúnmente realizadas en suelos saturados. No obstante, como se comentó anteriormente debido a las fases involucradas en una muestra de suelo parcialmente saturado, las etapas del ensayo presentan una mayor demanda en términos técnicos y de tiempo.

Al existir dos fases fluidas en el elemento de suelo, que son el agua y el aire, la prueba triaxial durante el corte se puede ejecutar considerando el drenaje de ambos fluidos, de solo un fluido o no permitiendo el drenaje en ninguno de los dos casos. Por otro lado, al igual que para el caso de los suelos saturados, en determinados proyectos o estudios, resulta de interés evaluar la respuesta del suelo en condiciones sin confinamiento o sin consolidar antes del corte. Considerando lo anterior, a continuación, se discuten los principales tipos de ensayos triaxiales aplicables a suelos parcialmente saturados:

- **Triaxial consolidado drenado:** este tipo de ensayo considera la consolidación de la muestra de suelo a determinadas condiciones de presión de confinamiento neta y matriz de succión, es decir, a condiciones específicas de presión de poro de agua, presión de poro de aire y presión de confinamiento permitiendo el drenaje de ambos fluidos hasta alcanzar el equilibrio. Durante la

etapa de corte, se aplica el esfuerzo desviador de compresión axial permitiendo el drenaje de ambos fluidos, aire y agua, hasta alcanzar la falla y las presiones de poro de aire y agua son controladas a un valor constante, por lo que la succión matricial y la presión de confinamiento neta se mantienen constante durante la etapa de corte. Es importante considerar que, para mantener la condición de drenaje en ambas presiones de poro, la carga de compresión axial debe ser aplicada lentamente.

- **Triaxial a volumen de agua constante:** este ensayo considera lo mismo que el ensayo consolidado drenado en la etapa de consolidación, es decir, se permite a la probeta consolidar y alcanzar el equilibrio bajo determinadas condiciones de presión de poro de agua y de aire y de presión de confinamiento neta permitiendo el drenaje. Sin embargo, durante la etapa de corte, se mantiene la presión de aire al mismo valor aplicado durante la etapa de consolidación y la válvula de flujo de agua se mantiene cerrada, generando una condición no drenada para la presión de poro de agua. Durante la etapa de corte, la presión de poro de aire se mantiene constante en relación a la aplicada durante la etapa de consolidación, sin embargo, al no permitir el drenaje de la presión de poro de agua, la succión matricial disminuye durante la aplicación del esfuerzo desviador, incrementando así el grado de saturación del suelo ya que la relación de vacíos de suelo disminuye en respuesta al drenaje del aire en la muestra de suelo.
- **Triaxial consolidado no drenado:** este ensayo considera la consolidación y el equilibrio bajo determinadas condiciones de presión de poro de agua y de aire, y de presión de confinamiento permitiendo el drenaje. Durante el corte, el esfuerzo desviador es aplicado en condiciones sin drenaje tanto para la presión de poro de aire como la presión de poro de agua, manteniendo ambas válvulas cerradas en la etapa del corte. Debido a lo anterior, se generan excesos de presión de poro de aire y de agua, generando variaciones en tanto en la presión de confinamiento neta como en la succión matricial. La ejecución de este ensayo en particular presenta diversas dificultades asociadas a la mantención de la condición no drenada para ambas presiones de poro durante la ejecución del corte, ya que la presión de aire se disuelve a través de la presión de agua, en la membrana y otras partes del equipo triaxial.
- **Triaxial no drenado:** este ensayo considera el corte a la succión matricial inicial de la muestra de suelo, no permitiendo la consolidación de la muestra a una determinada presión de confinamiento neta, es decir, la aplicación de la presión de confinamiento es aplicada durante la etapa de corte. Adicionalmente, no se permite el drenaje de los flujos de aire y agua durante el corte.
- **Ensayo de compresión no confinado:** Este ensayo es similar al triaxial no drenado, a diferencia que no se aplica una presión de confinamiento en la muestra durante la etapa de corte.

Un resumen de las consideraciones de cada uno de estos ensayos en las principales etapas del ensayo triaxial es presentado en la Tabla 2-1

Tabla 2-1: Tipos de ensayo triaxial en suelos parcialmente saturados y sus características (Fredlund et al., 2012)

Tipo de Ensayo	Consolidado	Drenaje		Etapa de corte (M, C) ⁴		
		Presión de agua	Presión de aire	u_a^1	u_w^2	ΔV^3
Consolidado Drenado (CD)	Si	Si	Si	C	C	M
Contenido de agua constante (CWC)	Si	Si	No	C	M	M
Consolidado no drenado (CU)	Si	No	No	M	M	
No drenado (UU)	No	No	No			
Compresión no confinada	No	No	No			

Notas:

1: u_a = presión de poro de aire

2: u_w = presión de poro de agua

3: ΔV = cambio volumétrico

4: M = Medido, C = Controlado

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

El interés de la industria minera y de los distintos stakeholder por el uso de nuevas tecnologías de depositación y almacenamiento de relaves ha incrementado durante las últimas décadas a raíz de las consecuencias de las últimas fallas en depósitos convencionales. Adicionalmente nuevas directrices y normativas como el Estándar Global de Gestión de Relaves (GISTM por sus siglas en inglés) sugieren la implementación de nuevas tecnologías y soluciones que garanticen la reducción de las probabilidades de fallas catastróficas y de las consecuencias aguas debajo de las instalaciones de relave, para lo cual uno de los principales lineamientos propuesto corresponde a minimizar los volúmenes de agua y relave en las instalaciones de almacenamiento de residuos mineros.

La alternativa de relaves filtrados sugiere una alternativa a los requerimientos anteriormente mencionados, debido a que, dentro de las tecnologías de manejo y disposición, es la que permite recuperar un mayor volumen de agua, presentando contenidos de humedad inferiores al de saturación al momento de ser depositados. Sin embargo, los altos costos de implementación de esta solución dado los requerimientos de equipos en planta y de transporte del residuo hacia los puntos de disposición, hacen de esta solución una de las alternativas menos utilizadas en nuestro país.

Resulta de interés entonces evaluar aquellos elementos que condicionan el diseño de estas instalaciones, que por lo general son construidas con relaves parcialmente saturados y compactado, a modo de determinar las ventajas frente a otras tecnologías no solo en términos de sustentabilidad y de recuperación de agua, si no en términos de diseño y desempeño físico. Dentro de los principales aspectos a evaluar se encuentra la respuesta geomecánica del material y su comportamiento ante demandas de corte, que corresponden a aquella información que por lo general condiciona la geometría de del depósito, su altura y por ende su estabilidad física.

En el presente capítulo se presentan una revisión de las principales investigaciones en relaves filtrados y su comportamiento geomecánico.

3.1 Producción y disposición de relaves filtrados

El proceso de construcción, operación y cierre de depósitos de relaves filtrados es similar a los procesos de manejo de pilas de lixiviación, debido a que el material en ambos casos, debido a su condición parcialmente saturada, presenta una baja movilidad y, por ende, el proceso de transporte y disposición involucra equipos mecánicos y no hidráulicos como en otras tecnologías de disposición (e.g. relaves convencionales, espesados o en pasta).

De acuerdo con Cacciuttolo et al. (2023), existen cuatro etapas principales a considerar en el proceso de gestión de estos depósitos: (1) deshidratación de la pulpa de relaves proveniente del proceso de flotación hasta obtener un material parcialmente saturado, (2) manejo y transporte del material desde planta hasta el punto de disposición, (3) colocación y disposición de los relaves filtrados en función de la intención de diseño y finalmente (4) monitoreo y remediación de la instalación.

La Figura 3-1 presenta de manera esquemática parte del proceso y las etapas mencionadas anteriormente. Como se observa los relaves inicialmente son deshidratados y espesados en espesadores de alta densidad. La pulpa espesada obtenida es transportada por bombas centrifugas hacia las plantas de filtrado, en las que, dependiendo de cada compañía minera, los filtros pueden ser del tipo prensa o filtrado al vacío, alternativas más utilizadas en la industria minera. El material obtenido es transportado a su punto de disposición final mediante sistemas mecánicos como correas transportadoras o mediante camiones para ser descargados en los sistemas de colocación de relaves o directamente al área de apilamiento, donde serán distribuidos y compactados en función de lo determinado en etapas de diseño.

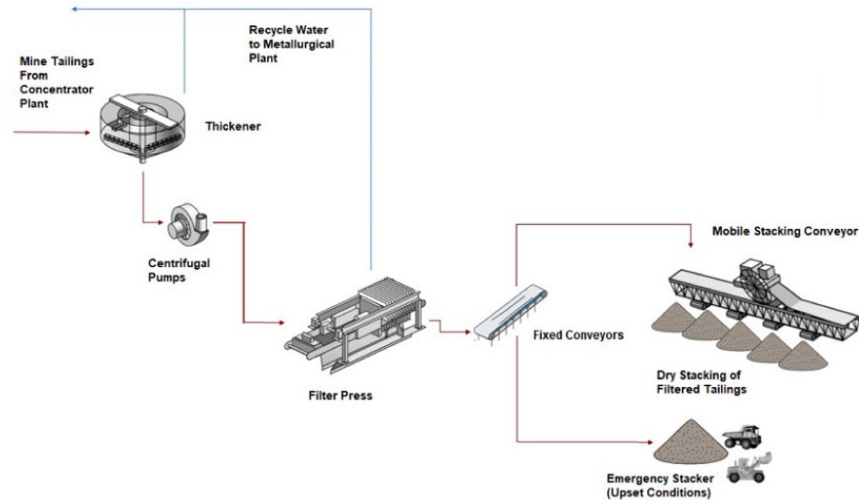


Figura 3-1: Diagrama esquemático del proceso de manejo de relaves filtrados (Cacciuttolo et al., 2023)

El punto de disposición final o depósito es comúnmente denominado en la industria como apilamiento seco o *Dry cake*. Algunas de las ventajas principales de estas instalaciones son: (1) al depositar en condición parcialmente saturada, en función del diseño y de las dimensiones de la instalación, es posible eliminar la necesidad de un muro o sistema de contención de relaves, (2) maximiza recuperación y reutilización de agua, disminuyendo las tasas de make-up de agua fresca, (3) las instalaciones con más compactas y de menores dimensiones que las necesarias para otras tecnologías de manejo de relaves y finalmente (4) facilita la implementación de actividades progresivas de cierre y rehabilitación durante etapas operativas.

La Figura 3-2 presenta un ejemplo de un depósito de relaves filtrados en Chile, correspondiente al depósito de Mina La Coipa, ubicado en la Región de Atacama.



Figura 3-2: Depósito de relaves filtrados, Mina La Coipa, Chile (Cacciuttolo et al., 2023)

Como se comentó inicialmente, dentro de los factores que pueden afectar el proceso de filtrado y por ende los resultados en cuanto a humedad y resistencia del relave filtrado están la mineralogía y la granulometría del material. Ambas variables dependen del tipo de industria que produce el relave (e.g. tipo de yacimiento, mineral que produce, procesos utilizados para la producción de concentrado y relaves, etc.). Los relaves pueden ser clasificados en función de sus características granulométricas y del tipo de industria que los produce, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 3-1. Adicionalmente, para estos relaves, la Figura 3-3 presenta las bandas granulométricas típicas para los relaves indicados (ICOLD, 2021).

En general, relaves con mayor contenido de finos y de arcillas presentan mayor dificultad para la desaturación mediante filtros, ya que presentan bajos valores de conductividad hidráulica, lo que implica mayores esfuerzos durante el proceso de filtrado. Adicionalmente, existen mayores necesidades de mantención en las plantas de filtros debido a los fenómenos asociados a colmatación de los equipos debido a la acumulación de partículas. Debido a lo anterior, previo al diseño de la planta de filtro es recomendable la ejecución de pruebas piloto que permitan determinar las humedades objetivos como base del diseño.

Tabla 3-1: Tipos de relaves (ICOLD, 2021)

Tipo de relave	Clasificación y descripción	Ejemplo de mineral de origen o yacimiento
Relaves gruesos (Coarse Tailings CT)	Arena limosa no plástica	Carbón, Hierro, Sal
Relaves de Roca Dura (Hard Rock Tailings HRT)	Limo arenosos de baja o nula plasticidad	Cobre, Níquel, Oro
Relaves de Roca Alterada (Altered Rock Tailings -ART)	Limo arenoso con trazas de arcilla, baja plasticidad. Pueden presentar contenidos de arcilla bentoníticas	Pórfido de cobre con alteración hidrotermal, roca oxidada, bauxita. procesos de lixiviación
Relaves Finos (Fine Tailings FT)	Limo con trazas de arcilla y de baja a moderada plasticidad	Mineral de hierro, procesos de lixiviación, Minerales polimetálicos, rechazos de Carbón
Relaves Ultrafinos (Ultra Fine Tailings)	Arcilla limosa, alta plasticidad y baja densidad	Arenas bituminosas, Kimberlita

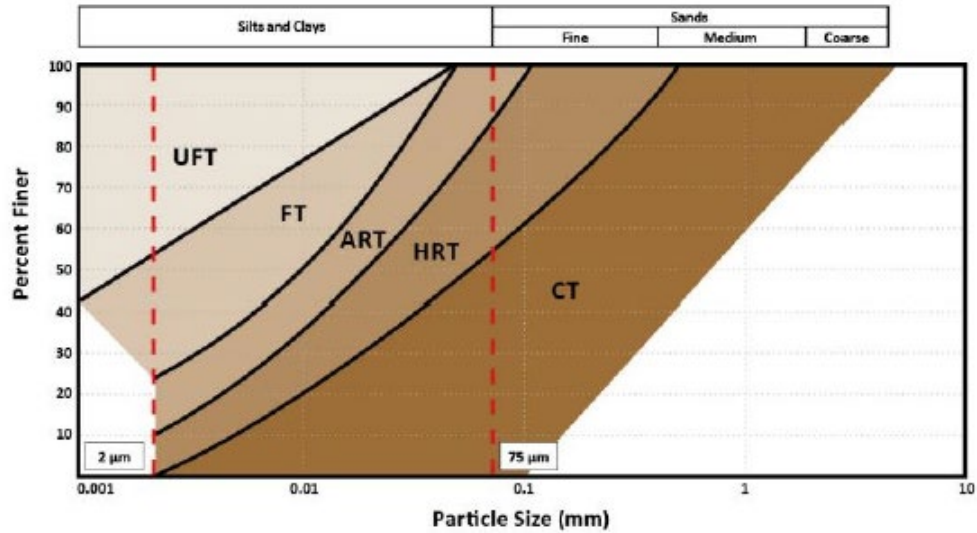


Figura 3-3: Bandas granulométricas por tipo de relave (ICOLD., 2021)

3.2 Respuesta al Corte de Relaves Parcialmente Saturados

3.2.1 Estudios experimentales en suelos parcialmente saturados

Como se discutió en el marco teórico, los ensayos triaxiales y de corte directo han sido utilizados en diversas investigaciones y estudios para caracterizar en laboratorio la respuesta al corte de suelos parcialmente saturados. Para el caso de los ensayos triaxiales, que son los que serán utilizados en la presente investigación, existen diversos procedimientos que permiten obtener la respuesta drenada y no drenada, y hacer comparables estos resultados con ensayos triaxiales sobre relaves saturados.

El año 1967, Blight ejecutó una serie de resultados triaxiales consolidados drenados (CD) sobre muestras de suelos limosos parcialmente saturados, preparados a contenidos de humedad de 16.5% y compactados. Los ensayos fueron realizados a presiones de confinamiento neta ($\sigma_3 - u_a$) de 13.8 y 27.6 kPa y a tres valores de succión matricial (6.9, 68.9 y 137.9 kPa). Los resultados se presentan en la Figura 3-3, observándose un incremento significativo de la resistencia al corte con el incremento en la succión matricial y con la presión de confinamiento neta. Al comparar los diferentes resultados es posible concluir que el aumento de resistencia debido al aumento de presión de confinamiento neto es mayor a succiones matriciales mayores, siendo de aproximadamente 50 kPa. Adicionalmente, en todas las muestras se visualiza un comportamiento ligeramente de endurecimiento con deformación, sin reducción de resistencia a medida que incrementa la deformación axial. Para el caso de las probetas ensayadas con una mayor succión matricial, es posible observar una ligera pérdida de resistencia, la que pudo continuar con el avance en deformación, lo que no es apreciable ya que los resultados son presentados hasta un 6% de deformación axial.

Se presentan además los cambios volumétricos de agua y el cambio volumétrico total de la muestra. Como se observa, el cambio total en el volumen de los especímenes indica inicialmente una compresión de las muestras cuando el incremento en el esfuerzo desviador incrementa, sin embargo, una vez que la tasa de incremento de esfuerzo disminuye, ambas muestras presentan dilatación.

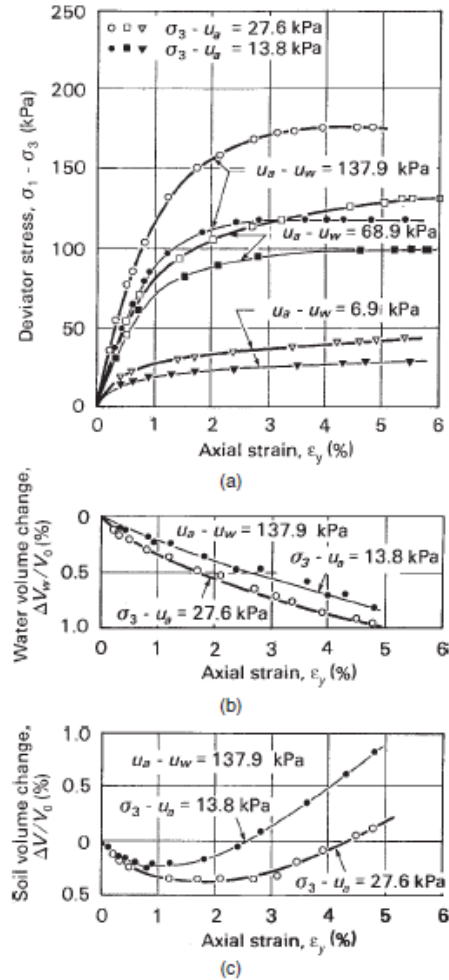


Figura 3-4: Resultados de ensayos consolidados drenados en suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

Por otro lado, la Figura 3-4 presenta resultados de ensayos triaxiales a volumen de agua constante (CWC) sobre muestras de suelo parcialmente saturado en los estudios realizados por Satija el año 1978 (Fredlund et al., 2012). Se observa similitud en la forma del comportamiento tensión-deformación al comparar estos resultados con los resultados de ensayos consolidados drenado: existe un aumento en el esfuerzo desviador con el incremento de presión de confinamiento neta a mismos valores de matriz de succión.

Al observar las variaciones en la matriz de succión y en el volumen de la probeta durante el corte a medida que aumenta la deformación axial, se observa que la matriz de succión disminuye debido a que la presión de agua en los poros incrementa y los poros en el suelo se comprimen en respuesta a al drenaje de la presión de aire. Adicionalmente se observa que las muestras de suelo experimentan

compresión hasta alcanzar el esfuerzo desviador máximo. El espécimen de suelo con una presión de confinamiento neto más baja se dilata después de alcanzar el esfuerzo desviador máximo, acompañado a un ligero incremento en la succión matricial.

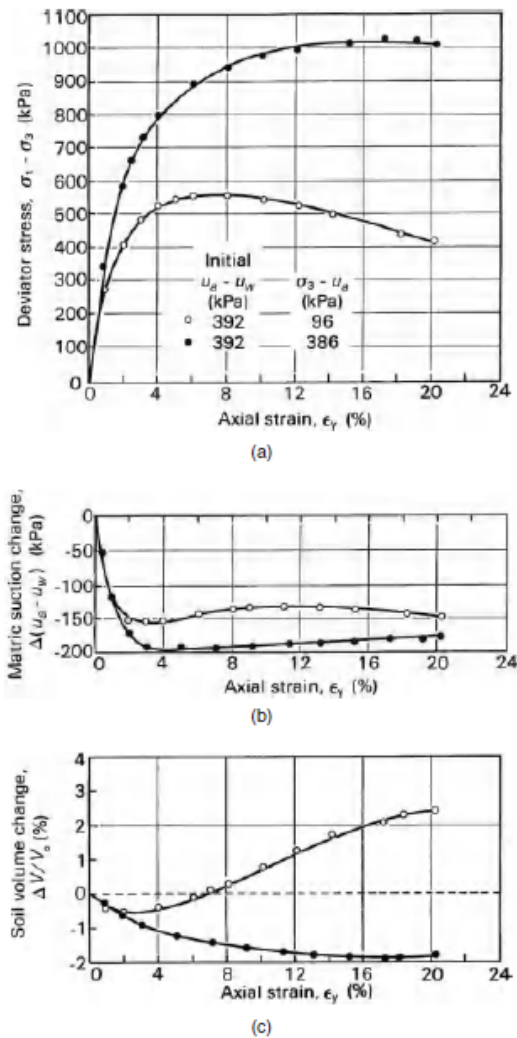


Figura 3-5: Resultados de ensayos a volumen de agua constante en suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

3.3 Estudios experimentales en relaves parcialmente saturados

Dado el interés de la industria en la implementación de relaves filtrados como alternativa a depósitos convencionales, diversos estudios e investigaciones han realizado ensayos en relaves parcialmente saturados. Borja et al. (2020) desarrollaron una investigación para evaluar el comportamiento al corte de relaves filtrados y material estéril de mina, en el contexto de mezclas de residuos mineros. El trabajo experimental consideró el desarrollo de triaxiales consolidados no drenados sobre muestra de relaves limosos, de clasificación ML de baja plasticidad con contenido de finos de 64.2%. Las dimensiones de las probetas fueron de 38mm de diámetro y 95mm de altura dado el tamaño máximo del relave en estudio (<2mm). Las muestras fueron preparadas a densidades de 1.45g/m³ y con

contenidos de humedad de 14.2% que resulto en un grado de saturación del 62%, no obstante, las muestras fueron saturadas mediante contrapresión. Los ensayos fueron realizados a presiones de confinamiento de 50, 100 y 500 kPa. La Figura 3-5 presenta los resultados en términos del esfuerzo desviador y exceso de presión de poro de agua versus deformación axial. Se observa un incremento en la resistencia al corte con el incremento de la presión efectiva y un comportamiento de endurecimiento con deformación. Si bien no se presentan los resultados en término de trayectoria de tensiones, es posible concluir una tendencia contractiva en el material debido a que para todas las presiones de confinamiento ensayadas se observa la generación de exceso de presión de poro. Para las presiones de confinamiento de 50 y 100 kPa se observa que hasta un 5% de deformación hay un incremento en el esfuerzo desviador y la presión de poros, manteniéndose constante a mayor deformación axial.

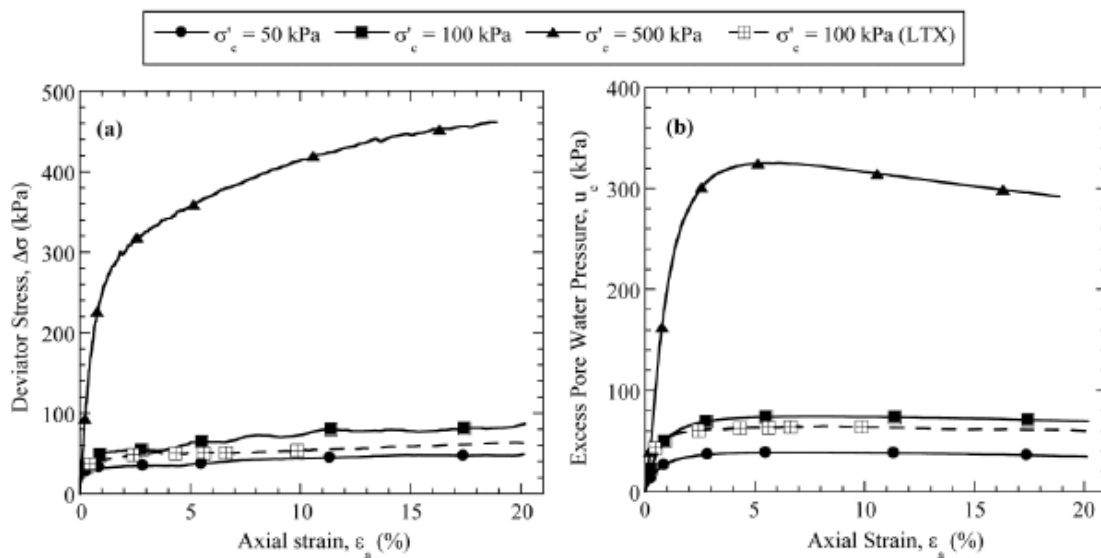


Figura 3-6: (a) Esfuerzo desviador y (b) exceso de presión de poros versus deformación axial para triaxiales CU en relaves filtrados (Borja et al. 2020)

Si bien los ensayos permiten concluir sobre la respuesta no drenada del material, los procedimientos aplicados en la investigación no permiten concluir respecto a la contribución de la succión matricial en la resistencia al corte, ya que las muestras fueron saturadas previo a las etapas de consolidación y corte.

Por otra parte, Dong et al. (2018) realizaron ensayos de corte directo y triaxiales sobre muestras de relaves finos a distintos contenidos de humedad con el fin de concluir respecto a la compresibilidad y resistencia al corte del material. Los relaves ensayados corresponden a relaves de hierro, con aproximadamente 53% de contenido de finos, una densidad máxima de 1.7 g/cm³ y humedad óptima de 15%. Los contenidos de humedad variaron entre 2.9% y 27.3%.

Los ensayos de corte directo fueron realizados bajo presiones verticales de entre 50 y 200kPa. Para el caso de los ensayos triaxiales, estos fueron del tipo consolidado drenado, y presiones de confinamiento de 100, 200 y 300 kPa. En ambos casos las muestras no fueron saturadas antes de ensayar, sin embargo, no hubo control ni medición de la matriz de succión ni de la presión de poro de aire durante la ejecución de los ensayos. La Figura 3-6 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo, donde se observa una reducción significativa del ángulo de fricción al aumentar el contenido de humedad en las muestras de suelo. Sin embargo, para el caso de la cohesión, el efecto puede dividirse en dos etapas, la primera es que se observa un incremento en la cohesión hasta un contenido de humedad de 10%, sobre ese contenido de humedad, la cohesión decrece hasta ser nula para contenidos de humedad por sobre el 20%. Permitiendo concluir que la cohesión es por capilaridad

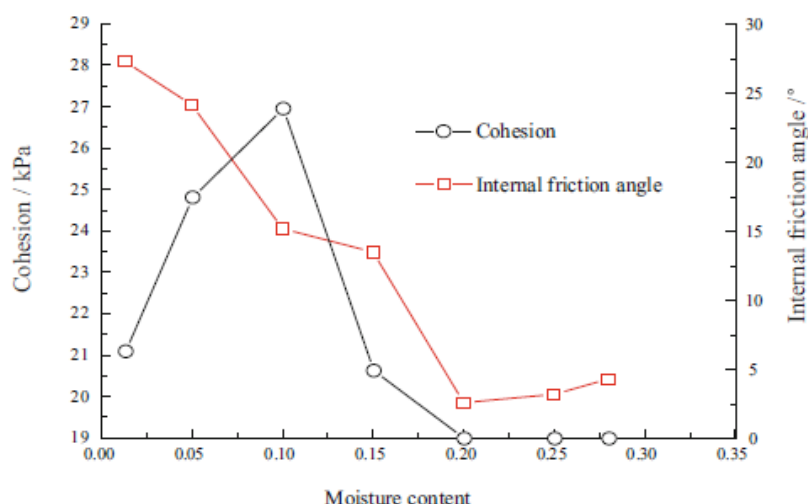


Figura 3-7: Relación entre parámetros de resistencia al corte (c , ϕ) y contenido gravimétrico de agua (w) para relaves finos parcialmente saturado (Dong et al. 2018)

La Figura 3-7 muestra los resultados de los ensayos triaxiales ejecutados. Se observa un incremento en todos los casos de la resistencia al corte al reducir el contenido de humedad a excepción de la muestra con contenido de humedad de 2.9%. Las muestras presentan en su mayoría un comportamiento de endurecimiento con deformación a bajos contenidos de humedad, sin embargo, a incrementar el grado de saturación el comportamiento comienza a ser ligeramente del tipo softening o de ablandamiento con deformación.

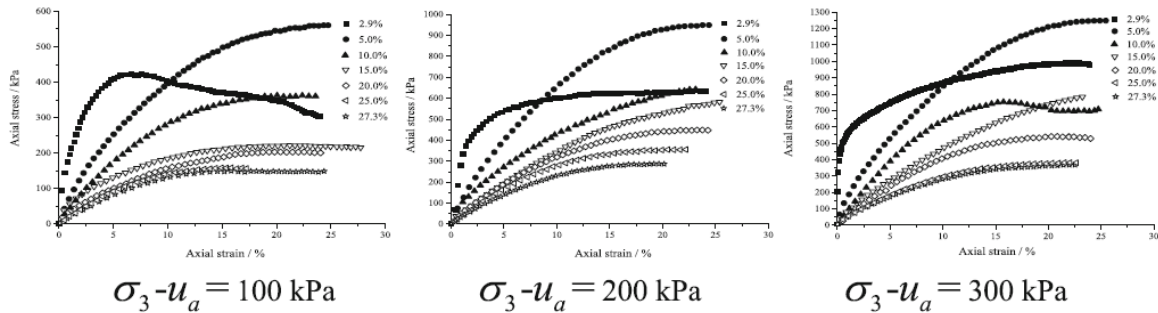


Figura 3-8: Curvas esfuerzo-deformación de relaves finos parcialmente saturados con diferente contenido de humedad (Dong et al. 2018)

Por otro lado, Gallardo et al. (2022) desarrollo una investigación para evaluar la compactación por peso propio y la resistencia al corte en condiciones no saturadas en relaves de cobre filtrados, es decir, en estado parcialmente saturado. El relave evaluado en dicho estudio corresponde a un relave limoso de clasificación ML y baja plasticidad. Para los ensayos ejecutados, las muestras fueron preparadas considerando dos valores de densidad, correspondientes al 86% y 81% de la densidad máxima compactada seca obtenida median el ensayo de Proctor estándar, 17.5 kN/m^3 y 16.5 kN/m^3 , respectivamente. Adicionalmente a la caracterización de propiedades índice del material, el programa incluyó la caracterización de la de la curva característica del material (SWCC) con el objetivo de determinar los valores se succión matricial a diferentes contenidos de humedad.

En función de los rangos de succión, la investigación consideró diferentes métodos para obtener el contenido volumétrico de agua a determinados valores se succión matricial: tensiómetro para valores entre 0 a 90 kPa, traslación de ejes para valores entre 50 a 400 kPa, papel filtro para succiones entre 50 kPa a 1.6 MPa y desecador para succiones matriciales en el rango residual de 4 a 110 MPa. Figura 3-8 muestra los resultados experimentales obtenidos para ambas densidades más loas curvas obtenidas por los modelos de ajuste de Van Genuchten (1980), Gardner (1958) y Fredlund y Xing (1994). Se observa que, en ambos casos, las modelas presentan un buen ajuste para los datos medidos, especialmente con aquellos obtenidos con tensiómetro y mediante traslación de eje. La mayor dispersión se observa en aquellos puntos obtenidos con método de papel filtro.

Al comparar ambas curvas se observa que, para la condición más suelta, correspondiente a la curva (a), el valor de entrada de aire (AEV) es menor que para la condición más compacta, lo que es esperable debido al menor índice de vacíos entre partículas y el menor dimensión de los poros, indicando además que el suelo compacto permanece en condición saturada en un rango más amplio de succión.

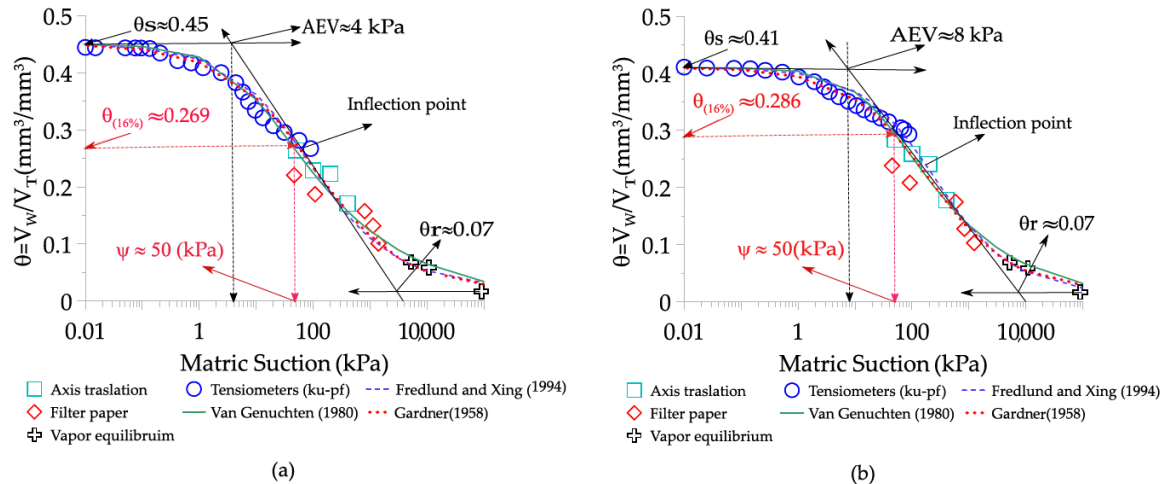


Figura 3-9: SWCC a densidades secas de (a) 16.5 kN/m³ y (b) 17.5 kN/m³ (Gallardo et al. (2022))

Por otro lado, en la investigación de realizaron ensayos triaxiales en condición drenada a valores de succión matricial constante. Estos ensayos se realizaron para ambos valores de densidad, considerando un valor constante de succión matricial de 50 kPa, y presiones de confinamiento neta de 50, 100 y 200 kPa. Adicionalmente los mismos ensayos fueron realizados en condiciones saturadas para comparar los resultados

La figura muestra los resultados obtenidos para las probetas preparadas a una densidad de 16.5 kN/m³. Se observa un incremento en el esfuerzo desviador en las muestras parcialmente saturadas para todas las presiones de confinamiento neto ensayas en comparación a los resultados obtenidos en muestras saturadas. Para el caso de las presiones de confinamiento de 50 y 100 kPa, Unsat_1 y Unsat_2, se observa un aumento en la presión de confinamiento hasta deformaciones axiales de 8% para luego mantener un esfuerzo desviador constante. Se observa que, para las probetas tanto en condición saturada como parcialmente saturadas, el comportamiento no muestra ablandamiento con deformación, a excepción de aquellas ensayas a presiones de confinamiento de 200 kPa. En términos de parámetros de resistencia al corte, el incremento se observa principalmente en el valor de cohesión: se observa un incremento de 30kPa en la cohesión al aplicar la matriz de succión.

Un comportamiento similar se observa en las probetas más densas (17.5 kN/m³), en las que el incremento en la cohesión es de 26.5 kPa. Al observar el comportamiento tensión deformación, es posible concluir que si bien se observa un incremento en resistencia para todas las presiones de confinamiento ensayas al comprar los resultados con aquellos obtenidos en condición saturada, el incremento observado es menor que el obtenido en las probetas más sueltas. Esto se explica principalmente porque las probetas más densa presentan un mayor grado de saturación.

Las investigaciones anteriormente descritas sugieren que el desempeño geomecánico de suelos se ve mejorado al incluir una matriz de succión, evidenciándose en laboratorio un incremento en resistencia. Adicionalmente se observa que en condiciones suelta o medianamente sueltas el efecto de la succiones puede ser ligeramente mayor.

Por otro lado, la transición o ensayos en las distintas zonas de la curva SWCC no permiten concluir cuanto es lo que hay que aplicar de succión.

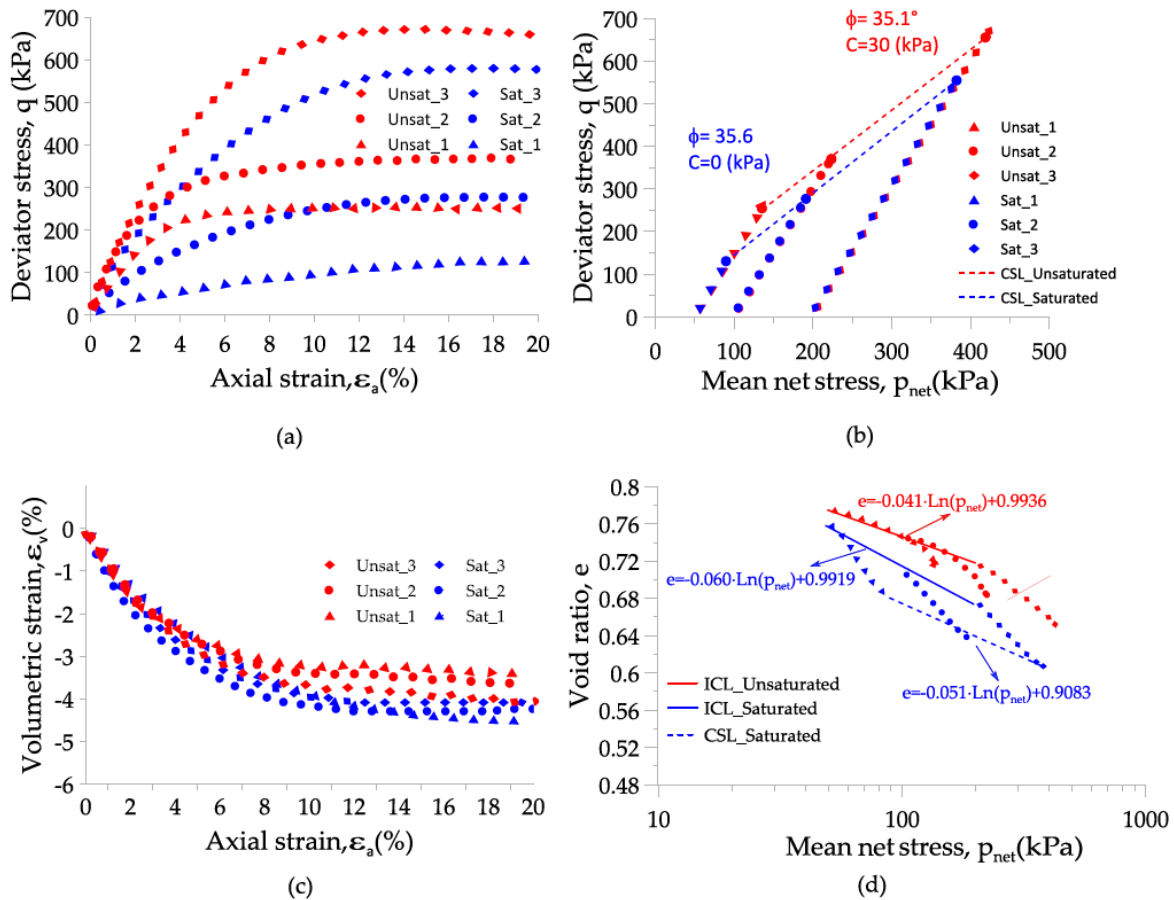


Figura 3-10: Resultados triaxiales CD a densidad seca de 16.5 kN/m³. (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) Trayectoria de tensiones p-q, (c) Deformación volumétrica versus deformación axial, (d) Diagrama p versus relación de vacíos (Gallardo et al. (2022))

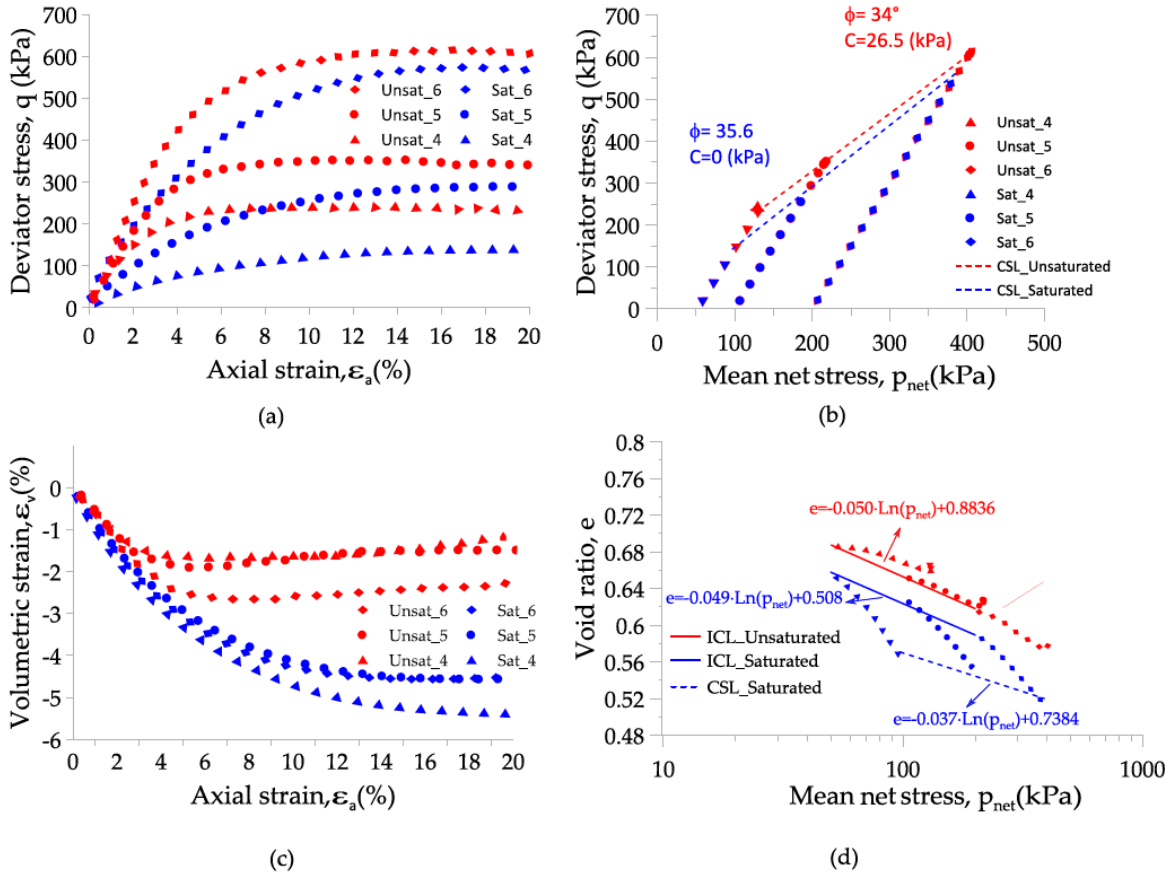


Figura 3-11: Resultados triaxiales CD a densidad seca de 17.5 kN/m³. (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) Trayectoria de tensiones p-q, (c) Deformación volumétrica versus deformación axial, (d) Diagrama p versus relación de vacíos (Gallardo et al. (2022))

A partir de los estudios discutidos en el presente capítulo es posible concluir que, si bien la succión y la reducción del contenido de humedad en relaves generan un aumento en la resistencia al corte del material, aspectos como la presión de confinamiento, el nivel de deformación y la densidad son relevantes y requieren ser evaluados en la profundidad a la hora de extrapolar estos resultados al diseño de depósitos de relaves. Es posible observar que a altas presiones de confinamiento y en estado denso, si bien existe un incremento en la resistencia al corte respecto a la condición saturada, este es menor que el incremento observado para mismos valores de succión en probetas sueltas y ensayadas a presiones de confinamiento menor. Esto es especialmente relevante considerando la implementación de depósitos de relaves filtrados en la industria del cobre chilena, que dada las altas tasas de producción de relave requiere de depósitos de gran magnitud y por ende de gran altura. Adicionalmente a lo anterior, los estudios que analizan estos efectos en relaves de cobre a distintos valores de succión, son limitados.

Expuesto lo anterior, se observa la necesidad de explorar la respuesta geomecánica y variación de la resistencia al corte de relaves de cobre cubriendo un amplio rango de succión y presiones de confinamiento.

CAPÍTULO 4: Estudio Experimental

Con el objetivo de caracterizar la respuesta al corte drenada de relaves de cobre en condición parcialmente saturada, la investigación consideró un extenso trabajo de pruebas experimentales en laboratorio, los cuales incluyeron ensayos de caracterización para la determinación de las propiedades índice del material, ensayos para la determinación de las propiedades hidráulicas del material y finalmente ensayos de resistencia al corte en condición saturada y parcialmente saturada. Estos últimos, modificando variables que pudiesen afectar de manera significativa el comportamiento geomecánico del material, como presión de confinamiento, matriz de succión. Los ensayos en condición saturadas han sido propuestos para establecer comparaciones con los ensayos parcialmente saturados.

En los siguientes capítulos se presentarán las características del material utilizado para efectuar la investigación y se describirán las consideraciones y supuestos del programa experimental.

4.1 Material y propiedades índice

En este programa experimental se utilizó como material principal relaves de cobre derivados del proceso de extracción de cobre de una mina a cielo abierto, ubicada en la zona central de Chile. El relave utilizado corresponde a un relave de granulometría integral, es decir, que no ha sido fraccionado o seleccionado por procesos de cicloneo. Su color es grisáceo y no posee olor ni contenido de materia orgánica. Es importante mencionar que el material fue recibido en formato pulpa con un contenido de sólidos en peso cercano al 55%. Debido a lo anterior, la pulpa fue secada al horno y posteriormente el material fue homogenizado con la finalidad de evitar el segregamiento del material y unificar la muestra.

El Gráfico 4-1 presenta la distribución granulométrica del relave en estudio, la cual fue obtenida mediante método de tamizado e hidrómetro para la fracción fina de la muestra, es decir, partículas de tamaño inferior a 0.075mm. Como se observa, el material presenta un 55% de arenas y un 45% de material fino (<0.075mm). Adicionalmente se efectuaron ensayos para la obtención de los Límites de Atterberg del material, el cual presenta características no plásticas (NP), por lo cual, de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) el material de relaves clasifica como una Arena Limosa (SM).

Por otro lado, como parte de los ensayos de caracterización y propiedades índice del material, se realizaron sobre muestras del relave, ensayos para la obtención de la gravedad específica (Gs), bajo el método descrito en la norma ASTM D854, obteniéndose como un valor de 2.815.

En cuanto a la relación humedad – compactación, se ejecutaron ensayos de Proctor Modificado, siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM D1557. De acuerdo con estos resultados la densidad máxima seca del relave (DMCS) es de entre 2.05 g/cm³ – 2.06 g/cm³, con un contenido óptimo entre 9.5% a 10%. El Gráfico 4-2 presenta los resultados del ensayo de Proctor Modificado para las dos muestras ensayadas.

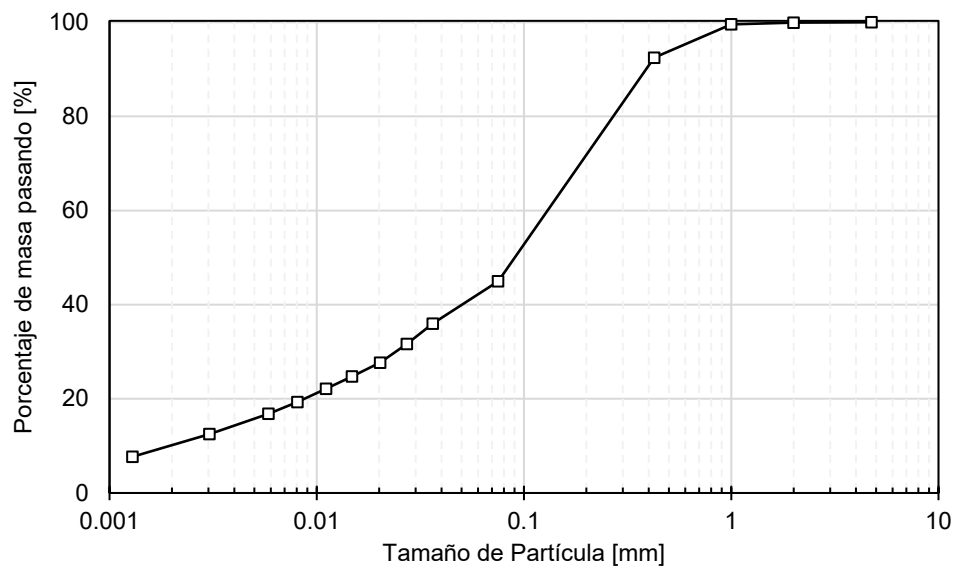


Gráfico 4-1: Distribución granulométrica del relave en estudio

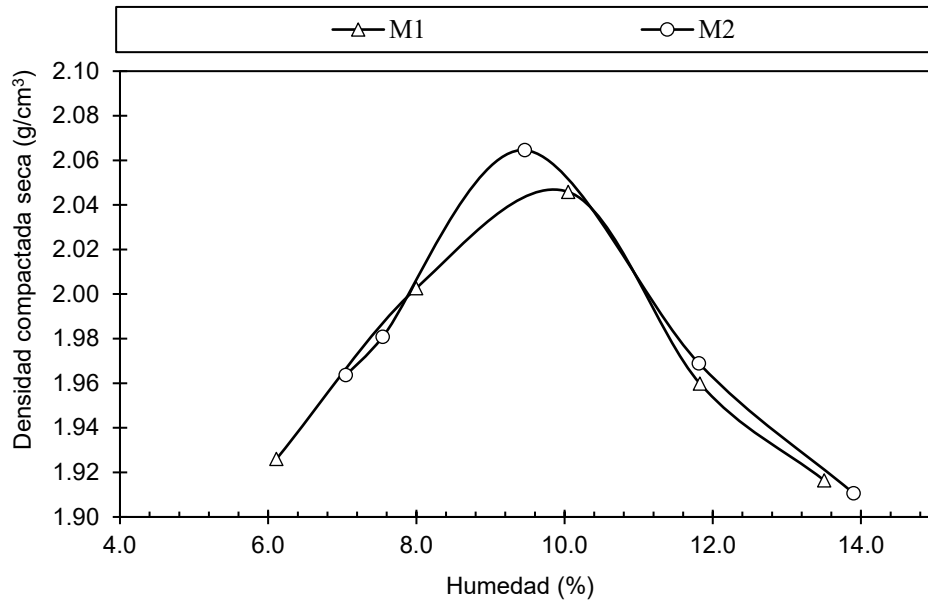


Gráfico 4-2: Densidad compactada seca versus humedad – Proctor Modificado

La Tabla 4-1 a continuación presenta un resumen de las propiedades índice obtenidas en laboratorio para el material en estudio.

Tabla 4-1: Propiedades índice del relave en estudio

Propiedad	Unidad	Valor
Tamaño Máximo ($d_{m\acute{a}x}$)	mm	2
Porcentaje de Grava	%	0
Porcentaje de Arena	%	55
Contenido de Finos	%	45
Gravedad Específica (Gs)	-	2.815
Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS)	gr/m ³	2.05
Humedad Óptima	%	10

4.2 Propiedades hidráulicas

Con el fin de caracterizar el comportamiento hidráulico y sus propiedades de retención de agua, se realizaron ensayos para la obtención de la permeabilidad y de la curva de retención de agua. En ambos casos las muestras fueron preparadas a un 80% de la densidad máxima compactada seca.

4.2.1 Curva de retención de agua

Para la obtención de la curva de retención de agua, fueron seguidos los procedimientos descritos en la norma ASTM D6836 (2016). La norma detalla cinco métodos distintos en función del tipo de suelo y el rango de succión en el cual se desea medir el contenido de humedad. En particular, para el

material de relave en estudio se utilizaron dos métodos, uno de ellos correspondiente a la cámara de presión con control gravimétrico del contenido de humedad o también denominado Método C para los rangos de succión de 20 a 100 kPa, y medición directa de succión mediante el uso de tensiómetro para succiones de 0 a 20 kPa.

La Gráfico 4-2 muestra los resultados obtenidos para una densidad de 80% de la DMCS utilizando los dos métodos descritos anteriormente y el modelo de ajuste de Van Genuchten. Los parámetros de ajuste obtenidos se presentan en la Tabla 4-1

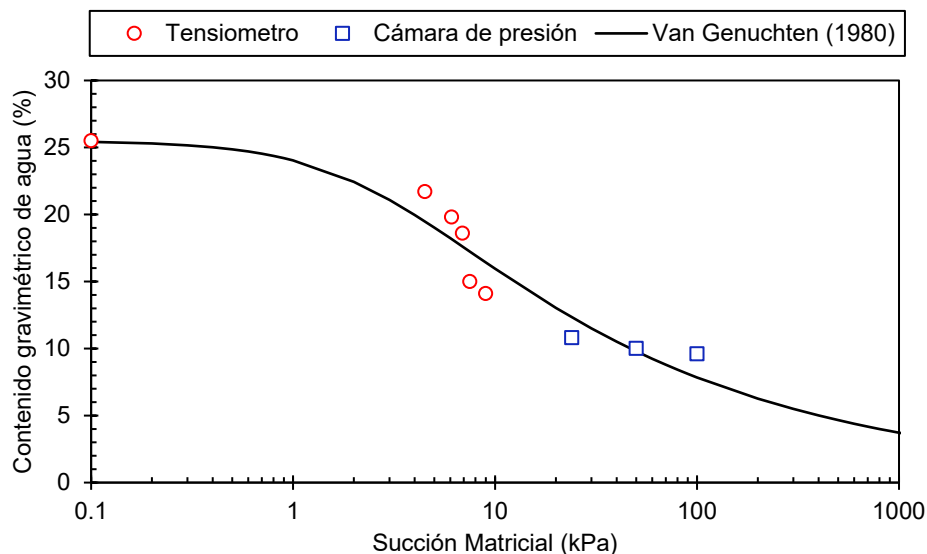


Gráfico 4-3: Curva característica del suelo (SWCC) para el relave en estudio

Tabla 4-2: Parámetros de ajuste para SWCC – Modelo Van Genuchten

Parámetro de Ajuste	Unidad	Valor
a	-	0.375
m	-	1.325
n	-	0.245
W_s	%	25.42

4.2.2 Permeabilidad

Para determinar el coeficiente de permeabilidad del material, se realizaron ensayos de permeabilidad siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM D5084-16a (2016), para la medición de la conductividad hidráulica de suelos saturados utilizando un permeámetro de pared flexible. Los ensayos de permeabilidad fueron efectuados sobre probetas de 100 mm de altura y 50 mm de radio, y preparadas al 80% de la DMCS, compactadas en seis capas de 16.67 mm aproximadamente.

Las probetas fueron consolidadas previo a la medición de permeabilidad a presiones de confinamiento de 100, 200, 300 y 400 kPa. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos para cada presión de confinamiento son presentados en el Gráfico 4-4. Se observa una disminución en la conductividad

hidráulica del material con el incremento en la presión de confinamiento, resultando un valor promedio de $3.45E-07$ m/s, un valor consistente con la granulometría del materia.

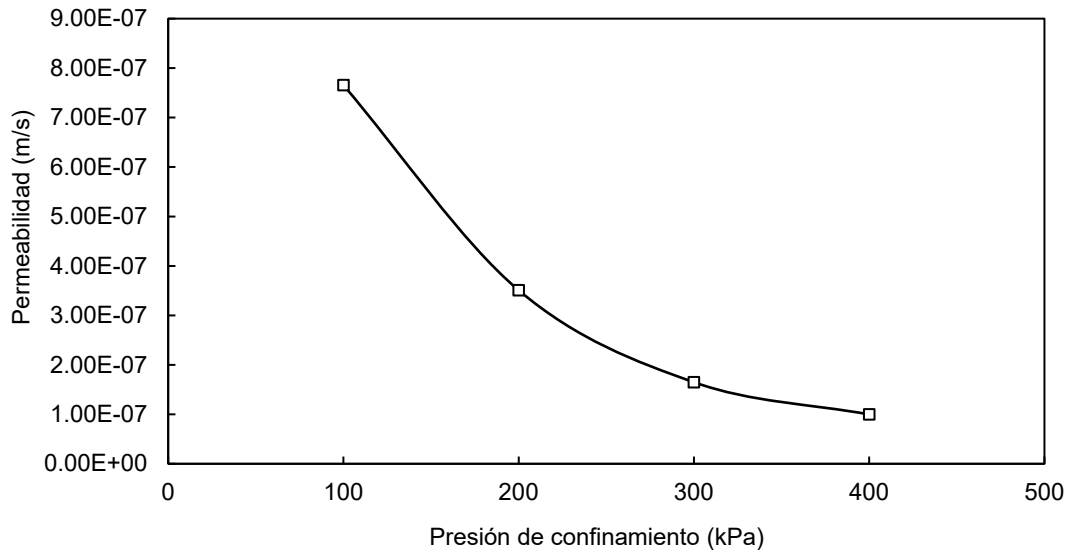


Gráfico 4-4: Permeabilidad versus presión de confinamiento

Por otro lado, la permeabilidad parcialmente saturada puede ser obtenida a partir de la permeabilidad saturada y el ajuste de la SWCC mediante el modelo de Van Genuchten, utilizando la siguiente expresión (Van Genuchten 1980):

$$\frac{K_{\psi}}{K_s} = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1}[1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde

- ψ = cualquier valor de succión de la curva en kPa,
- $K(\psi)$ = permeabilidad parcialmente saturada a cualquier valor de succión en %,
- K_s = permeabilidad Saturada
- a, m, n = parámetros de ajuste adimensionales

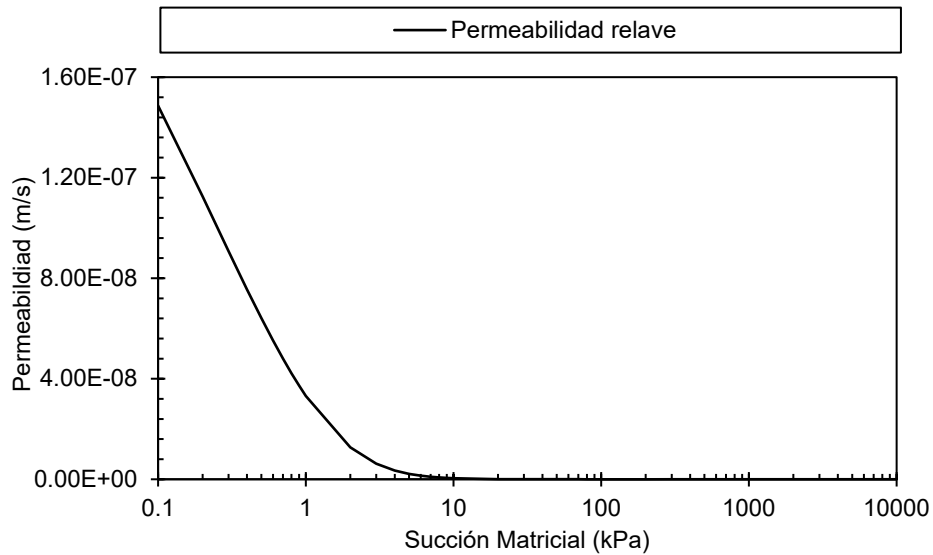


Gráfico 4-5: Permeabilidad versus succión matricial

4.3 Resistencia al Corte

Para caracterizar el comportamiento geomecánico y de resistencia al corte del material, se realizaron ensayos triaxiales saturados y no saturados. Para ambos ensayos, el equipo utilizado corresponde a un triaxial automatizado (GDSTAS) fabricado por la compañía GDS Instrument, ubicado en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María. El equipo está compuesto por un marco de carga de capacidad 50 kN, celda triaxial de presión admisible de 2MPa y controladores de presión de cámara y contra presión de 2MPa y 1MPa, respectivamente. La carga axial es medida mediante una celda de carga sumergida (9.8 ± 0.001 kN), la presión de poros es medida con un transductor de presión (1000 ± 0.1 kPa), mientras que el desplazamiento vertical es medido con un LVDT (50 ± 0.001 mm). El conjunto cuenta con un sistema automatizado de control, monitoreo y adquisición de datos (DAQ), manipulado mediante el software GDSLAB.

Un esquema del equipo y sus principales componentes se presenta en la Figura 4-1

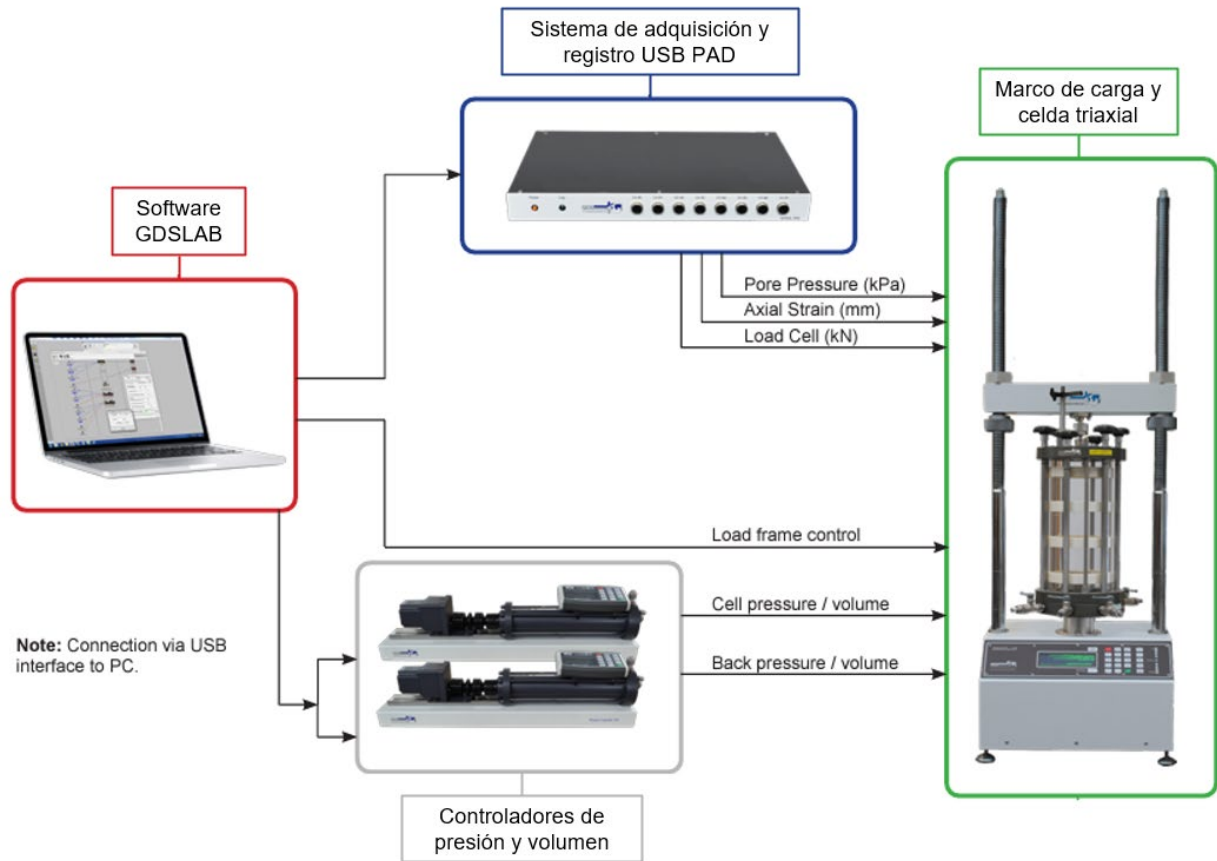


Figura 4-1: Esquema equipo triaxial y sus principales componentes (Fuente: <https://www.gdsinstruments.com/>)

4.3.1 Ensayos Triaxiales Saturados

4.3.1.1 Preparación de probetas

Para la preparación de ensayos triaxiales saturados se elaboraron probetas de 50mm de diámetro y 100mm de altura, considerando el tamaño de partículas máximo del material. Cada probeta fue preparada mediante el método de apisonamiento húmedo de seis capas de 16.67mm de altura, considerando para ello el acondicionamiento del relave con un contenido de agua igual a la humedad óptima del material, valor obtenido mediante los ensayos de Proctor Modificado.

Una vez preparada las probetas, estas fueron recubiertas con una membrana de látex de espesor igual a 0.315mm, de protección y aislación, la que fue colocada mediante el uso de un expansor. La figura muestra a modo de ilustración una probeta preparada al 80% de la DMCS y una probeta con la membrana de látex de protección previo al montaje en la celda triaxial.

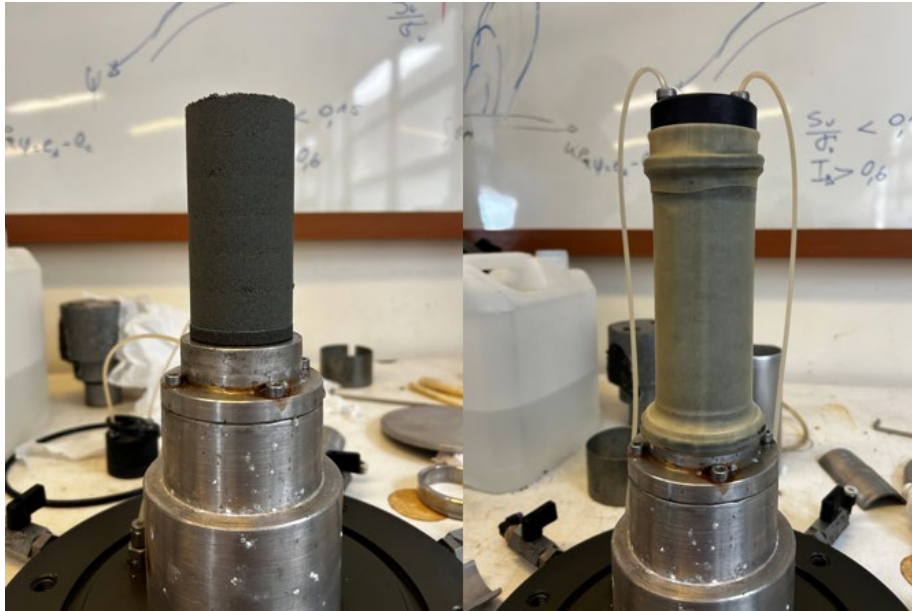


Figura 4-2: Probeta de relaves para ejecución de ensayos triaxiales

4.3.1.2 Procedimiento

Con fines comparativos, en este estudio se ejecutaron ensayos de compresión triaxial isotrópicamente consolidados sobre muestras de relave saturadas. Se realizaron ensayos drenados (CID) y ensayos no drenados (CIU) en la etapa de corte, considerando los procedimientos descritos en las normas ASTM D4767 y ASTM D 7871, respectivamente.

Las probetas fueron saturadas mediante la aplicación de contrapresión hasta alcanzar valores de B de Skempton igual o mayores a 0.95. Una vez saturadas, las probetas fueron isotrópicamente consolidadas a diferentes presiones de confinamiento hasta el término de la consolidación secundaria, etapa que fue alcanzada entre un periodo de 9 a 12 horas.

Finalmente, para la etapa de corte se consideró la aplicación de carga axial a una razón de deformación axial del 4% por hora hasta alcanzar deformaciones axiales de aproximadamente 20%.

4.3.1.3 Programa de Ensayos

Parte del estudio considero la ejecución de ensayos triaxiales saturados con el objetivo de determinar las principales variables (Acá buscar lo de las variables intrínsecas en el libro de licuefacción) que controlan el comportamiento geomecánico del material y su respuesta al corte. Por lo anterior, el programa de ensayos incluyó ensayos CIU y CID a probetas preparadas a diferentes densidades y testeadas a diferentes presiones de confinamiento. En la tabla se presenta un resumen de los ensayos

Tabla 4-3: Programa de ensayos triaxiales CID y CIU sobre relaves en condición saturada

Nombre Ensayo	Tipo de ensayo	Densidad Inicial (gr/cm ³)	Índice de vacíos Inicial	Presión de Confinamiento
SAT-U100-80	CIU	1.64 (80%DMCS)	0.716	100
SAT-U200-80	CIU	1.64 (80%DMCS)	0.716	200
SAT-U400-80	CIU	1.64 (80%DMCS)	0.716	400
SAT-D100-80	CID	1.64 (80%DMCS)	0.716	100
SAT-D300-80	CID	1.64 (80%DMCS)	0.716	300
SAT-D500-80	CID	1.64 (80%DMCS)	0.716	500
SAT-U100-90	CIU	1.85 (90%DMCS)	0.526	100
SAT-U200-90	CIU	1.85 (90%DMCS)	0.526	200
SAT-U400-90	CIU	1.85 (90%DMCS)	0.526	400

4.3.2 Ensayos triaxiales No Saturados

4.3.2.1 Preparación de probetas

La preparación de probetas para el caso de los ensayos no saturados, siguieron las mismas etapas y procedimientos que para el caso de los ensayos triaxiales saturados, los cuales fueron detallados en la sección 4.3.1.1.

4.3.2.2 Habilitación Equipo Triaxial

Para la ejecución de los ensayos triaxiales no saturados, el equipo triaxial fue habilitado para permitir la aplicación de presión de poro de agua y presión de poro de aire. A continuación, se presenta el detalle de las principales modificaciones realizadas en el equipo.

- Pedestal inferior con disco cerámico: con el objetivo de poder aplicar presión de aire en la probeta de manera uniforme y sin fugas, se implementó un pedestal en la base con la inserción de un disco cerámico de valor de entrada de aire de 5 Bar (AEV=500 kPa). De acuerdo al programa de ensayos diseñado para la etapa experimental, el AEV del disco es apropiado para la ejecución de todo los ensayos bajo las succiones y presiones de aire consideradas. Las especificaciones del disco cerámico se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Especificaciones técnicas disco cerámico (Fuente: <https://www.soilmoisture.com/>)

Parámetro	Unidad	Valor
Valor de Entrada de Aire	Bar kPa	5 500
Presión típica de burbujeo	Psi	80
Tamaño de poro efectivo	Micrón	0.5
Conductividad Hidráulica	cm/s	1.21E-07
Porosidad	% por volumen	31
Diámetro	cm	4.13 cm
Espesor	cm	0.71
Peso	gr	16.57

-
- El disco fue adherido al pedestal mediante el uso de resina epóxica. La Figura 4-3 muestra los planos del pedestal de aluminio diseñado para efectos de esta investigación. El pedestal está conformado por dos partes, Parte A y Parte B, con el objetivo de hacer el pedestal adaptable a discos cerámicos de diferentes valores de entrada de aire y adicionalmente poder hacer el recambio del disco en caso de daños durante la ejecución de los ensayos. Ambas partes del pedestal presentan conductos conectados a la base que permiten unir el pedestal con el controlador y transductor de presión de agua y así permitir el ingreso y la salida de agua en la probeta durante las diferentes etapas del ensayo (saturación, consolidación y corte). Adicionalmente, el diseño de la pieza consideró un biselado en la zona basal de la Parte B, en contacto con el disco cerámico, a modo de distribuir uniformemente la presión de agua en la base.
 - Por otro lado, en las zonas perimetrales a uniones y conductos, se consideraron biselados para incorporar sellos de gomas, a modo de evitar fugas de agua y/o aire en la ejecución del ensayo.
 - Regulador de presión de aire: si bien GDS dispone de un controlador de presión de aires para el desarrollo de ensayos triaxiales no saturados que permiten controlar tanto el volumen como la presión de aire aplicada en la probeta, esta extensión del equipo no se encontraba disponible para el desarrollo de este estudio. En su defecto, se utilizó un cilindro con aire comprimido y un regulador de presión para seleccionar y fijar la presión deseada en cada ensayo. El volumen de aire no fue controlado durante el ensayo mediante un transductor de presión. El conducto para la aplicación de la presión de aire en la muestra fue conectado al CAP superior, el cual se monta en la zona superior de la probeta.
 - Previo al desarrollo de cada ensayo, la Parte B del pedestal fue sumergida en agua por un mínimo de 8 horas para garantizar la saturación del disco cerámico, previa ejecución del ensayo.

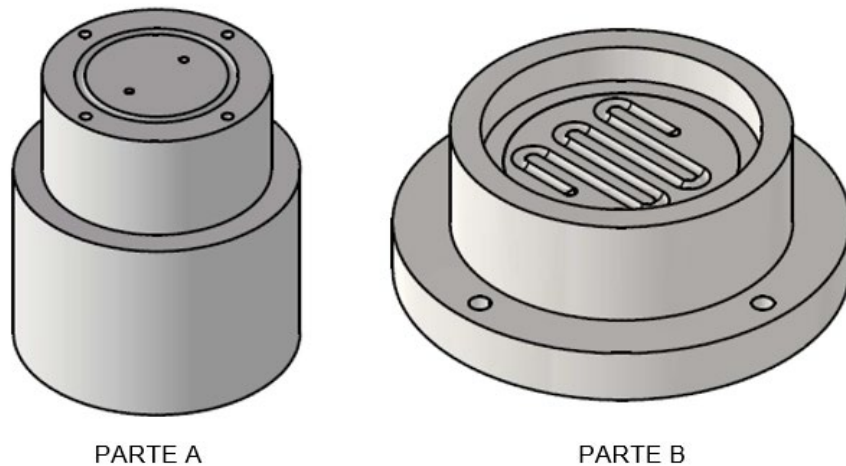


Figura 4-3: Probeta de relaves para ejecución de ensayos triaxiales (Fuente: Elaboración propia)

4.3.2.3 Procedimiento

Si bien no existe una normativa definitiva que establezca y normalice los procedimientos y metodologías que deben seguirse durante la ejecución de un ensayos triaxiales sobre suelos parcialmente saturados, existen una serie de referencias de estudios e investigaciones que proponen procedimientos que han sido definidos para garantizar una adecuada medición y análisis de la respuesta geomecánica de suelos parcialmente saturados, tal y como se discutió en el marco teórico del presente documento.

Todos los ensayos parcialmente saturados desarrollados para efectos de esta investigación fueron del tipo CID, es decir, consideraron condición de drenaje en las etapas de consolidación y corte, tanto para la presión de poro de agua como la presión de poro de aire. Al controlar la presión de agua y de aire durante consolidación y corte, la succión matricial durante ambas etapas se mantuvo constante.

Las principales etapas aplicadas posterior al montaje de la probeta y sus consideraciones fueron las siguientes:

- **Saturación:** el periodo de saturación para el caso de ensayos en probetas parcialmente saturadas está controlado por la permeabilidad del disco cerámico, que, a pesar de ser un material permeable ante el agua, es baja. La saturación se llevó a cabo mediante rampas de saturación hasta alcanzar un valor de B de Skempton de 0.95, el cual se alcanzaba en un periodo de aproximadamente 72 horas.
- **Consolidación y traslación de eje:** Una vez completada la saturación, se ejecutó en cada una de las muestras la etapa de consolidación y traslación de ejes, en la que se aplicó la presión de aire acorde a la matriz de succión considerada en el programa de ensayo y la presión de confinamiento neta. El periodo de consolidación se consideró terminado una vez completada la consolidación secundaria, en un periodo de aproximadamente 48 horas.
- **Corte:** una vez alcanzada la etapa de consolidación se procedió con la etapa de corte permitiendo el drenaje tanto de la presión de aire como de la presión de agua. La aplicación de carga axial fue considerada a una razón de deformación axial del 1.5% por hora hasta alcanzar deformaciones axiales de aproximadamente 20%.

4.3.2.4 Programa de Ensayos

Se ejecutaron ensayos bajo tres valores de succión matricial, de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa, considerando las características de la SWCC específica para el suelo en estudio. En relación a las presiones de confinamiento neta, se consideraron presiones de 300 kPa y 500 kPa. Para el caso del set de ensayos a matriz de succión de 350 kPa, se consideró la ejecución de una tercera probeta a 400 kPa. Todos las probetas fueron preparadas al 80% de la DMCS.

La Tabla 4-5 resume las principales características del programa de ensayos triaxiales CID sobre muestras de relave parcialmente saturadas.

Tabla 4-5: Programa de ensayos triaxiales CID sobre relaves en condición parcialmente saturada

Nombre Ensayo	Tipo de ensayo	Matriz de Succión (kPa)	Presión de Aire (kPa)	Presión de Agua (kPa)	Densidad de Preparación	Presión de Confinamiento Neta (kPa)
UNSAT-D300-80-8MS	CID	8	150	142	1.64 (80%DMCS)	300
UNSAT-D500-80-8MS	CID	8	150	142	1.64 (80%DMCS)	500
UNSAT-D300-80-50MS	CID	50	200	150	1.64 (80%DMCS)	300
UNSAT-D500-80-50MS	CID	50	200	150	1.64 (80%DMCS)	500
UNSAT-D300-80-350MS	CID	350	450	100	1.64 (80%DMCS)	300
UNSAT-D400-80-350MS	CID	350	450	100	1.64 (80%DMCS)	500
UNSAT-D500-80-350MS	CID	350	450	100	1.64 (80%DMCS)	300

CAPÍTULO 5: Resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de los ensayos triaxiales ejecutados, en términos del comportamiento y resistencia al corte, trayectoria de tensiones y análisis de estado crítico. Lo anterior tanto condición parcialmente saturada como en condición saturada.

5.1 Ensayos triaxiales saturados

5.1.1 Respuesta al corte

Como se indicó en el capítulo 4, el programa de ensayos experimental contempló la ejecución de ensayos triaxiales del tipo CIU y CID, en muestras de suelo saturadas a diferentes presiones de confinamiento y considerando probetas preparadas al 80% y al 90% de la DMCS.

El Gráfico 5-1 presenta los resultados obtenidos los ensayos CIU de ambas densidades en términos de: (a) esfuerzo desviador ($\Delta\sigma$) versus deformación axial (ϵ_a), (b) exceso de presión de poros (Δu) versus deformación axial (ϵ_a) y finalmente (c) razón de esfuerzos principales efectivos versus deformación axial (ϵ_a).

Para el caso de los especímenes preparados a un 80% de la DMCS, se observa un incremento en el esfuerzo desviador máximo ($\Delta\sigma$) con el aumento en la presión de confinamiento, lo que se exhibe especialmente para la presión de confinamiento $\sigma_3=400$ kPa. Si bien para el caso de los especímenes ensayados a $\sigma_3=100$ kPa y $\sigma_3=200$ kPa, el esfuerzo desviador máximo parece similar, el incremento es de aproximadamente un 20%. Este incremento en resistencia con el aumento de la presión de confinamiento es más evidenciable para los ensayos realizados sobre muestras más densas preparadas al 90% de la DMCS.

Para ambas densidades se observa que tras alcanzar el valor peak en resistencia, esta comienza a disminuir a medida que incrementa la deformación, mostrando un comportamiento del tipo strain-softening o ablandamiento con deformación, hasta alcanzar valores constantes en hacia el término del ensayo. En ambos casos los valores constantes se alcanzan aproximadamente en el rango de $\varepsilon_a \approx 7\%$ al 10%.

En relación con el gráfico de exceso de presión de poros (Δu) versus la deformación axial (ε_a), es posible observar que para ambas densidades y para el rango de presiones de confinamiento ensayadas, los especímenes presentan un incremento en el exceso de presión de poros con el aumento en deformación, mostrando un comportamiento dilatante. Para el caso de las probetas preparadas a un 90% de la DMCS se observa que inicialmente y hasta valores de $\varepsilon_a \approx 2\%$ y 4%, el exceso de presión de poros decae, mostrando una tendencia dilatante del material, no obstante, a deformaciones superiores al 4% la presión de poros comienza a incrementar lo que es consistente con lo observado en el gráfico $\Delta\sigma$ versus ε_a .

En cuanto a la razón de esfuerzos principales efectivos (σ'_1 / σ'_3) versus deformación axial, para el caso de las muestras preparadas a un 80% de la DMCS, se observa un incremento en σ'_1 / σ'_3 hasta el término de la etapa de corte ($\varepsilon_a \approx 20\%$) para las presiones de confinamiento de $\sigma_3=100$ kPa y $\sigma_3=200$ kPa. No obstante, para caso de la probeta ensayada a $\sigma_3=400$ kPa, la razón σ'_1 / σ'_3 alcanza un valor máximo hasta $\varepsilon_a \approx 5\%$ el cual permanece constante hasta el término de la etapa de corte. Para el caso de las muestras preparadas al 90% de la DMCS, las curvas son similares para las tres presiones de confinamiento ensayadas. Adicionalmente el aumento de la razón σ'_1 / σ'_3 es significativo hasta valores de $\varepsilon_a \approx 2\%$, para posteriormente permanecer constante o con incrementos mínimos.

El Gráfico 5-2 presenta las trayectorias de tensiones durante la etapa de corte para las muestras preparadas a densidades del 80% de la DMCS y 90% de la DMCS. Como se observa las probetas de menor densidad, mostraron un comportamiento típicamente contractivo durante el corte debido a la generación de exceso de presión de poros, lo anterior para las tres presiones de confinamiento ensayadas. Para el caso de las probetas preparadas al 90% de la DMCS estas evidenciaron un comportamiento dilatante hasta $\varepsilon_a \approx 2\%$ y 4%, no obstante, posterior a ese nivel de deformación, el comportamiento pasa a ser contractivo evidenciándose una transformación de fase.

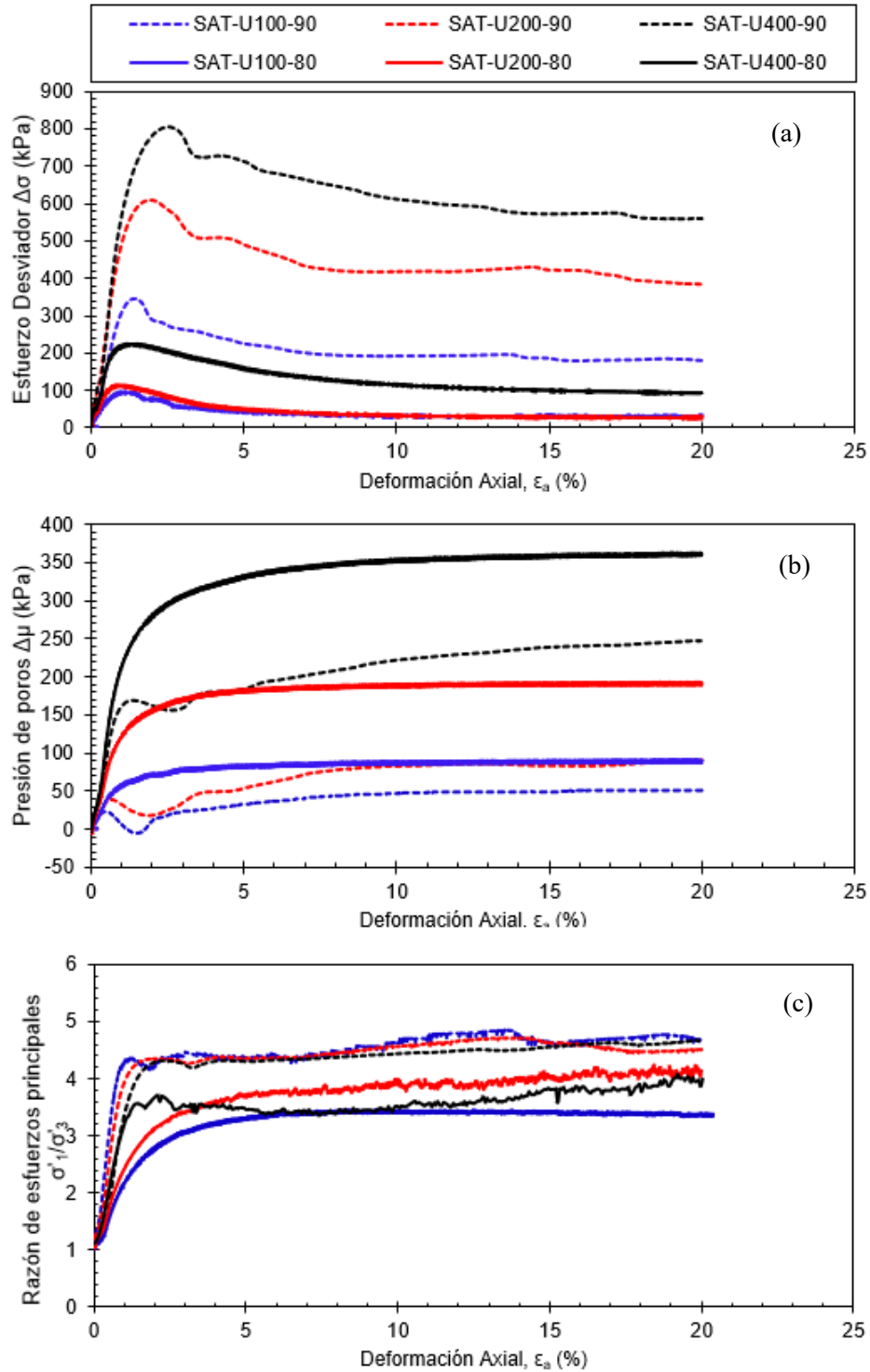


Gráfico 5-1: (a) Esfuerzo desviador, (b) exceso de presión de poros, y (c) razón de esfuerzos principales efectivos (c) versus deformación axial en ensayos triaxiales CIU en relave en condición saturada

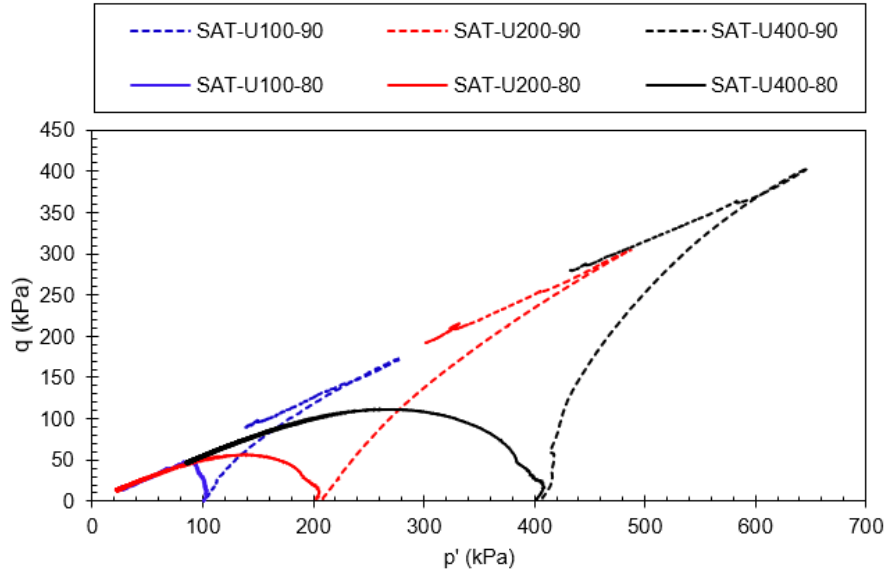


Gráfico 5-2: Trayectoria de tensiones p' - q de ensayos triaxiales CIU en relaves en condición saturada.

El Gráfico 5-3 presenta los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales CID ejecutados sobre muestras saturadas preparadas al 80% de la DMCS. Los ensayos fueron realizados a presiones de confinamiento de 100, 300 y 500 kPa. Como se observa en el Gráfico 5-3 (a), al igual que para los ensayos CIU, se desarrolla un incremento en el esfuerzo desviador con el aumento de la presión de confinamiento. Adicionalmente las tres probetas muestran un comportamiento de endurecimiento con deformación, no observándose el desarrollo de resistencias peak ni valores residuales al aumentar la deformación; por el contrario, existe un incremento en el esfuerzo desviador con deformación.

Para el caso del cambio volumétrico, el Gráfico 5-3 (a) muestra la deformación volumétrica durante la etapa de corte versus de deformación axial. Los tres especímenes muestran un comportamiento del tipo contractivo, en el que la muestra se contrae al incrementar la deformación axial. El mayor cambio volumétrico se observa a una presión de confinamiento de 100 kPa. Para el caso de las presiones de confinamiento de 300 y 500 no se visualizan diferencias significativas en el cambio volumétrico. Lo anterior es esperable debido a que durante la etapa de consolidación la probeta SAT-D100-80 experimentó menores cambios volumétricos.

El Gráfico 5-4 presenta las trayectorias de tensiones de los ensayos CID obtenidas para las tres presiones de confinamiento en el espacio p - q . Es posible observar de manera preliminar que los resultados son consistentes y se ajustan a una envolvente única de falla con intercepto cercano a cero, por lo que la resistencia del material es mayoritariamente friccional, con bajo o nulo valor de cohesión.

Los resultados principales de los ensayos en condición saturada se presentan en la Tabla 5-1.

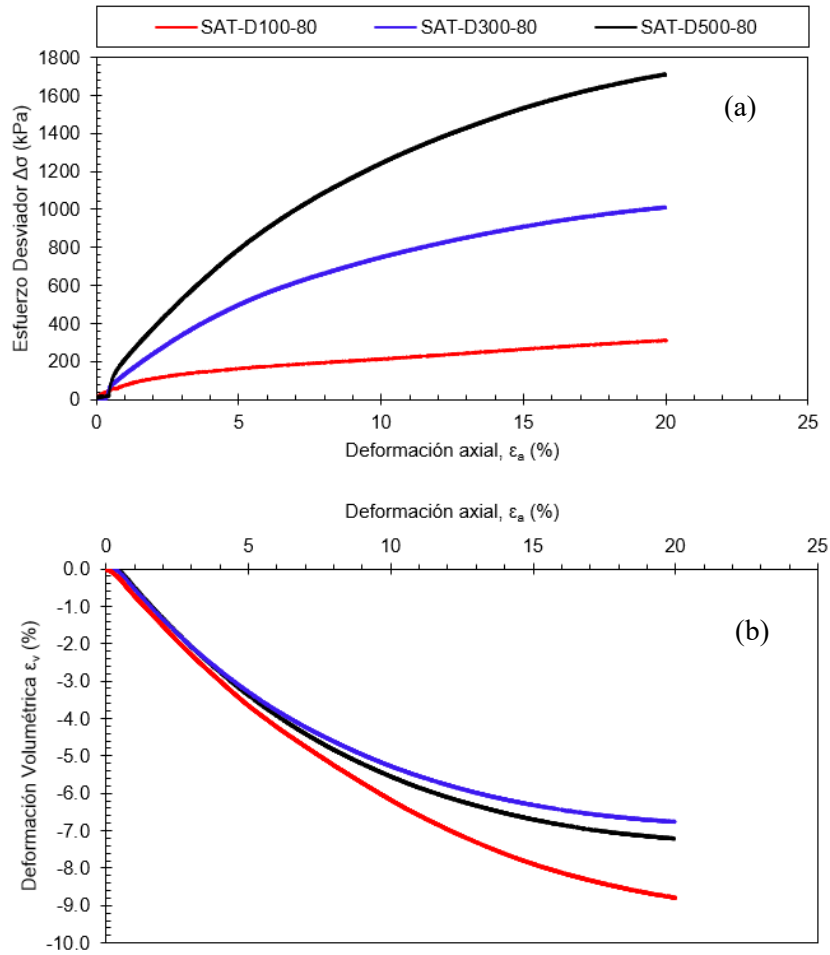


Gráfico 5-3: a) Esfuerzo desviador y (b) deformación volumétrica, versus deformación axial en ensayos triaxiales CID en relave en condición saturada

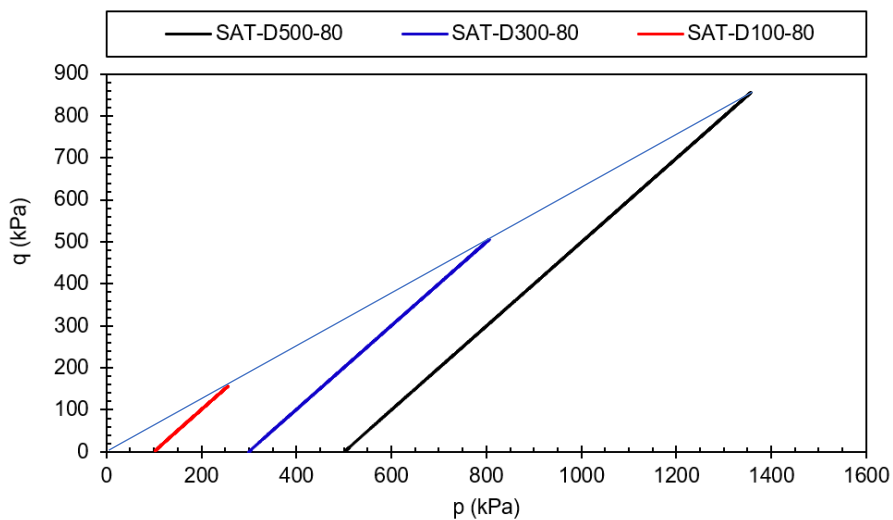


Gráfico 5-4: Trayectoria de tensiones – Ensayos CID en relaves en condición saturada

Tabla 5-1: Resultados ensayos triaxiales saturados

Ensayo	Tipo de Ensayo	σ_c (kPa)	$\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\Delta\sigma_f$ (kPa)	σ'_{3f} (kPa)	σ'_{1f} (kPa)	p'_f (kPa)	q'_f (kPa)	e_i (-)	e_f (-)	u_f (kPa)
SAT-U100-80	CIU	100	97.75	32.09	11.00	43.09	27.04	16.04	0.516	0.516	89.00
SAT-U200-80	CIU	200	112.34	27.08	8.60	35.68	22.14	13.54	0.512	0.512	191.40
SAT-U400-80	CIU	400	222.47	92.065	38.90	130.96	84.93	46.03	0.505	0.505	361.10
SAT-D100-80	CID	100	311.68	311.68	100.00	411.68	255.28	155.58	0.678	0.530	-
SAT-D300-80	CID	300	1011.46	1011.46	300.00	1311.46	805.63	505.73	0.602	0.494	-
SAT-D500-80	CID	500	1711.74	1711.74	500.00	2211.74	1357.17	855.87	0.567	0.4536	-
SAT-U100-90	CIU	100	345.81	180.29	49.00	229.29	139.15	90.14	0.696	0.696	51.00
SAT-U200-90	CIU	200	609.63	384.52	109.40	493.92	301.66	192.26	0.648	0.648	90.60
SAT-U400-90	CIU	400	805.71	560.23	152.50	712.73	432.61	280.11	0.600	0.600	247.50

Definiciones:

σ_3 = Presi3n de confinamiento

$\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo desviador m\acute{a}ximo

$\Delta\sigma_f$ = Esfuerzo desviador en la falla

σ'_{3f} = Presi3n de confinamiento efectiva en la falla

σ'_{1f} = Presi3n vertical efectiva en la falla ($\sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} + \Delta\sigma_f$)

p'_f = Esfuerzo vertical efectivo medio, donde $p'_f = (\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f})/2$

q'_f = Esfuerzo desviador efectivo medio, donde $q'_f = (\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f})/2$

e_i = \u00cdndice de vac\u00edos al t\u00e9rmino de la consolidaci3n

e_f = \u00cdndice de vac\u00edos en la falla

u_f = Exceso de presi3n de poros en la falla

Notas:

- El criterio de falla se ha definido para todos los ensayos al 20% de la deformaci3n axial

5.1.2 Parámetros resistentes y línea de estado crítico

Considerando los resultados obtenidos de ensayos triaxiales CIU y CID sobre muestras saturadas preparadas a un 80% de la DMCS y ensayos CIU sobre muestras preparadas al 90% de la DMCS, se obtuvieron los parámetros resistentes del material y la línea de estado crítico. Para obtener estos parámetros a partir de ensayos triaxiales, resulta relevante establecer el criterio de falla. De acuerdo a Brandon et al., (2006), es posible establecer criterios de falla en función del tipo de ensayo triaxial disponible. Dentro de los criterios comúnmente utilizados se encuentran: el esfuerzo desviador máximo desarrollado durante la etapa de corte, la razón de esfuerzos principales máxima; la presión de poros máxima, valor límite parámetro de presión de poros de Skempton y valor límite de deformación axial. Por otro lado, la norma ASTM sugiere la definición del criterio de falla para una deformación axial del 15-20%.

Para efectos de esta investigación y dado el comportamiento observado en el material, en que se alcanzan valores residuales a altas deformaciones, no evidenciándose endurecimiento con deformación, se considerará como criterio de falla los valores de esfuerzos obtenidos al 20% de la deformación axial.

El Gráfico 5-5 muestra la envolvente de falla obtenida para el material de relave en estudio en el espacio p' - q . La envolvente de falla en el espacio p' - q se denomina línea K_f y se define mediante la Ecuación 5.1

$$q_f = a + p_f \tan \alpha \quad (\text{Ec.5.1})$$

Donde:

- q_f = valor del esfuerzo desviador medio en la falla
- p_f = valor del esfuerzo medio en la falla
- a = valor del intercepto entre la recta y el eje de las ordenadas (q)
- α = ángulo que forma la recta K_f y el eje de las abscisas (p)

La relación entre q_f , p_f y los parámetros resistentes de la envolvente de falla Mohr-Coulomb, correspondientes al ángulo de fricción interna del material (φ) y la cohesión (c), está dada mediante las siguientes Ecuaciones 5.2 y 5.3.

$$\sin \varphi = \tan \alpha \quad (\text{Ec.5.2})$$

$$c = \frac{a}{\cos \alpha} \quad (\text{Ec.5.3})$$

La recta K_f para el material en estudio fue obtenida mediante una regresión lineal considerando los valores de q_f y p_f de la totalidad de ensayos CIU y CID realizados en condición saturada. Se observa un ajuste adecuado dado el coeficiente de determinación (R^2) obtenido, el cual presenta un valor de 0.999. A partir de la pendiente de la curva se ha determinado un ángulo de fricción interna para el material de 39° y cohesión nula. Estos parámetros se consideran adecuados considerando la granulometría del material y sus características no plásticas.

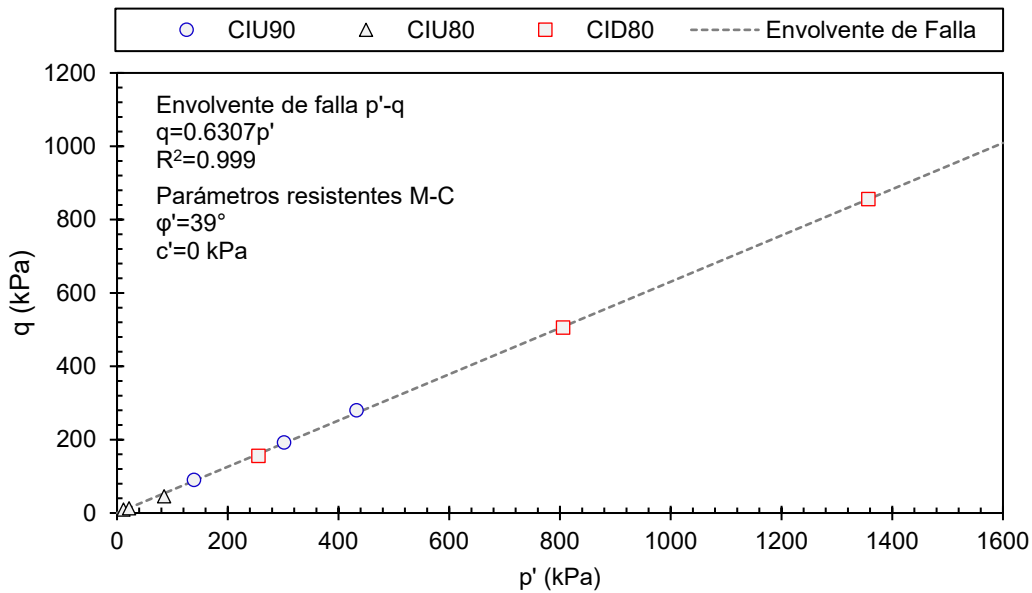


Gráfico 5-5: Envolvente de falla p' - q y parámetros resistentes del relave

El Gráfico 5-6 muestra la regresión para la línea de estado crítico (CSL por sus siglas en inglés) en el espacio e - p' para los ensayos realizados en relave sobre muestras saturadas. En el espacio e - p' la expresión para la CSL queda determinada según la Ecuación 5.4

$$e_c = \Gamma - \lambda \ln(p'_c) \quad (\text{Ec.5.4})$$

Donde:

- e_c = Relación de vacíos en la falla
- p'_c = valor del esfuerzo medio en la falla
- Γ, λ = parámetros de ajuste de la recta en el espacio e_c - $\ln(p_c)$

Considerando lo anterior, la línea de estado crítico y la definición de sus coeficientes ha sido realizada mediante una regresión logarítmica considerando los valores obtenidos en estado crítico para los ensayos ejecutados. Para el caso de los ensayos drenados (CID) los valores de la relación de vacíos fueron obtenidas considerando los valores del controlador de volumen y presión del flujo de agua al interior de la probeta (contrapresión). Para el caso de los ensayos no drenados (CIU) los valores fueron obtenidos mediante la técnica del estruje de la probeta, considerando lo registrado en el

controlador de contrapresión y el control final de humedad en la probeta por medio del secado al horno de esta.

La regresión logarítmica presenta un buen ajuste considerando el valor del coeficiente de determinación obtenido (R^2), el cual presenta un valor de 0.9413. Los valores obtenidos para Γ_1 y λ son de 0.8011 y 0.049, respectivamente. De acuerdo a. Estos valores son consistentes

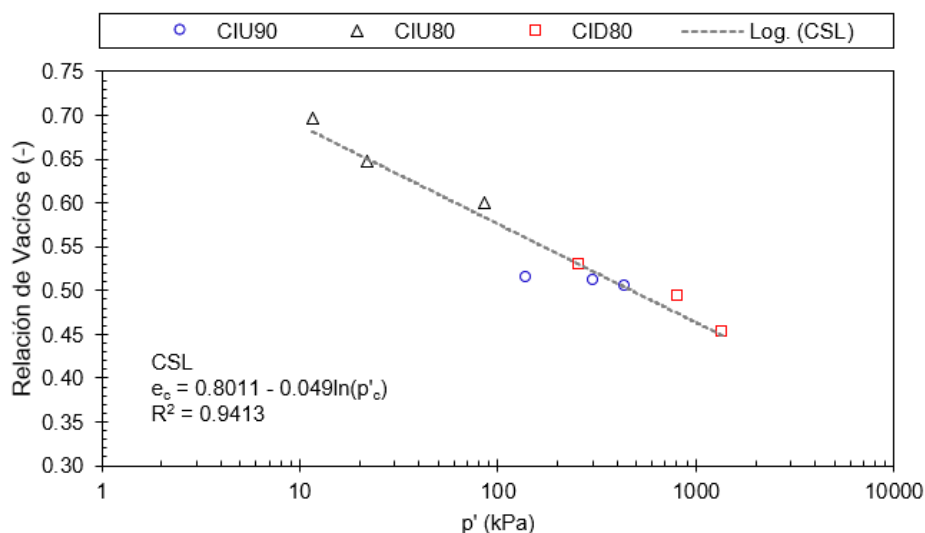


Gráfico 5-6: Relación de vacíos e versus esfuerzo medio efectivo para relave – Línea de estado crítico CSL

5.2 Ensayos triaxiales parcialmente saturados

5.2.1 Succión Matricial Objetivo

El desarrollo de ensayos triaxiales parcialmente saturados consideró tres valores de succión matricial a modo de explorar el efecto del incremento en la succión en el comportamiento al corte y determinar si su aplicación considerando valores de las distintas zonas de la SWCC: como valor representativo de la zona de transición se considera la aplicación de una succión de 8 kPa, para la zona residual se considera una succión matricial de 350 kPa y, debido a los bajos valores de succión matricial, se considera como representativo del área de efecto de borde, los resultados saturados, es decir, a succión matricial cero. Adicionalmente se consideró un set de ensayos bajo una succión matricial de 50 kPa debido a la falta de ajuste de la curva en puntos cercanos a ese valor: si bien los puntos medidos en laboratorio no muestran una diferencia significativa en el contenido de humedad en puntos cercanos a ese valor, el modelo de ajuste muestra que ese valor podría encontrarse aún en la zona de transición.

De acuerdo a la SWCC estimada mediante el modelo de Van Genuchten a partir de los datos obtenidos en laboratorio, el contenido de humedad gravimétrico para cada valor de succión se presenta en la Tabla 5-2 y la ubicación de estos puntos en la curva se presenta en el Gráfico 5-7.

Tabla 5-2: Succión matricial y contenido de humedad – Triaxiales parcialmente saturados

Succión Matricial (kPa)	Contenido de Humedad Gravimétrico (%)
0	25.5
8	16.9
50	9.8
350	5.2

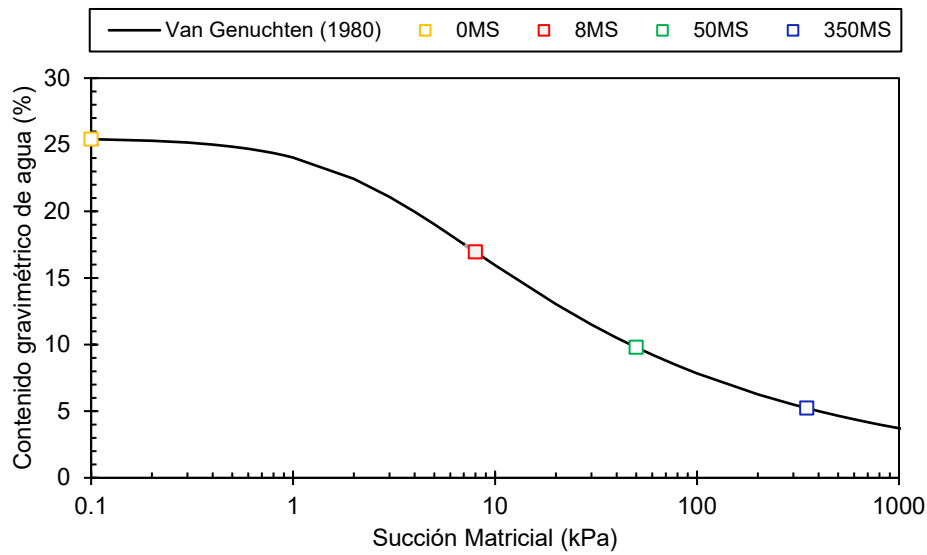


Gráfico 5-7: SWCC y puntos de succión matricial para ensayos triaxiales parcialmente saturados

La matriz de succión fue aplicada mediante la técnica de traslación de ejes, es decir, todos los ensayos triaxiales parcialmente saturados realizados para efectos de esta investigación consideraron la saturación inicial de la probeta y posterior aplicación de la presión de aire en etapa, superior a la contrapresión, a modo de alcanzar la matriz de succión deseada. La presión de aire es aplicada en conjunto a la presión de confinamiento neta, durante la etapa de consolidación hasta alcanzar el equilibrio al fin de la consolidación secundaria. La técnica y sus limitaciones es descrita en la sección.

5.2.2 Respuesta al corte

En las siguientes subsecciones se discuten los resultados obtenidos en términos de la respuesta al corte drenada del material para los tres valores de succión matricial ensayados. Adicionalmente la Tabla 5-3 presenta en detalle los resultados alcanzado en cada probeta.

5.2.2.1 Succión matricial 8 de kPa

El Gráfico 5-7 presenta los resultados obtenidos para los ensayos triaxiales consolidados drenados bajo la aplicación de una succión matricial ($u_a - u_w$) de 8 kPa. Bajo estas condiciones, fueron realizados dos ensayos a distintas presiones de confinamiento neta ($\sigma_3 - u_a$), de 300 y 500 kPa.

Al observar el comportamiento tensión-deformación (Gráfico 5-7(a)), a partir de la gráfica de esfuerzo desviador versus deformación axial ($\Delta\sigma$ vs ε_a) se visualiza incremento en la resistencia con incremento de la presión de confinamiento neta (σ_{3neta}), comportamiento similar al obtenido bajo condiciones saturadas ($u_a - u_w = 0$). Se observa en ambos casos (UNSAT-D500-80-8MS y UNSAT-D300-80-8MS) que se desarrolla un incremento progresivo en el esfuerzo desviador a medida que aumenta la deformación axial producto de la aplicación de carga, no obstante, sobre el 15% de deformación axial, la curva tiende a estabilizar a un valor constante de esfuerzo desviador.

El Gráfico 5-7(b) muestra el cambio volumétrico durante la etapa de corte versus la deformación axial para ambas presiones de confinamiento neta ensayadas. Se observa un comportamiento contractivo durante todo el corte. Este comportamiento es esperable dada las condiciones de drenaje durante el corte tanto para el flujo de aire como para el flujo de agua. La probeta consolidada y cortada a presión de confinamiento neta de 300 kPa mostró una deformación volumétrica máxima de 5.35%, ligeramente menor que su par a 500 kPa, que alcanzó una deformación volumétrica de 6.13%.

En cuanto a la trayectoria de tensiones (Gráfico 5-7(a)), se observan valores consistentes. La discusión de los parámetros resistente al corte para suelos parcialmente saturados a partir de la envolvente de falla p' - q se discute en la sección x-x para todos los valores de succión matricial ensayados.

5.2.2.2 Succión matricial de 50 kPa

El Gráfico 5-8 presenta los resultados obtenidos para los ensayos triaxiales consolidados drenados bajo la aplicación de una succión matricial ($u_a - u_w$) de 50 kPa. Bajo estas condiciones, fueron realizados dos ensayos a distintas presiones de confinamiento neta ($\sigma_3 - u_a$), de 300 y 500 kPa.

El Gráfico 5-8(a), permite concluir al comportamiento tensión-deformación a partir de la gráfica de esfuerzo desviador versus deformación axial ($\Delta\sigma$ vs ε_a). Se observa un incremento significativo de resistencia con el incremento de presión de confinamiento neta (σ_{3neta}), para los valores ensayados, lo que resulta consistente con los resultados obtenidos bajo condiciones de succión matricial nula y de 8 kPa. En las curvas no se observa el desarrollo de valores de resistencia peak y residual, más bien, durante el corte ocurre un incremento progresivo del esfuerzo desviador a medida que aumenta la deformación axial hasta valores de 15% a 17% de la deformación axial. Al ser sobrepasado este valor, no obstante, curva tiende a estabilizar a un valor constante de esfuerzo desviador. Al comparar estas curvas con el resultados típicos de ensayos CID saturados en arenas limpias y arenas limosas, son similares al comportamiento en estado suelto de estos materiales.

En relación con la variación de volumen, el Gráfico 5-8(c) muestra la relación entre el cambio volumétrico en la etapa de corte versus la deformación axial, para ambos especímenes ensayados bajo una succión matricial de 50 kPa. En ambas probetas es posible observar un comportamiento contractivo. Al igual que para el caso de los ensayos realizados a succión matricial de 8 kPa, la probeta

consolidada y cortada a presión de confinamiento neta de 300 kPa mostró una deformación volumétrica menor que su par a 500 kPa, mientras que la probeta UNSAT-D300-80-50MS alcanzó un valor de deformación máxima de 4.12%, la probeta UNSAT-D500-80-50MS alcanzó un valor de 6.37%.

5.2.2.3 Succión matricial de 350 kPa

El Gráfico 5-9 presenta los resultados obtenidos para los ensayos triaxiales consolidados drenados bajo la aplicación de una succión matricial ($u_a - u_w$) de 350 kPa, valor representativo de los valores residuales de succión. Bajo estas condiciones, fueron realizados dos ensayos a distintas presiones de confinamiento neta ($\sigma_3 - u_a$), de 300, 400 y 500 kPa.

El Gráfico 5-9(a) presenta los resultados del comportamiento tensión deformación en términos del esfuerzo desviador versus la deformación axial ($\Delta\sigma$ vs ϵ_a). Al igual que para los resultados anteriores, a succiones matriciales de 8 y 50 kPa, se observa un incremento en la resistencia del material al incrementar la presión de confinamiento aplicada durante las etapas de consolidación y corte. No obstante, a diferencia de los resultados observados a menor succión, se observa el desarrollo un valor peak de resistencia el cual es alcanzado a una deformación axial de entre 13% y 15% para el caso de los especímenes ensayados a 300 y 500 kPa de presión de confinamiento neta. Para el caso del espécimen ensayado a 100 kPa de presión de confinamiento neta, el valor peak se alcanza al 10%. Posterior al desarrollo del valor peak, la resistencia en las tres probetas decae y el comportamiento comienza a presentar inestabilidad: las curvas presentan ruido y variaciones al término de la etapa de corte.

Respecto a la variación de volumen durante el corte, el Gráfico 5-9(c) presenta los resultados de la deformación volumétrica versus la deformación axial. Si bien al igual que en las probetas ensayadas a 8 y 50 kPa los especímenes a 350 kPa de succión matricial muestran un comportamiento contractivo o de reducción del volumen, la forma de la curva es distinta: se desarrolla un aumento progresivo de la deformación volumétrica a deformación axial de 10% a 15% y luego el valor permanece constante. Se visualiza que las mayores deformaciones durante el corte se presentan en la probeta ensayada a menor presión de consolidación (UNSAT-D300-80-350MS), mientras que la menor deformación se obtuvo en la probeta de presión de confinamiento intermedia (UNSAT-D400-80-350MS), obteniéndose deformaciones del 2.5% al 4.6%

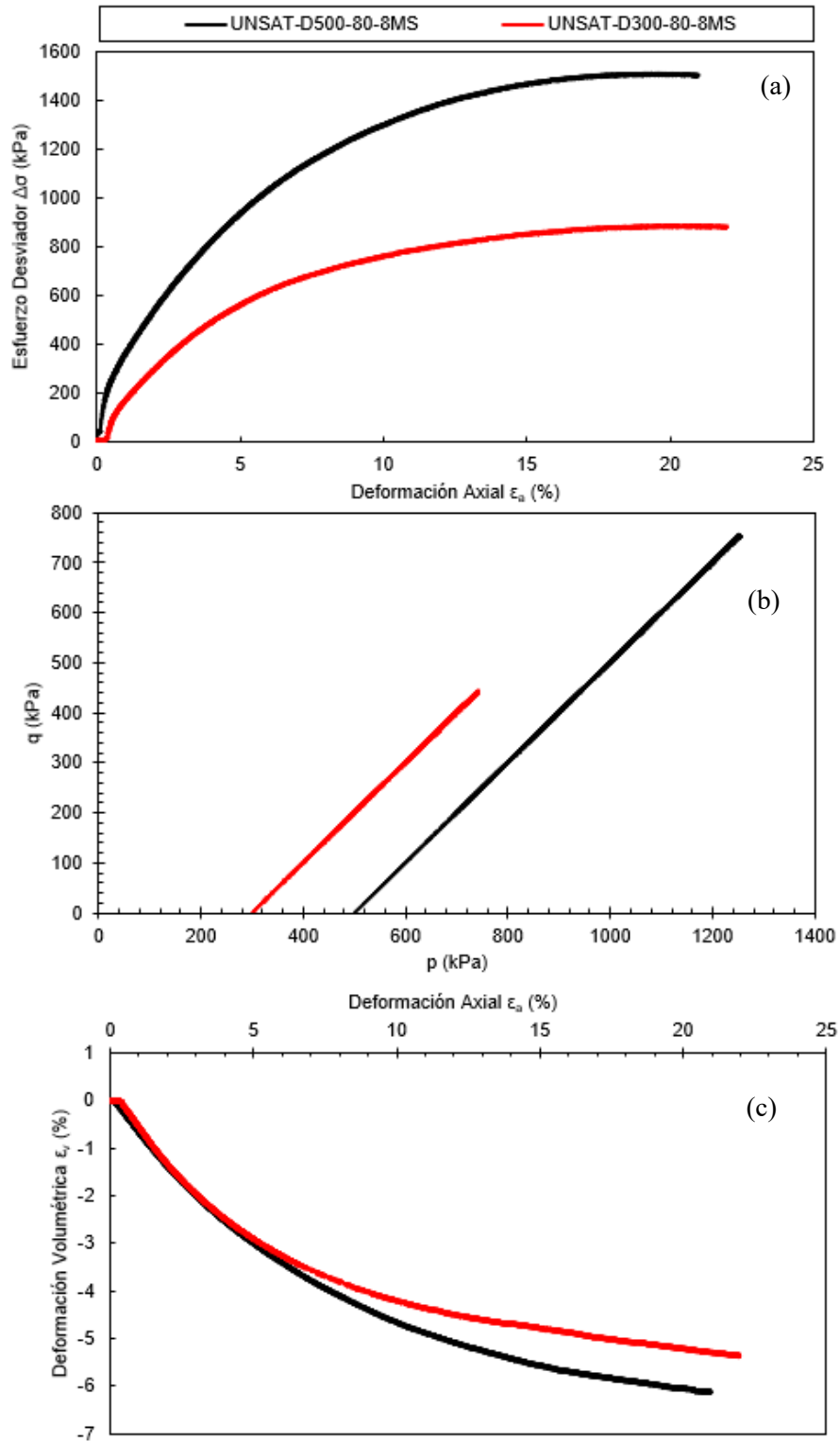


Gráfico 5-8: (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) trayectoria de tensiones p '- q (c) deformación volumétrica versus deformación axial en ensayos triaxiales CID en relaves parcialmente saturados con succión matricial de 8 kPa.

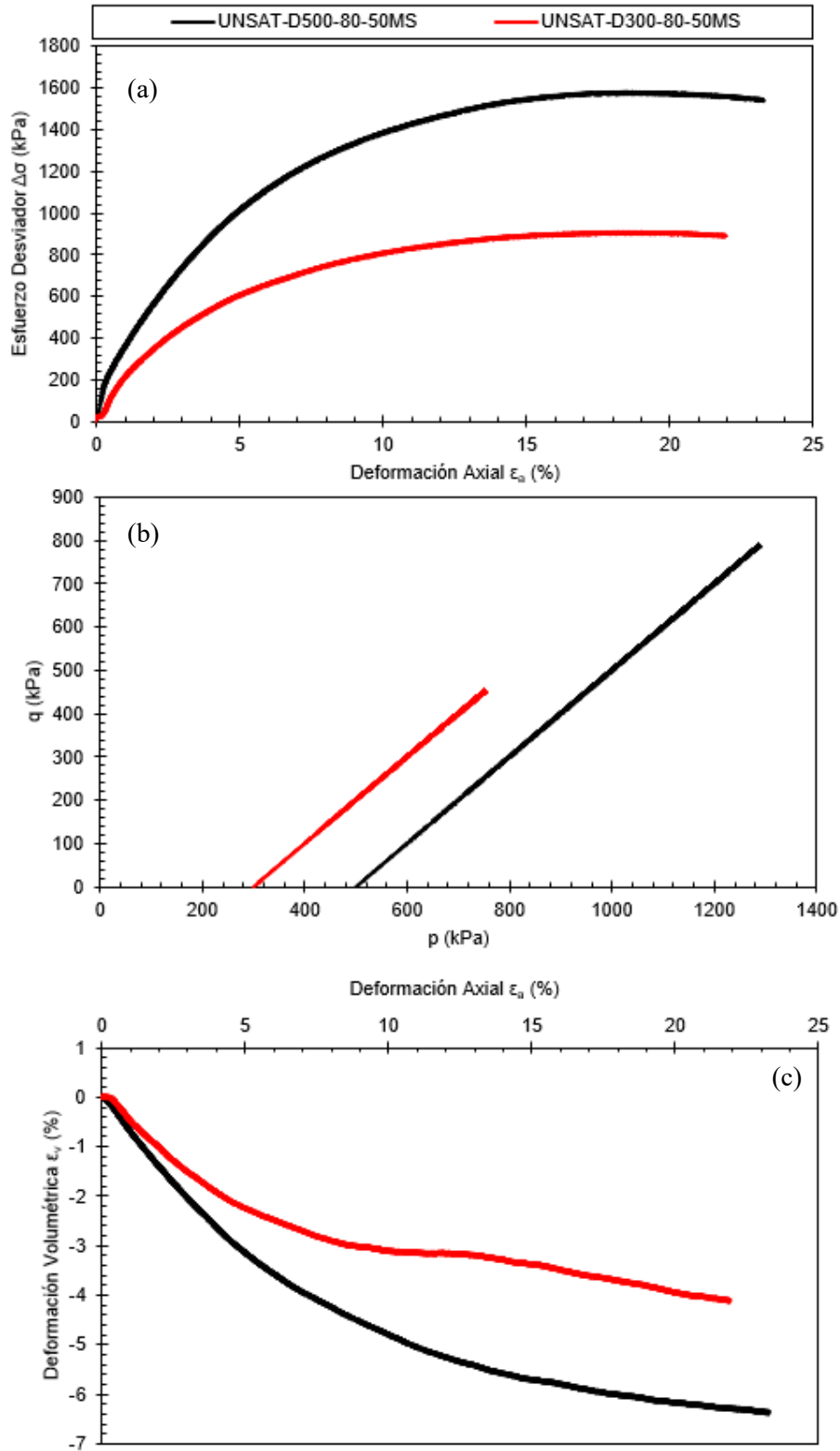


Gráfico 5-9: (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) trayectoria de tensiones p '- q (c) deformación volumétrica versus deformación axial en ensayos triaxiales CID en relaves parcialmente saturados con succión matricial de 50 kPa.

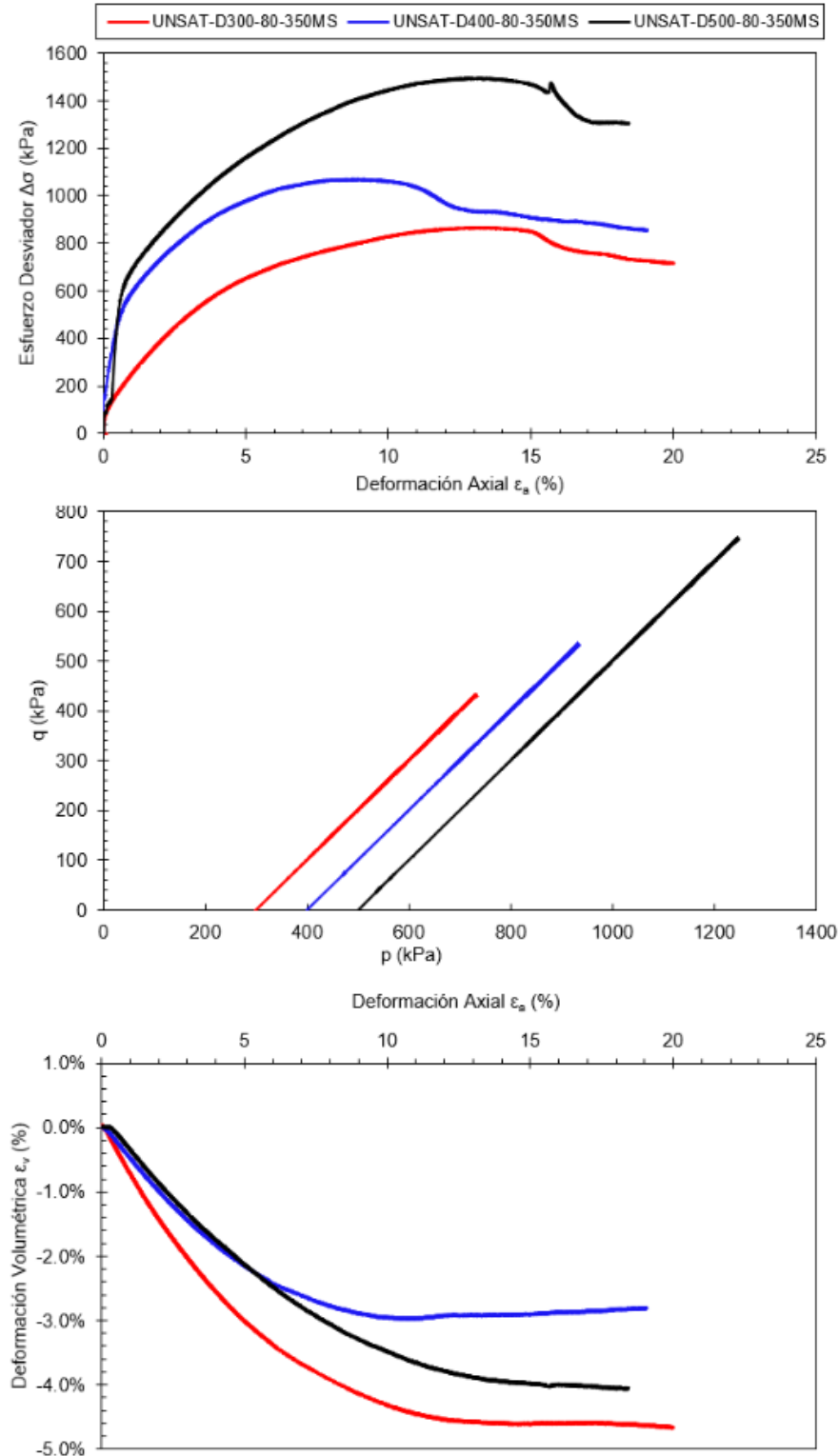


Gráfico 5-10: (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) trayectoria de tensiones p '- q (c) deformación volumétrica versus deformación axial en ensayos triaxiales CID en relaves parcialmente saturados con succión matricial de 350 kPa.

Tabla 5-3: Resultados ensayos triaxiales saturados

Ensayo	Tipo de Ensayo	σ_c (kPa)	u_a (kPa)	u_w (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)	$\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\Delta\sigma_f$ (kPa)	σ_{3nf} (kPa)	σ_{1nf} (kPa)	p'_f (kPa)	q'_f (kPa)	e_i (-)	e_f (-)
UNSAT-D300-80-8MS	CIU	300	150.00	142.00	8	883.29	870.95	300.00	1170.95	735.72	435.47	0.69	0.56
UNSAT-D500-80-8MS	CIU	500	150.00	142.00	8	1483.81	1483.75	500.00	1983.75	1241.87	741.87	0.66	0.59
UNSAT-D300-80-50MS	CIU	300	200.00	150.00	50	901.21	901.43	300.00	1201.21	750.61	450.61	0.63	0.54
UNSAT-D500-80-50MS	CID	500	200.00	150.00	50	1576.45	1576.42	500.00	2076.42	1288.21	788.21	0.67	0.56
UNSAT-D300-80-350MS	CID	300	450.00	100.00	350	864.091	715.38	300.00	1465.38	657.69	357.69	0.66	0.61
UNSAT-D400-80-350MS	CID	400	450.00	100.00	350	1067.40	853.91	400.00	1253.91	826.96	426.95	0.65	0.60
UNSAT-D500-80-350MS	CIU	500	450.00	100.00	350	1493.02	1303.472	500.00	1803.47	1151.74	651.74	0.64	0.58

Definiciones:

σ_3 = Presi3n de confinamiento

u_a = Presi3n de poro de aire

u_w = Presi3n de poro de agua

$\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo desviador m\acute{a}ximo

$\Delta\sigma_f$ = Esfuerzo desviador en la falla

σ_{3nf} = Presi3n de confinamiento neta en la falla

σ_{1nf} = Presi3n vertical neta en la falla ($\sigma_{1nf} = \sigma_{3nf} + \Delta\sigma_f$)

p'_f = Esfuerzo neto medio, donde $p'_f = (\sigma'_{1nf} + \sigma'_{3nf}) / 2 - u_a$

q'_f = Esfuerzo desviador neto medio, donde $q'_f = (\sigma'_{1nf} - \sigma'_{3nf}) / 2$

e_i = \u00cdndice de vac\u00edos al t\u00e9rmino de la consolidaci3n

e_f = \u00cdndice de vac\u00edos en la falla

Notas:

- El criterio de falla se ha definido para todos los ensayos al 20% de la deformaci3n axial

5.2.3 Análisis de la respuesta drenada

5.2.3.1 Comportamiento tensión - deformación

En la presente sección, se analizarán los resultados obtenidos en termino de resistencia para todos los valores de succión matricial evaluadas. Este análisis incluye el estudio comparativo de los resultados de los ensayos parcialmente saturados con los ensayos saturados.

El Gráfico 5-10 muestra los resultados del esfuerzo desviador versus la deformación axial de las probetas ensayadas a presión de confinamiento y presión de confinamiento neta de 300 kPa. Se observa un incremento en la resistencia con el incremento en la matriz de succión para rangos de deformación axial de 0% a 15%. No obstante, sobre este rango, la influencia de la succión en el incremento de resistencia no es evidenciable, siendo mayor la resistencia para la probeta saturada ($u_a - u_w = 0$). Al 5% de deformación se observa un incremento de resistencia del 16%, 30% y 34% respecto a la condición saturada para valores de succión de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa respectivamente; mientras que al 10% de deformación axial el incremento en la resistencia es de 4%, 10% y 12% para matrices de succión de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa, respectivamente.

Los resultados son similares para el caso de las probetas ensayas a presión de confinamiento y presión de confinamiento neta de 500 kPa: hasta valores de deformación axial de 14% se evidencia un incremento en resistencia con el incremento en la matriz de succión, y sobre este rango, la resistencia alcanzada por la probeta saturada ($u_a - u_w = 0$) es mayor. Al 5% de deformación se observa un incremento de resistencia del 23%, 40% y 51% respecto a la condición saturada para valores de succión de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa respectivamente; mientras que al 10% de deformación axial el incremento en la resistencia es de 8%, 16% y 20% para matrices de succión de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa, respectivamente.

Si bien no se observan incrementos superiores al 50% en resistencia como ha sido evidenciable en otros estudios, los resultados observados son consistentes con los obtenidos por Gallardo et.al, (2023) en los que es posible observar que, en probetas compactadas, a mayores deformaciones el incremento en resistencia debido a la matriz de succión aplicada disminuye, lo que se evidencia en mayor medida a altas presiones de confinamiento. Lo anterior es atribuible al aumento del grado de saturación del suelo por efecto de la contracción de las probetas durante las etapas de consolidación y corte. Adicionalmente, Celestino R. et. al. desarrolló ensayos no saturados en suelos areno limosos compactados, bajo un amplio rango de succión y a altas presiones de confinamiento, obteniendo, para presiones de confinamiento neta de 400 kPa, incrementos de resistencia del 12% a diferencias de succión de 100 kPa. Lo anterior fue igualmente evidenciado en los estudios desarrollados por Xiao X. et al. (2022), quienes desarrollaron ensayos parcialmente saturados a succión constante sobre limos compactados, evaluando el efecto de la succión a altas presiones de confinamiento neta (200, 300 y

400 kPa). Los resultados indicaron que, si bien la succión matricial incrementa la resistencia del material, el efecto del incremento en la presión de confinamiento en la resistencia es mayor. Se observó que, para el rango de presiones de confinamiento evaluadas, un incremento de 75 kPa en la succión aumento los valores de resistencia entre un 10% a 25%.

Para ambas presiones de confinamiento neta, se observó en todas las probetas que sobre un 15% de deformación axial, no se observa un aumento de resistencia debido a la aplicación de la succión en comparación a las probetas ensayadas en condición saturada. Adicionalmente, para el caso particular de las probetas ensayas con una matriz de succión de 350 kPa, se observa una diferencia en el comportamiento tensión-deformación, ya que sobre este valor de deformación se produce una pérdida de resistencia con deformación, mostrando un comportamiento frágil al término de la etapa de corte. Se infiere que este comportamiento tiene relación con la velocidad de carga o tasa de deformación con la que fue ejecutada la etapa de corte. Para garantizar un ensayo drenado verdadero tanto para la presión de poro de aire como para la de agua, la velocidad de corte debe ser lo suficientemente lenta para permitir el drenaje de ambos flujos, sin generar exceso de presiones de poro. A diferencia del caso saturado, en triaxiales no saturado esta velocidad está controlada por la permeabilidad del disco cerámico, el cual presenta una baja conductividad hidráulica. En ese sentido, estos resultados muestran consistencia con los resultados obtenidos por el estudio desarrollado por Rojas J. et.al. (2009), quienes estudiaron el efecto de la velocidad de carga en la ejecución de ensayos triaxiales en suelos parcialmente saturados. Para ello, desarrollaron ensayos triaxiales a succión constante sobre arenas limosas, considerando diferentes presiones de confinamiento, valores de succión y dos velocidades de carga (0.25%/hora y 2.5%/hora). El estudio concluyó que a bajos valores de succión (15 y 45 kPa) el efecto de las velocidades de carga no tiene un efecto significativo en el cambio volumétrico y en la resistencia del material, no obstante, sobre los 300 kPa de succión, el suelo mostro un comportamiento dependiente de la velocidad de carga, indicando un aumento de las presiones de poro de agua a mayores deformaciones, disminuyendo de esta forma la succión en la probeta o no manteniendo un valor homogéneo de succión en todo el espécimen. Se observó que para estas muestras el comportamiento tensión-deformación fue de ablandamiento con deformación.

Los estudios desarrollados por Wu S. et al. (2020) muestran consistencia. Los autores desarrollaron triaxiales a succión controladas a presión de confinamiento neta de 400 kPa y succiones de 100, 200 y 300 kPa, evaluando tres velocidades de deformación durante el corte. Los resultados mostraron comportamientos de ablandamiento con deformación para los valores de succión 300 kPa y menores valores de resistencia en aquellas probetas cortadas a mayor velocidad. Se destaca que las curvas tensión deformación para estas probetas muestran ruido e inestabilidad a mayores deformaciones, lo que demuestra la dificultad de mantener constante la succión en la muestra.

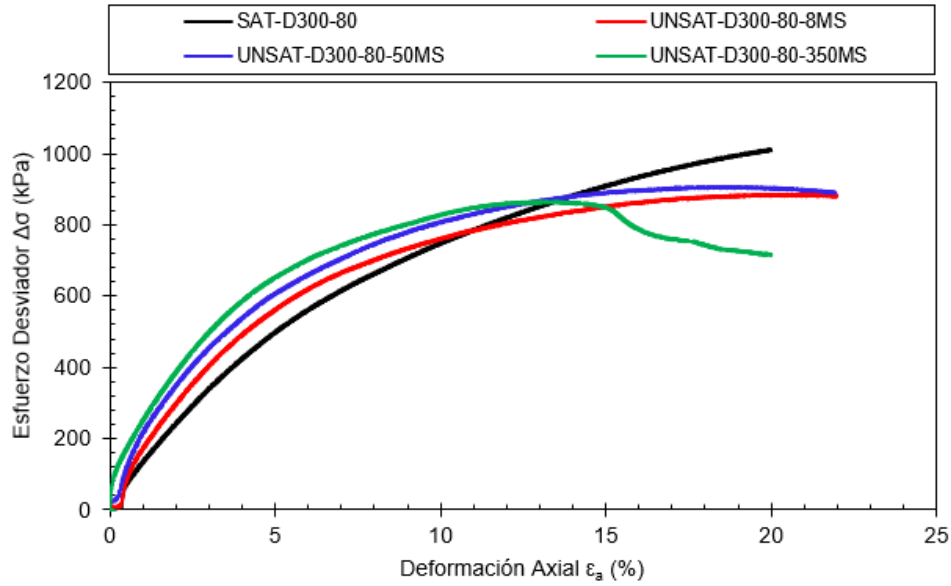


Gráfico 5-11: Esfuerzo desviador versus deformación axial a presión de confinamiento y confinamiento neta de 300 kPa.

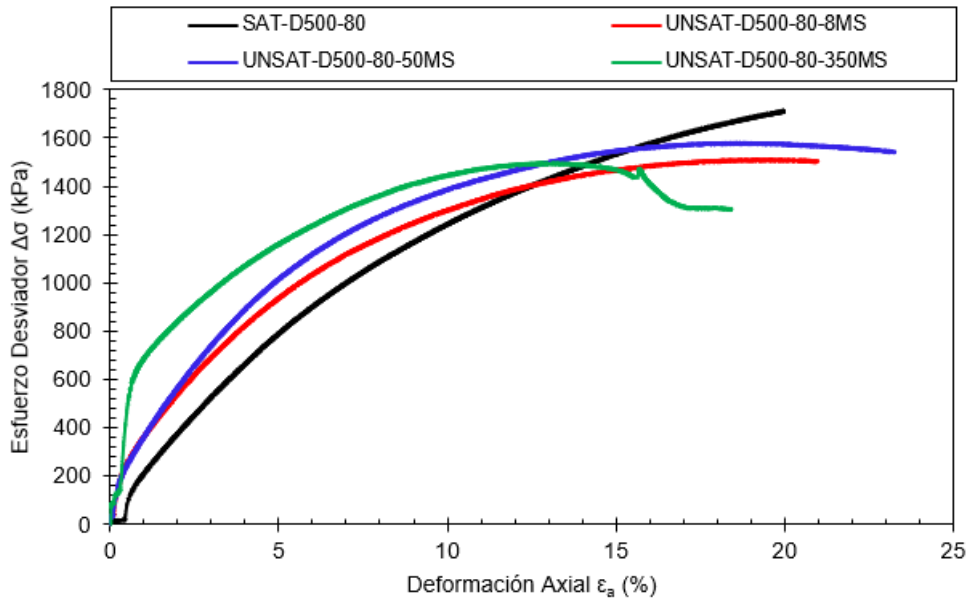


Gráfico 5-12: (a) Esfuerzo desviador versus deformación axial, (b) trayectoria de tensiones $p'-q$ (c) deformación volumétrica versus deformación axial en ensayos triaxiales CID en relaves parcialmente saturados con succión matricial de 350 kPa.

Los Gráfico 5-13 y Gráfico 5-14 presentan la variación de la resistencia al corte del relave a diferentes valores de succión, en términos del esfuerzo desviador y el esfuerzo medio neto, respectivamente. Lo anterior, considerando los valores obtenidos para deformación axial de 5% y 10%, debido a los efectos de baja resistencia observados a grandes deformaciones.

Como se observa existe un rápido incremento en la resistencia al corte, el cual es significativo hasta succiones de 50 kPa. Posterior a ese valor, si bien el incremento continúa, la razón de incremento no es significativa, como se discutió anteriormente. Los resultados muestran relación con las zonas de la SWCC: mientras en la zona de transición la variación en el contenido de agua es significativa, para esos valores el cambio en la resistencia considerando la respectiva succión también lo es. En la zona residual, si bien los valores de succión son altos y los contenidos de humedad son residuales, este efecto no parece tener un aporte significativo en la resistencia al corte en condición drenada. Este efecto se observa en mayor medida cuando se aumenta la deformación, como se observa para el caso de la deformación axial del 10%, no obstante, esto no es concluyente, ya que dicho efecto puede estar condicionado a la velocidad de carga en la etapa de corte.

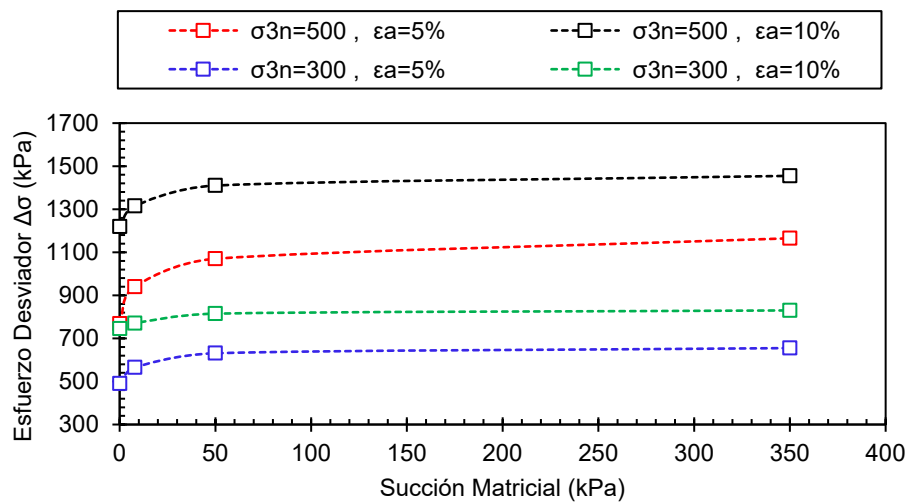


Gráfico 5-13: Esfuerzo desviador versus succión matricial

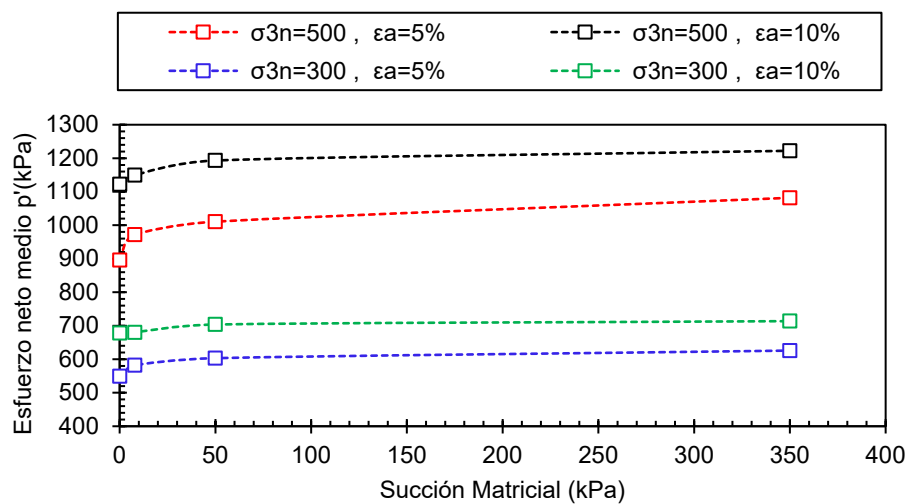


Gráfico 5-14: Esfuerzo medio neto versus succión matricial

5.2.3.2 Parámetros resistentes y línea de estado crítico (CSL)

Los Gráfico 5-15, Gráfico 5-15 y Gráfico 5-15 muestran las envolventes de falla del relave en estudio bajo valores de succión matricial de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa respectivamente. Las envolventes fueron calculadas considerando como criterio de falla el 20% de la deformación axial. Dado el comportamiento observado y discutido en la sección anterior, los parámetros resistentes para el valor de deformación considerado no muestran un aumento respecto a la condición saturada.

Como se observa en los gráficos, para ninguno de los valores de succión ensayados se desarrolla cohesión. Para el caso del ángulo de fricción, se obtuvieron valores de 37° , 37° y 33° para los valores de succión de 8 kPa, 50 kPa y 350 kPa. No obstante, estos pudiesen no ser representativos del aporte en el incremento de resistencia al aplicar succión al material. Debido a lo anterior, se han obtenido los parámetros resistentes considerando valores de deformación axial de 5% y 10%, los cuales de presentan en el Gráfico 5-18. Como se observa, para estos valores de deformación axial existe un incremento en la resistencia del relave en estudio lo que es evidenciable en el ángulo de fricción interna del material. Este incremento es mayo a bajas deformaciones, lo que se debe principalmente a que a bajas deformaciones y a un valor constante de succión el grado de saturación del material es menor.

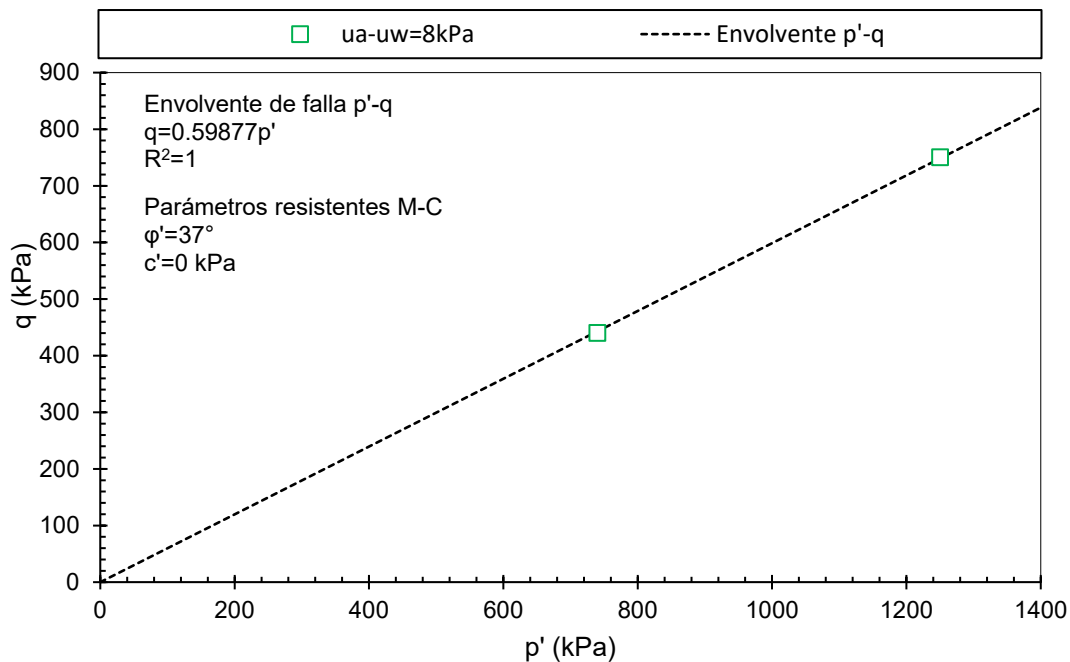


Gráfico 5-15: Envolvente de falla p'-q, Succión de 8 kPa

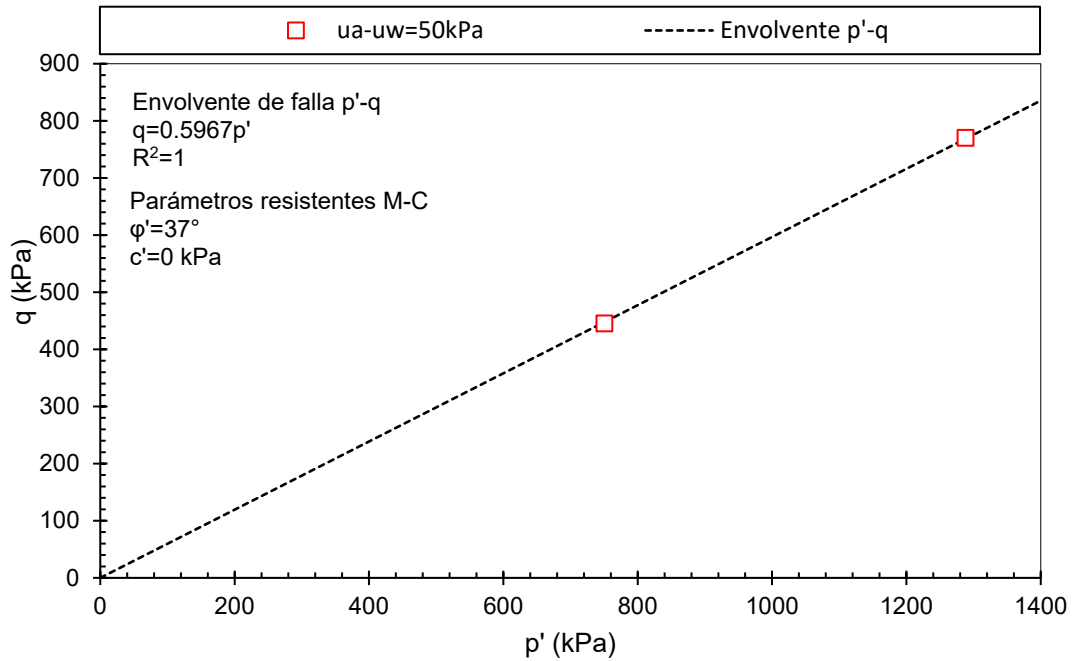


Gráfico 5-16: Envolvente de falla p'-q, Succión de 50 kPa

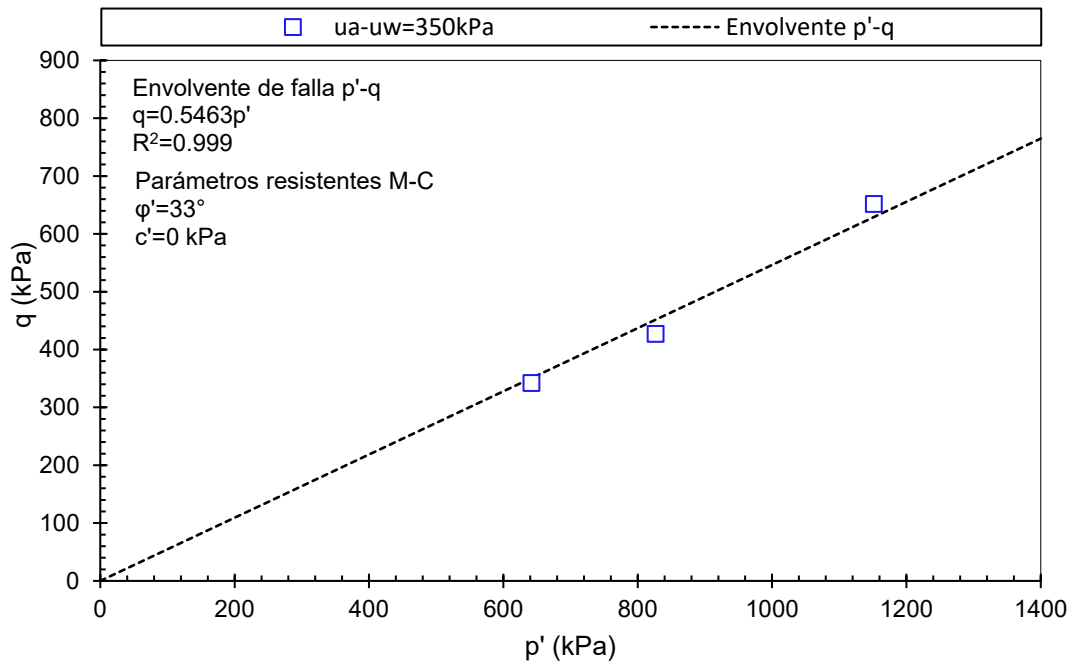


Gráfico 5-17: Envolvente de falla p'-q, Succión de 50 kPa

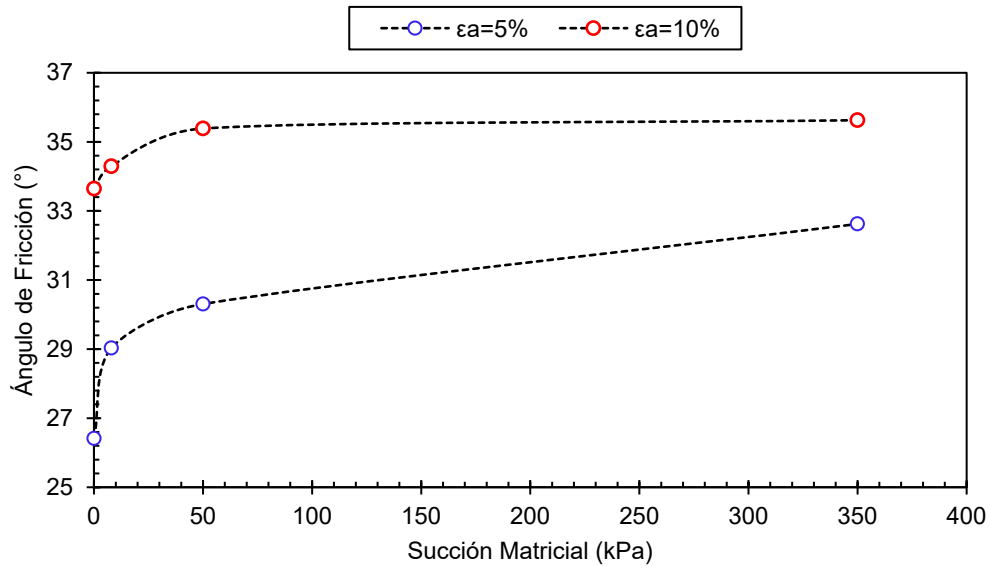


Gráfico 5-18: Envolvente de falla $p'-q$, Succión de 50 kPa

Finalmente, el Gráfico 5-19 presenta la línea de estado crítico (CSL) obtenida para los distintos valores de succión, a partir de los resultados de los ensayos triaxiales parcialmente saturados. Es importante mencionar que, como estado último se ha considerado para todos los ensayos los valores de esfuerzos e índice de vacío al 20% de la deformación axial.

Se observa que el intercepto para todas las CSL obtenidas es distinto, no obstante, la CSL obtenida mediante los resultados de los ensayos desarrollados a succión constante de 50 kPa presenta una pendiente muy similar a la CSL del material obtenida en condición saturada. Para el caso de las curvas obtenidas para los ensayos realizados a 8 kPa y 350 kPa, si bien presentan diferencia en la pendiente respecto a la condición saturada y parcialmente saturada a 50 kPa de succión, ambas presentan las mismas pendientes.

Wang et al. (2002), estudiaron modelos de estado crítico en suelos parcialmente saturados basados en datos experimentales. La investigación consideró un programa experimental basado en ensayos triaxiales drenados a succión controlada en suelos limosos, considerando succiones de 100 y 200 kPa y presiones de confinamiento neta de 100, 200 y 300 kPa. Los resultados mostraron que las líneas de estado crítico tienden a ser paralelas, es decir, mantener una pendiente constante en el plano $e-p'$, no obstante, el intercepto con el eje de las ordenadas (eje e) es dependiente de la succión.

Si bien los resultados obtenidos en esta investigación muestran consistencia con los desarrollados por Wang et al. (2002), resulta relevante destacar que el cambio volumétrico está condicionado al drenaje durante el corte, por lo que los resultados obtenidos en estado último, como se comentó anteriormente, pueden no ser representativos de dicha condición debido a la influencia de la velocidad de la carga, por lo que se requiere mayor estudio respecto al cambio volumétrico.

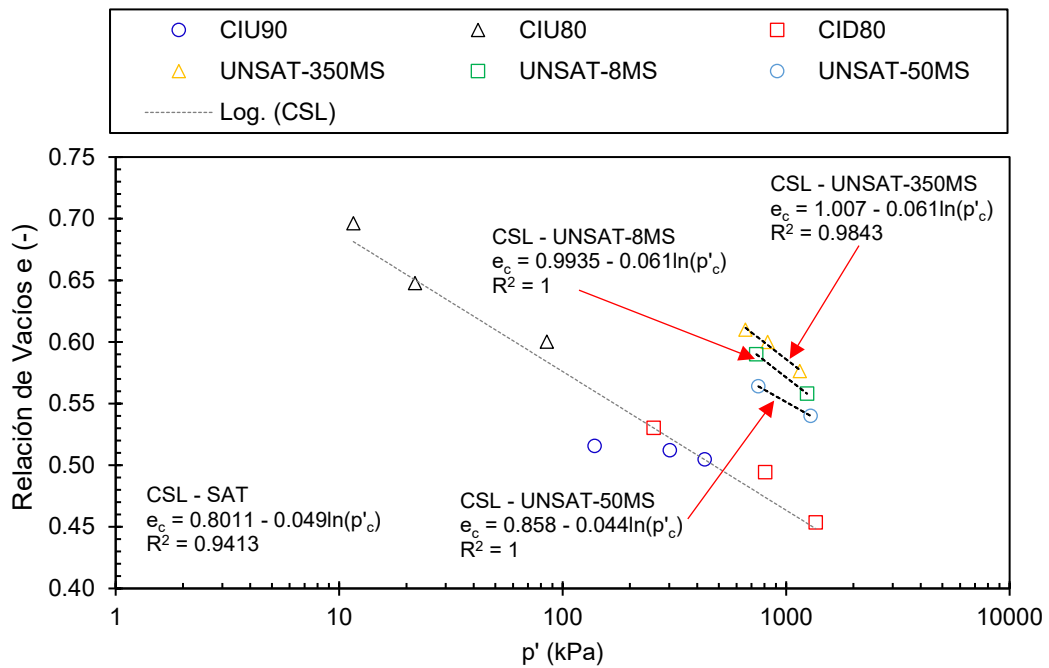


Gráfico 5-19: e versus p' - CSL

CAPÍTULO 6: Conclusiones y Trabajos futuros

6.1 Resumen y Conclusiones

La tecnología de relaves filtrados como alternativa a los depósitos de relave convencionales para el manejo y disposición de residuos ha tomado relevancia debido a las ventajas y beneficios que presenta en términos de estabilidad física y química. Las principales ventajas de esta opción son que al depositar en condición parcialmente saturada es posible eliminar la necesidad de obras de contención de relaves, maximizando la recuperación y reutilización de agua, lo que facilita la implementación de actividades progresivas de cierre y rehabilitación durante etapas operativas (Cacciuttolo et al., 2023).

Un adecuado desarrollo de las etapas de diseño, construcción y operación de depósitos de relaves filtrados requiere del análisis del comportamiento geomecánico del material, y, por ende, de su comportamiento parcialmente saturado. Sin embargo, el análisis en laboratorio de la respuesta tensión-deformación bajo distintas condiciones (i.e. drenada y no drenada) y de la resistencia al corte presenta desafíos relacionados con la medición y control de la presión de poros de agua (u_w) y de aire (u_a) de manera independiente (Fredlund D. et. al. 2012).

Este estudio ha buscado, mediante la implementación de un equipo triaxial para ensayos parcialmente saturado y el diseño de un programa experimental, estudiar las variables de interés que podría dominar y tener incidencia en el comportamiento geomecánico y la respuesta al corte drenada de relaves en estado parcialmente saturado, como lo son la presión de confinamiento y la succión matricial, considerando además un adecuado entendimiento del comportamiento geomecánico del material en estudio en estado saturado.

A partir de los resultados obtenidos del trabajo experimental y de la revisión de estudios desarrollados por otros autores las conclusiones principal de este trabajo corresponden a las siguientes:

-
- Para las muestras representativas del material de relave en estudio, las que fueron preparadas al 80% de la DMCS, ensayadas en condición parcialmente saturada se observó que tanto la presión de confinamiento neta como la succión matricial tienen un efecto significativo en la resistencia del suelo. En general, se observa un aumento en la resistencia del suelo a medida que aumenta la presión de confinamiento neta. No obstante, si bien se evidencia que la succión matricial también influye de manera positiva la resistencia del suelo, a altas presiones de confinamiento el incremento en resistencia no es tan significativo como para bajas presiones de confinamiento. Para el caso de las presiones de confinamiento neta estudiadas en esta investigación, el incremento en el esfuerzo desviador fue de entre el 4% al 20% a deformaciones del 10%, para valores de succión de entre 8 kPa a 350 kPa.
 - Al observar el cambio volumétrico en las probetas, fue posible observar el desarrollo de un comportamiento contractivo durante el corte en todas las condiciones ensayadas. Este comportamiento se atribuye a las condiciones de drenaje durante el corte, tanto para el flujo de aire como para el flujo de agua. Además, se observa que la deformación volumétrica máxima durante el corte tiende a ser mayor para probetas con menor presión de confinamiento neta. No se observó una tendencia clara respecto a la influencia de la succión en el cambio volumétrico, si bien se observó un menor cambio respecto a la condición saturada, no se observaron cambios significativos entre los distintos valores de succión. Es importante mencionar que los cambios volumétricos fueron estimados considerando el cambio del volumen de agua en la celda triaxial, con las respectivas correcciones, por lo que mediciones más precisas respecto a estas variaciones podrían ser obtenidas incorporando al equipo un controlador de volumen de presión de aire, a modo de registrar de manera independiente la variación de volumen de agua y aire al interior de la probeta.
 - Se identifica que, para las probetas ensayadas a succión constante de 350 kPa, se desarrollan valores peak de resistencia a deformaciones axiales cercanas al 15% y luego presentan un comportamiento frágil, con una disminución en resistencia. Se observa además un comportamiento inestable, con curvas que presentan ruido y variaciones al final de la etapa de corte. Este comportamiento se atribuye a la velocidad de carga o tasa de deformación durante el ensayo. Estudios de diversos autores sugieren que, a valores altos de succión, la velocidad de carga presenta incidencias significativas en la respuesta al corte, debido a que el exceso de presión de poro de agua no alcanza a ser disipada, reduciendo los valores de succión a grandes deformaciones. Para las probetas ensayadas a succión de 350 kPa, se observa un comportamiento de ablandamiento con deformación. Este resultado destaca la importancia de controlar adecuadamente la velocidad de carga para garantizar un ensayo drenado verdadero y evitar la inestabilidad en el comportamiento del suelo durante el ensayo
 - Para todas las succiones ensayadas (8 kPa, 50 kPa y 350 kPa) se evidencia un aumento progresivo en la resistencia del suelo a medida que aumenta la succión matricial. Sin embargo, al superar el

10% - 15% de deformación axial, la influencia de la succión en el aumento de resistencia no es evidente, y las probetas saturadas muestran una mayor resistencia en comparación con las parcialmente saturadas. Este comportamiento se atribuye a la velocidad de la carga de la aplicación de la carga axial, que, si bien es más evidenciable a altos valores de succión, considerando la contracción del material, el incremento en el grado de saturación de la probeta es mayor y tiene efectos en la resistencia.

- Los resultados obtenidos muestran que existe un incremento rápido y significativo en la resistencia al corte del relave a medida que aumenta la succión hasta alrededor de 50 kPa. Sin embargo, más allá de este punto, aunque la resistencia sigue incrementando, la tasa de aumento no es tan significativa. Este comportamiento está relacionado con las zonas de la Curva de Retención de Agua en el Suelo (SWCC). En particular, en la zona residual, aunque los valores de succión son altos y los contenidos de humedad son bajos, este efecto no parece influir significativamente en la resistencia al corte en condiciones drenadas.
- En cuanto a los parámetros de resistencia al corte, se observa que no se desarrolla cohesión en ninguno de los valores de succión ensayados de acuerdo a la regresiones lineales realizada en el espacio p' - q . Respecto al ángulo de fricción, si bien en condición de falla los valores son menores y se encuentran condicionados a la velocidad de carga, para valores de deformación axial de 5% y 10% se observa un incremento con el aumento en el valor de succión.

6.2 Trabajos futuros

El presente estudio ha contemplado un plan experimental sobre muestras de relaves integral con el objetivo de estudiar el comportamiento parcialmente saturado del material. Si bien los resultados han permitido concluir sobre las variables que influyen en la respuesta al corte drenada del material, se han establecidos una serie de hallazgos no abordados como variables de estudios en esta investigación. Estos aspectos resultan relevantes a la hora del entendimiento del comportamiento geomecánico del material, por lo que a continuación se desglosan los principales aspectos que requieren investigación o trabajo futuro para complementar los resultados en este documento expuesto:

- Si bien el estudio incluyó un amplio rango de valores de succión en la ejecución de ensayos triaxiales considerando los resultados de la SWCC, los ensayos ejecutados fueron a altas presiones de confinamiento neta. Bajo ese punto de vista resulta necesario estudiar el efecto de la succión a diferentes presiones de confinamiento, a modo de evaluar si el aumento en resistencia a bajas presiones de confinamiento es mayor y así concluir sobre la altura óptima de instalaciones de relave filtrado.

-
- Este trabajo consideró la ejecución de ensayos solo a un valor de densidad. Diversos estudios indican que el aporte en resistencia es mayor para densidades menores o probetas en estado suelto, debido a que durante el corte no hay un incremento significativo en el grado de saturación que condicione la respuesta del material. Por lo anterior, resulta necesario evaluar diferentes densidades a modo de concluir sobre los esfuerzos en compactación en este tipo de instalaciones.
 - La velocidad de carga durante la etapa de corte resulta relevante, sobre todo a la hora de estudiar la resistencia a altos valores de succión. En este estudio se realizaron ensayos bajo una velocidad de carga, evidenciándose pérdida de resistencia a grandes deformaciones producto de la posible generación de presión de poro de agua, reduciendo la succión hacia el término de la etapa de corte. Se sugiere el desarrollo de ensayos de validación de la velocidad de carga, para evaluar la influencia en la respuesta del material.
 - En línea con lo anterior, se sugiere la incorporación al equipo de un controlador y traductor de presión y volumen de aire, a modo de verificar los cambios volumétricos de aire y agua de manera independiente y permitir el control del exceso de presión de poro para cada uno de los flujos.

CAPÍTULO 7: Referencias

- Bocking, K.A., & Fredlund, D. (1980). Limitations of the axis-translation technique.
- Borja, R.N., & Bareither, C.A. (2020). Shear Behavior of Waste Rock and Filtered Tailings Mixtures. En Proceedings of the Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics (pp. 872–880). Minneapolis, MI, USA.
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day: Envisioning the Sustainable Future of Mine Tailings Storage Facilities. *Minerals*, 13(1445). <https://doi.org/10.3390/min13111445>
- Dong, J., & Zheng, G. (2018). Strength and Deformation Characteristics of Unsaturated Fine-Grained Tailings Soil Under Variable Moisture Content. doi:10.1007/978-981-13-0095-0_20.
- Franks, D. M., Stringer, M., Torres-Cruz, L. A., et al. (2021). Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*, 11*, 5353. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84897-0>
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., & Fredlund, M.D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>
- Fredlund, D.G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- Gallardo S., R., Sáez R., E., & Camacho-Tauta, J. (2022). Assessment of the Self-Compaction Effect in Filtered Tailings Disposal under Unsaturated Condition. *Minerals*, 12(4), 422. <https://doi.org/10.3390/min12040422>
- ICOLD. (2021). Bulletin 181. Tailings Dam Design – Technology Update.
- Santamarina, J.C., et al. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364, 526-528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>
- Klohn Crippen Berger. (2017). Study of Tailings Management Technologies. Mine Environment Neutral Drainage Project.
- Lambe, T.W., & Whitman, R.V. (2010). *Mecánica de suelos*. Limusa.

-
- Morrison, K. (2022). *Tailings Management Handbook: A Life-Cycle Approach*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME)
 - Oldecop, L., & Rodari, G. (2017). Unsaturated Soil Mechanics in Mining. En *Proceedings of the Pan Am Unsaturated Soils* (pp. 257–280).
 - Owen, J.R., Kemp, D., Lèbre, E., Svobodova, K., & Pérez Murillo, G. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (42) 101361.
 - Rampino, C., Mancuso, C., & Vinale, F. (2000). Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 748–763. <https://doi.org/10.1139/t00-004>
 - Rojas, J.C., & Mancuso, C. (2009). Effect of loading rate on the behaviour of unsaturated soils. En M. Hamza et al. (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (págs. 761). Napoli Federico II, Italy: IOS Press. doi:10.3233/978-1-60750-031-5-761
 - Wu, S., Zhou, A., Shen, S.-L., & Kodikara, J. (2020). Influence of different strain rates on hydro-mechanical behaviour of reconstituted unsaturated soil. *Acta Geotechnica*, 15(12), 3415–3431. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01026-3>
 - Strachan, C., & B. Van. (2018). *Conclusions from Evaluation of Tailings Dam Incidents*. Stantec.
 - Ulrich, B. (2019). Practical thoughts regarding filtered tailings. En *Proceedings of the 22th International Conference on Tailings and Mine Waste* (pp. 71–79).
 - Ulrich, B., & Coffin, J. (2013). Considerations for Tailings Facility Design and Operation Using Filtered Tailings Summary of Significant Operating Filtered Tailings Operations. En *Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 201–210).
 - van Genuchten, M.T. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
 - Williams, D.J. (2021). Lessons from Tailings Dam Failures—Where to Go from Here? *Minerals*, 11(853). <https://doi.org/10.3390/min11080853>

-
- Wang, Q., Pufahl, D.E., & Fredlund, D.G. (2002). A study of critical state on an unsaturated silty soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 213-218. <https://doi.org/10.1139/t01-086>

 - Xiao, X., Qi, L., & Li, X. (2022). Deformation, strength and water variation characteristics of unsaturated compacted loess. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01129>