

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA ESTIMAR LA CURVA DE
ESTADO CRÍTICO PARA RELAVES MEDIANTE EL USO
DEL EQUIPO TRIAXIAL ESTÁNDAR INSTRUMENTADO”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
DIANA ROCIO DAMIAN ROBLES**

**ASESOR
Dr. JORGE LUIS CÁRDENAS GUILLEN**

LIMA – PERÚ

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Damian Robles, Diana Rocio

ddamianr@uni.pe

DEDICATORIA:

Para mis padres que me inculcaron la disciplina para estudiar y luchar por mis sueños desde muy pequeña.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del presente trabajo de investigación no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas, por ello dedico este espacio para brindarles mis agradecimientos a cada uno de ellos.

En primer lugar, a mis padres por apoyarme en mi crecimiento personal y profesional, e inculcarme valores para ser una persona de bien. También agradecer a mi hermano Roy por alentarme a cumplir mis metas y por el soporte emocional durante todo el proceso de la tesis.

Por otro lado, mi profundo agradecimiento a la empresa Anddes Asociados SAC por financiar el proyecto de investigación y por haber confiado en mi persona para liderar el proyecto de investigación y a su vez darme la oportunidad de iniciar mi carrera profesional en la rama de la geotecnia. Asimismo, agradecer al laboratorio geotécnico Anddes Geolab SAC por brindarme sus espacios y equipos técnicos para el desarrollo experimental de la tesis, y también agradecer a su *staff* técnico quienes fueron un gran soporte.

Además, agradecer a los ingenieros Jorge Cardenas, Carlos Soto y Denys Parra por brindarme los conocimientos necesarios y guiarme en el desarrollo teórico y experimental de la tesis, asimismo, agradecer a la ingeniera Selene Quispe por el constante apoyo técnico y emocional en todo el proceso de la investigación.

Por último y no menos importante, agradecer al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC) por cofinanciar la investigación a través del concurso denominado "Proyectos de investigación 2021".

ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	10
PRÓLOGO	12
LISTA DE TABLAS.....	14
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	19
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	22
1.1. GENERALIDADES.....	22
1.2. PROBLEMÁTICA	22
1.3. OBJETIVOS	24
1.3.1. Objetivos Generales.....	24
1.3.2. Objetivos Específicos	24
1.4. ANTECEDENTES REFERENCIALES	24
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	26
2.1. CONCEPTOS DE LA MECÁNICA DE SUELO	26
2.1.1. Resistencia del suelo al corte.....	26
2.1.2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb	26
2.1.3. Formas de llegar al criterio de falla de Mohr-Coulomb	28
2.1.4. Trayectoria de esfuerzos	29
2.2. ENSAYO TRIAXIAL	36
2.2.1. Conceptos generales	36
2.2.2. Tipos de ensayos triaxiales convencionales	37
2.2.3. Terminología de ensayos de compresión triaxial convencionales	40
2.3. CONCEPTO DE LICUACIÓN EN SUELOS.....	41
2.3.1. Licuación por flujo	41
2.3.2. Movilidad cíclica	42
2.4. TEORÍA DEL ESTADO CRÍTICO	43
2.4.1. Relación de vacío crítico	43
2.4.2. Estado crítico del suelo	44
2.4.3. Curva de estado crítico (CSL)	45
2.4.4. Parámetro de estado (ψ)	46
2.4.5. Lineamientos básicos de la teoría del estado crítico.....	48
2.4.6. Determinación de la curva de estado crítico.	53
2.4.7. Superficie de licuación por flujo.....	56
2.5. RELAVE	57

2.5.1. Definición del relave	57
2.5.2. Relave cicloneado	57
2.6. DEPÓSITOS O PRESAS DE RELAVES	57
2.6.1. Casos de fallas de presas de relaves en el mundo.....	59
2.7. APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE SUELOS EN ESTADO CRÍTICO PARA EL ESTUDIO DE LA LICUACIÓN	65
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	69
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	69
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	70
3.2.1. Equipos convencionales.....	71
3.2.2. Equipos instrumentados y fabricados	74
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	79
3.3.1. Preparación y reconstitución de la muestra de relave	80
3.3.2. Ejecución del ensayo de compresión triaxial drenado y no drenado	87
3.3.3. Determinación de la relación de vacío en estado crítico	90
3.4. PROCESAMIENTO DE LA DATA EXPERIMENTAL	93
3.4.1. Etapa de consolidación	93
3.4.2. Etapa de corte	94
3.4.3. Etapa del estado crítico.....	96
CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO DE RELAVES	98
4.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	98
4.2. ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS	99
4.3. ENSAYOS DE DENSIDAD RELATIVA MÍNIMA Y MÁXIMA	99
4.4. ENSAYO PROCTOR ESTÁNDAR.....	100
4.5. ENSAYOS TRIAXIALES NO DRENADOS Y DRENADOS.....	100
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	103
5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL DRENADO Y NO DRENADO.....	103
5.1.1. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-1	103
5.1.2. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-2	107
5.1.3. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-3	110
5.2. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE ESTADO CRÍTICO.....	115
5.2.1. Curva de estado crítico de la muestra de relave M-1, M-2 y M-3	115
5.2.2. Superficie de licuación por flujo (FLS).....	122

CONCLUSIONES.....	125
RECOMENDACIONES	128
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ANEXOS	134

RESUMEN

La mecánica de suelo en el estado crítico es el marco más destacado para entender el fenómeno de licuación estática, que viene ocurriendo desde hace muchos años en depósitos de relave en operación, tales como las fallas de las presas Merriespruit-Sudáfrica (1994), TVA Kingston-EE. UU (2008), Fundao-Brasil (2015), Cadia-Australia (2018), y recientemente Brumadinho-Brasil (2019). Y uno de los componentes claves de la teoría del estado crítico es la estimación y evaluación de la curva de estado crítico (CSL del inglés *critical state line*) que separa los estados contractivos de los dilatantes de la muestra en estudio, en otras palabras, proporciona información si la muestra es susceptible a licuar.

En tal sentido, la presente tesis contempla el estudio experimental para estimar la curva de estado crítico para tres muestras de relaves que provienen de diferentes zonas mineras del Perú, una de granulometría fina y dos de granulometría gruesa a densidades bajas, mediante una serie de ensayos triaxiales drenados y no drenados, y bajo las recomendaciones de Jefferies y Been (2015). Para tal fin, se utilizó el equipo triaxial estándar, el que fue instrumentado con un sensor de carga interna para evitar la fricción en los registros de carga, asimismo, el pedestal del equipo triaxial fue modificado con el objetivo de controlar problemas de contorno en los esfuerzos que experimenta la muestra, además que facilite desacoplar la muestra de relave para congelarla después de ser ensayada y por último, se utilizó un adquisidor de datos en tiempo real para los sensores de desplazamiento, carga y presión de poros para obtener mediciones más precisas.

Mediante las consideraciones en la configuración del equipo triaxial y en la técnica experimental se logró estimar la CSL para las tres muestras de relaves a condiciones iniciales de contenido de humedad de 8 % para una de las muestras y de 5 % para las dos restantes. Si bien es cierto, todas las consideraciones aplicadas suman a que la estimación de la CSL sea precisa, no obstante, la aplicación de la técnica de congelamiento de la muestra de relave presenta un efecto significativo en los resultados en comparación de las demás variantes, esto se observó en algunos resultados de las muestras de relaves que no fueron congeladas y, además, lo descrito fue corroborado con las recientes investigaciones de Reid et al, 2021 y Viana da Fonseca et al, 2021.

Los resultados de la presente investigación permitieron conocer el comportamiento mecánico de los relaves en estudio y, además, se obtuvo los parámetros en estado crítico Γ y λ que definen a la CSL para las tres muestras de relave, estos parámetros están dentro del rango de valores obtenidos en la investigación de Macedo (2020). No obstante, es necesario realizar más ensayos triaxiales a diferentes tipos de relaves considerando diferentes gradaciones y compresibilidad con la finalidad de adquirir un amplio conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los residuos mineros para poder caracterizarlos adecuadamente y a su vez, obtener parámetros críticos más fiables, ya que estos son utilizados en simulaciones numéricas mediante modelos constitutivos para prevenir el fenómeno de la licuación estática.

Palabras clave: mecánica de suelo en el estado crítico, curva de estado crítico, relaves, licuación estática.

ABSTRACT

Soil mechanics in the critical state is the most prominent framework for understanding the phenomenon of static liquefaction, which has been occurring for many years in operation tailings dams, such as the Merriespruit-South Africa (1994), TVA Kingston-USA (2008), Fundao-Brazil (2015), Cadia-Australia (2018), and recently Brumadinho-Brazil (2019). And one of the key components of the critical state theory is the estimation and evaluation of the critical state line (CSL) that separates the contractive and dilatant states of the material in study, in other words, it provides information if the material is susceptible to liquefaction.

In this sense, the present thesis contemplates the experimental study to estimate the critical state curve for three samples of tailings from different mining areas of Peru, one fine-grained and two coarse-grained, at low densities through a series of drained and undrained triaxial tests, and under the recommendations of Jefferies and Been (2015). For this, a standard triaxial equipment was used, which was instrumented with an internal load sensor to avoid friction in the load records, also, the pedestal of the triaxial equipment was modified to control contour problems in the stresses experienced by the sample, in addition to facilitating the uncoupling of the tailings sample to freeze it after being tested and finally, a real-time data logger was used for the displacement, load and pore pressure sensors to obtain more accurate measurements.

By means of the considerations in the configuration of the triaxial equipment and in the experimental technique, it was possible to estimate the CSL for the three tailings samples at initial conditions of moisture content of 8 % for one of the samples and 5 % for the other two. While it is true that all the considerations applied add up to the CSL estimation being accurate, however, the application of the tailings sample freezing technique presents a significant effect on the results compared to the other variants, this was observed in some results of the non-frozen tailings samples and, in addition, what was described was corroborated with the recent research of Reid et al,2021 and Viana da Fonseca et al, 2021.

The results of the present investigation allowed to know the mechanical behavior of the tailings under study and, in addition, the critical state parameters Γ and λ that define the CSL for the three tailings samples were obtained, the values of these parameters are within the literature review for tailings (Macedo et al. 2020).

However, it is necessary to perform more triaxial tests to different types of tailings considering different gradations and compressibility in order to acquire a broad knowledge about the mechanical behavior of mine tailings to be able to characterize them properly and in turn, obtain more reliable critical parameters, since these are used in numerical simulations through constitutive models to prevent the phenomenon of static liquefaction.

Key words: critical state soil mechanics, critical state curve, tailings, static liquefaction.

PRÓLOGO

El presente trabajo de tesis comprende el estudio experimental para estimar la curva de estado crítico de tres muestras de relave que provienen del proceso de cicloneo, una de granulometría fina y dos de granulometría gruesa, mediante ensayos triaxiales drenados y no drenados a densidades bajas. La tesis abarca cinco capítulos que se desarrollan en las siguientes páginas.

El capítulo I y II se describe la introducción y el marco teórico respectivamente, para entrar en contexto y comprender mejor el estudio experimental. El capítulo III abarca la instrumentación del equipo triaxial estándar y el procedimiento experimental: (1) el equipo triaxial estándar se instrumentó con sensor de carga interna para evitar la fricción en los registros de carga, asimismo, se utilizó un adquisidor de datos en tiempo real para los sensores de desplazamiento, carga y presión de poros para obtener mediciones más precisas. También, se modificó el pedestal del equipo triaxial con la finalidad de controlar los problemas de contorno en los esfuerzos que experimenta la muestra y que facilite desacoplar la muestra de relave para proceder a congelarla después de ser ensayada. Además, se fabricó un molde para la reconstitución de la muestra que permita aplicar vacío a la membrana mientras se reconstituye, ya que la muestra se encuentra a una densidad muy baja respecto al del estado crítico. (2) El procedimiento experimental consistió en realizar una serie de ensayos triaxiales drenados y no drenados a diferentes presiones de confinamientos a deformaciones axiales del 25% para alcanzar el estado crítico y, además, se congeló las muestras de relaves y se secó en el horno.

En el capítulo IV se describen los ensayos de laboratorio adicionales que se realizaron a las muestras de relave antes de proceder con los ensayos triaxiales, tales como la caracterización física, la gravedad específica de sólidos, densidad mínima y máxima con la finalidad de obtener parámetros de entrada y establecer una condición inicial de las muestras de relave y lograr alcanzar el estado crítico.

En el capítulo V se describe los resultados obtenidos del estudio experimental, tales como las gráficas $\sigma_d - \varepsilon$ (esfuerzo desviador - deformación axial), $\Delta u - \varepsilon$ (variación de presión de poros - deformación axial), $\Delta V - \varepsilon$ (variación volumétrica - deformación axial) y $q - p'$ (trayectoria de esfuerzos efectivos) para cada una de las muestras de relave que permitieron conocer si éstas estaban alcanzado el

estado crítico. Asimismo, en este capítulo se presenta las gráficas de las curvas de estado crítico para las tres muestras de relaves y adicionalmente, las gráficas que muestran la superficie de licuación por flujo.

Por último, se describe las conclusiones y recomendaciones, lo que implica que se logró estimar la CSL para las tres muestras de relave con las consideraciones tomadas en la investigación y se recomienda realizar más ensayos en las muestras de relaves, ya que hay poca información para comprender el comportamiento mecánico de estos materiales mineros.

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Resumen de las muestras de relave que fueron ensayadas para obtener la curva del estado crítico.....	69
Tabla 3.2 Resumen de las especificaciones técnicas del bastidor de carga	72
Tabla 3.3 Resumen de las especificaciones técnicas de la bomba de vacío.....	73
Tabla 3.4 Resumen de las especificaciones técnicas del sensor de carga interna.....	75
Tabla 3.5 Resumen de las especificaciones técnicas del adquirente de datos...	76
Tabla 3.6 Resumen de las variaciones de alturas de la muestra de relave M-1 en la etapa de saturación.	93
Tabla 4.1 Resumen de los resultados de los ensayos de caracterización física y clasificación SUCS de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3	98
Tabla 4.2 Resumen de los resultados del ensayo de gravedad específica de sólidos de las muestras de relaves utilizadas en esta investigación ..	99
Tabla 4.3 Resumen de los resultados de los ensayos de densidad mínima y máxima de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3.....	100
Tabla 4.4 Resumen de los resultados de los ensayos Proctor Estándar de las muestras de relaves M-1, M-2 y M-3	100
Tabla 4.5 Resumen de los ensayos triaxiales drenados y no drenados de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 que alcanzaron el estado crítico	101
Tabla 5.1 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-1	115
Tabla 5.2 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-2.....	116
Tabla 5.3 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-3.....	116
Tabla 5.4 Parámetros de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 en el estado crítico	120
Tabla 5.5 Resumen de los parámetros de la FLS de las muestras de relave grueso M-2 y M-3.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Envolvente de falla de Morh y criterio de rotura de Mohr-Coulomb.....	28
Figura 2.2	Criterio de falla de Morh-Coulomb y circulo de Mohr para estado tensional de falla..	28
Figura 2.3	Formas de llegar al criterio de falla: Incrementando el esfuerzo cortante o reduciendo el esfuerzo efectivo.	29
Figura 2.4	Representación de sucesivos estados esfuerzos al aumentar σ_1 manteniendo constante σ_3	30
Figura 2.5	Ejemplo de trayectorias de esfuerzos.	31
Figura 2.6	Círculos de Mohr obtenidos de una serie de pruebas de compresión triaxial.....	32
Figura 2.7	Derivación de la expresión para el criterio de falla Mohr-Coulomb en términos de p y q.	32
Figura 2.8	Diagrama p-q del MIT con determinación de c y φ para los resultados de una serie de ensayos de compresión triaxial.	33
Figura 2.9	Diagrama p-q de Cambridge con determinación de c y φ para los resultados de una serie de ensayos de compresión triaxial..	34
Figura 2.10	Diagrama p-q de Cambridge con líneas de falla en compresión y extensión para cohesión cero y las derivaciones de los parámetros M y φ ..	35
Figura 2.11	Ensayo triaxial consolidado-no drenado	38
Figura 2.12	Ensayo triaxial consolidado-drenado.	40
Figura 2.13	Esquema de Falla de Flujo y Movilidad cíclica.....	43
Figura 2.14	Hipótesis temprana de la relación de vacío crítico de las pruebas de corte directo..	44
Figura 2.15	Comportamiento típico de ensayos triaxiales no drenados realizados por Castro (1969)..	45
Figura 2.16	Curva de estado crítico o línea de estado de estable, criterio de estado para la susceptibilidad de licuación por flujo.....	46
Figura 2.17	Representación de la CSL o SSL en el espacio $e - \sigma' - \tau$ y sus proyecciones en los planos $e - \tau$, $e - \sigma'$ y $\tau - \sigma'$	46
Figura 2.18	Comparación del comportamiento de la arena en función de la densidad relativa y el parámetro de estado para las arenas Kogyuk 350/2.....	47
Figura 2.19	Definición del parámetro de estado ψ	48
Figura 2.20	Trayectorias de esfuerzos para ensayos triaxiales drenados.	49
Figura 2.21	Trayectoria de esfuerzos para ensayos triaxiales no drenados.....	50
Figura 2.22	Trayectorias de esfuerzos para la condición drenada y no drenada.	50
Figura 2.23	Curva de estado crítico en los planos $p'-q$ y $p'-e$ para condiciones drenadas.....	51

Figura 2.24 Curva de estado crítico en los planos $p'-q$ y $p'-e$ para condiciones no drenadas.....	52
Figura 2.25 Curva de estado crítico en el plano $p'-e$	53
Figura 2.26 Error potencial en la relación de vacío sino se consideran los cambios de volumen durante la saturación..	54
Figura 2.27 Respuesta del ensayo triaxial isotrópico consolidado no drenado de arena suelta y saturada..	56
Figura 2.28 Respuesta de cinco especímenes isotrópicos consolidados a la misma relación de vacío inicial a diferentes presiones de confinamiento efectivas iniciales..	56
Figura 2.29 Esquema básico de la estructura de una presa de relaves..	57
Figura 2.30 Tipologías de presas mineras construidas mediante relleno hidráulico con los propios residuos en función del sistema de recrecimiento.	58
Figura 2.31 Vista aérea oblicua de la falla del talud aguas arriba cerca del estribo derecho de la presa Fort Peck-EE. UU (1938).	62
Figura 2.32 Vista de la falla de la presa San Fernando-EE. UU (1971).....	62
Figura 2.33 Vista de la falla de la presa Merriespruit-Sudáfrica (1994)..	63
Figura 2.34 Vista de la falla de la presa Mount Polley-Canadá (2014).	63
Figura 2.35 Vista del flujo de material de relave debido a la falla de la presa Fundao-Brasil (2015).	64
Figura 2.36 Vista del flujo de material de relave debido a la falla de la presa Brumadinho-Brasil (2019).	64
Figura 2.37 Límite aproximado entre la respuesta del suelo dilatante y contractivo utilizando parámetros CPT normalizados..	66
Figura 2.38 Gráfica de tipo de comportamiento del suelo (SBT) basado en CPT que muestra historias de casos donde ocurrió la licuación por flujo.	67
Figura 2.39 Relación de resistencia no drenada y resistencia a la penetración equivalente a la arena limpia CPT normalizada de casos de fallas de licuación de flujo de las clases A y B.....	67
Figura 3.1 Fotografías de las muestras de relaves.	70
Figura 3.2 Fotografía del panel de control triaxial.	71
Figura 3.3 Fotografía del bastidor de carga.	72
Figura 3.4 Fotografía de la bomba de vacío.....	73
Figura 3.5 Fotografía de equipo automático de cambio de volumen.	74
Figura 3.6 Fotografía de la celda triaxial con sensor de carga interna.....	75
Figura 3.7 Fotografía del adquisidor de datos.....	76
Figura 3.8 Prototipo del molde partido.	77
Figura 3.9 Prototipo del pedestal modificado del equipo triaxial	78
Figura 3.10 Válvulas en las mangueras que conectan la base con la tapa.	79

Figura 3.11 Fotografía de la congeladora que se usó en esta investigación.	79
Figura 3.12 Preparación de la muestra.	81
Figura 3.13 Peso de las muestras de relave.	82
Figura 3.14 Armado del pedestal.	83
Figura 3.15 Armado del molde con membrana látex.	84
Figura 3.16 Instalación de la bomba de vacío al molde de reconstitución.	84
Figura 3.17 Reconstitución del espécimen de relave.	85
Figura 3.18 Aseguramiento del espécimen luego de su reconstitución.	86
Figura 3.19 Medición del espécimen.	87
Figura 3.20 Inicio del proceso de saturación.	89
Figura 3.21 Ensayo por corte no drenado de la muestra M-1.	90
Figura 3.22 Congelamiento del espécimen de relave.	91
Figura 3.23 Peso del espécimen de relave congelado.	92
Figura 3.24 Secado de los especímenes de la muestra M-3 en el horno para determinar el contenido de agua.	92
Figura 5.1 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.	104
Figura 5.2 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación de 25 %.	104
Figura 5.3 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.	105
Figura 5.4 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.	105
Figura 5.5 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de las muestras de relave M-1.	106
Figura 5.6 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.	107
Figura 5.7 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación de 25 %.	108
Figura 5.8 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.	109
Figura 5.9 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.	109
Figura 5.10 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de la muestra de relave M-2.	110
Figura 5.11 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.	111
Figura 5.12 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación de 25 %.	111

Figura 5.13 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.	112
Figura 5.14 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.	113
Figura 5.15 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de la muestra de relave M-3.	114
Figura 5.16 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-1.....	118
Figura 5.17 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-2.....	118
Figura 5.18 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-3.....	119
Figura 5.19 CSL de la muestra de relave M-1 con ensayos adicionales de especímenes no congelados.	121
Figura 5.20 CSL de la muestra de relave M-2 con ensayos adicionales de especímenes no congelados.	121
Figura 5.21 CSL de la muestra de relave M-3 con ensayos adicionales de especímenes no congelados.	122
Figura 5.22 Trazo de la superficie de licuación de flujo para la muestra de relave grueso M-2.....	123
Figura 5.23 Trazo de la superficie de licuación de flujo para la muestra de relave grueso M-3.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CID	: Consolidado isotrópicamente y drenado
CIU	: Consolidado isotrópicamente y no drenado
CPT	: Prueba de penetración por cono (<i>cone penetration test</i>)
CSL	: Línea de estado crítico (<i>critical state line</i>)
CSSM	: Mecánica de suelos en el estado crítico (<i>Critical State Soil Mechanic</i>)
FLS	: Superficie de licuación por flujo (<i>flow liquefaction surface</i>)
IP	: Índice de plasticidad
LL	: Límite líquido
MINEM	: Ministerio de Energía y Minas
MDS	: Máxima densidad seca
PBI	: Producto Bruto Interno
SSL	: Línea de estado estable (<i>steady state line</i>)
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UU	: No consolidado y no drenado
A_c	: Área transversal del espécimen después de consolidar (m^2)
c	: Cohesión del material (kPa)
D_c	: Diámetro del espécimen después de consolidar (m)
e	: Relación de vacío
e_c	: Relación de vacío crítico
$e_{fcons.}$: Relación de vacío en la etapa final de consolidación
E_m	: Módulo de Young para el material de membrana (kPa)
G_s	: Gravedad específica de los sólidos

H_c	: Altura después de consolidar (m)
H_o	: Altura inicial (reconstituida) (m)
ΔH	: Variación de altura del espécimen durante la carga (m)
ΔH_o	: Variación de altura del espécimen al final de la consolidación (m)
M_c	: Pendiente de la línea de estado crítico en el plano $p' - q$
p	: Esfuerzo normal promedio (kPa) (en diagrama de $p - q$ de Cambridge)
p'	: Esfuerzo normal promedio efectivo (kPa) (en diagrama de $p - q$ de Cambridge)
q	: Esfuerzo desviador (kPa) (en diagrama de $p - q$ de Cambridge)
S	: Grado de saturación (%)
S_u	: Resistencia última no drenada del suelo (kPa)
t_m	: Grosor de la membrana (mm)
u	: Presión de poros (kPa)
V_c	: Volumen después de consolidar (cm ³)
V_f	: Volumen final (estado crítico) (cm ³)
V_o	: Volumen inicial después de reconstituir la muestra de relave (cm ³)
ΔV	: Variación volumétrica (cm ³)
$\Delta V_{cons.}$: Cambio de volumen durante la consolidación (cm ³)
ΔV_{corte}	: Cambio de volumen incremental durante el corte (cm ³)
ΔV_{sat}	: Cambio de volumen incremental durante la saturación (cm ³)
ΔV_T	: Cambio de volumen total (cm ³)
w	: Contenido de humedad al final del ensayo (%)
Γ	: Altitud de la línea de estado crítico a 1kPa
ε	: Deformación axial (%)
ε_1	: Deformación axial (forma decimal)

λ	: Pendiente de la línea de estado crítico
σ_1	: Esfuerzo principal mayor (kN/m ²)
σ_2	: Esfuerzo principal intermedio (kN/m ²)
σ_3	: Esfuerzo principal menor (kN/m ²)
σ_d	: Esfuerzo desviador (kN/m ²)
σ_f	: Esfuerzo normal perpendicular al plano de falla (kPa)
τ	: Esfuerzo cortante del suelo (kN/m ²)
τ_f	: Esfuerzo cortante sobre el plano de falla (kN/m ²)
φ	: Ángulo de fricción interna del material (°)
φ'_c	: Ángulo de fricción crítico efectivo (°)
φ_c	: Ángulo de fricción crítico (°)
ψ	: Parámetro de estado

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Los eventos de fallas de las presas de relaves vienen ocurriendo desde hace 80 años debido a licuación estática, sin embargo, recién con los eventos ocurridos en estos últimos diez años en diferentes partes del mundo la comunidad geotecnia está considerando importante estudiar y entender la teoría de la mecánica de suelo de estado crítico con el fin de evitar las fallas de estas estructuras geotécnicas. La teoría de la mecánica de suelo de estado crítico estudia el comportamiento del suelo considerando dos puntos importantes, el estado in situ, el cual está relacionado con la relación de vacío y esfuerzo efectivo in situ, y el cambio de volumen que experimenta el suelo en el proceso de corte. Estas dos consideraciones se plasman en la gráfica de la curva de estado crítico para conocer si presenta un estado contractivo o dilatante mediante un parámetro de estado, con el fin de analizar la susceptibilidad a la licuación estática.

Se debe tener en cuenta que los relaves no son suelos naturales, sino, residuos que proviene del proceso de explotación de los minerales, y que generalmente presentan una configuración granulométría como los suelos arenosos, limosos, limo arenoso o arena limosa que pueden experimentar un comportamiento de ablandamiento por deformación y pérdida de resistencia ante una condición saturada y exceso de presión de poros generado por una carga externa.

1.2. PROBLEMÁTICA

La licuación estática es un problema importante para las estructuras geotécnicas, tales como las presas de relaves. Estas estructuras presentan una configuración de terreno inclinado, por ende, están sujeto a esfuerzos cortantes estáticos, el cual convierte el diseño y análisis en un desafío para los ingenieros geotécnicos (Robertson, 2017).

Desde 1964 se trabajó mucho para explicar y comprender la licuación inducida por un sismo, no obstante, se ha puesto poco énfasis en el fenómeno de licuación estática a pesar de que existen antecedentes desde la falla de la presa Fort Peck Dam en Montana-EE. UU (1938) y otras presas que evidenciaron fallas similares, tales como Merriespruit-Sudáfrica (1994), TVA Kingston-EE. UU (2008), Fundao-Brasil (2015), Cadia-Australia (2018), y recientemente la de Brumadinho-Brasil

(2019). Estos sucesos causaron muchas pérdidas de vidas humanas, materiales y un impacto negativo en el medio ambiente (World Information Service on Energy, 2020).

Dada esta problemática, investigadores de países como Canadá (Jefferies y Been, 2015), Australia (Fourie, 2019) y Estados Unidos (Macedo, 2020) vienen desarrollando investigaciones acerca de la licuación estática bajo el enfoque de la teoría de la mecánica de suelos en estado crítico en arenas y relaves, mediante una serie de ensayos triaxiales drenado y no drenado para determinar la curva de estado crítico. Mientras en el Perú, aún no se cuenta con estudios experimentales para estimar la curva en mención para ningún tipo de suelo, y menos en relaves; lo cual es una limitante para realizar investigaciones referentes. Si bien es cierto, el Perú aún no ha experimentado antecedentes de licuación estática; no obstante, es necesario realizar investigaciones para prevenir posibles fallas de las presas de relave y sus consecuencias, ya que la necesidad de construir este tipo de estructuras geotécnicas es cada vez mayor debido a la alta demanda de explotación de minerales en el país, lo cual se evidencia con las estadísticas del sector minero, siendo este el principal generador de divisas al representar el 64.6 % del valor total de exportaciones (MINEM, 2021) y además, es el subsector con mayor importancia económica para el Perú, representando en el 2020 un 11.6 % del PBI nacional (MINEM, 2021).

Por lo expuesto, la presente investigación desarrolla el estudio experimental para estimar la curva de estado crítico para relaves mediante el uso del equipo triaxial estándar. La importancia de investigar el tipo de relaves clasificados o también denominados cicloneados radica que este material es de granulometría gruesa (arenosa), el cual proviene de la separación del relave original proveniente de la planta de beneficio y se utiliza para la construcción de los diques de contención de los relaves finos que resultan de la misma clasificación; y que en caso se presente saturación es propenso a que falle por licuación estática o dinámica. Por otro lado, los relaves que son depositados en el vaso sobre el que se soportan las presas de relaves construidos con el método línea central, son de naturaleza más fina; este material usualmente se encuentra saturado y por lo tanto es propenso a presentar licuación estática o dinámica, en cuyo caso también se presentaría la falla de la zona aguas arriba de la presa relaves. En ambos casos una eventual falla de la estructura de contención de relaves ocasionaría impactos a las poblaciones aledañas, al ambiente y pérdidas económicas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Generales

Estimar la curva de estado crítico para relaves empleando el equipo triaxial estándar instrumentado.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Implementar el equipo triaxial estándar con instrumentación con la finalidad de estimar la curva de estado crítico.
- Alcanzar la reconstitución del espécimen a una densidad muy baja con ayuda de una bomba de succión de vacíos.
- Realizar ensayos triaxiales no drenados y drenados consolidados isotrópicamente hasta alcanzar por lo menos el 20% de deformación axial.
- Mediante el proceso de congelamiento de las muestras de relaves determinar la relación de vacíos en el estado crítico.

1.4. ANTECEDENTES REFERENCIALES

La licuación es uno de los temas más importantes, interesantes, complejos y controvertidos en la ingeniería geotécnica. Este fenómeno se presenta en suelos sin cohesión a bajas densidades y saturadas bajo cargas rápidas (carga cíclica o carga estática) en condiciones sin drenaje, es decir, se genera una tendencia a la densificación provocando así el aumento excesivo de la presión de poros y disminución de los esfuerzos efectivos. El comportamiento de tales suelos bajo carga cíclica ha recibido una gran atención por parte de los investigadores desde que se observaron los dramáticos efectos de la licuación en Niigata, Japón (Comité Nacional de Japón 1965; Ohsaki, 1966) y Alaska (Grantz et al., 1964; Seed y Wilson, 1967) durante los terremotos de 1964. Sin embargo, el comportamiento de licuación por flujo provocado por cargas estáticas (en adelante, licuación estática) ha recibido menos atención, a pesar de que existen antecedentes desde la falla de la presa Fort Peck Dam en Montana-EE. UU (1938) y estudios de investigadores pioneros en el tema.

Los primeros estudios que permite entender la licuación estática se remonta a Casagrande (1936) quién empezó a investigar acerca de la densidad crítica de la arena con la finalidad de diseñar la presa Franklin Falls en Nueva Hampshire

(EE.UU) y evitar que falle por licuación. Por consiguiente, Casagrande realizó ensayos de corte directo drenado y observó que las arenas sueltas se contraían y las arenas densas se dilataban hasta aproximadamente la misma relación de vacío para grandes deformaciones, al cual denominó relación de vacío crítico. Posteriormente, Gonzalo Castro (1969) realizó una serie de ensayos triaxiales no drenados en arenas sueltas a esfuerzos controlados obteniendo una relación única entre la relación de vacíos y la presión de confinamiento a grandes deformaciones denominando a dicha relación línea de estado estable (SSL), actualmente llamada curva de estado crítico.

El estado crítico se define como el estado en el que el suelo se deforma continuamente bajo un esfuerzo cortante y presión de confinamiento efectiva constantes a volumen y velocidad constantes. Así mismo, la CSL es útil para identificar las condiciones bajo las cuales un suelo puede ser susceptible a la licuación por flujo, es decir, los suelos con relación de vacíos inicial que se encuentran por debajo de la CSL no son susceptibles, mientras que los suelos cuya relación de vacíos se encuentra por encima de CSL serán susceptibles, en este último caso el esfuerzo cortante estático excede a la resistencia residual (Kramer, 1996).

Años más tarde, en la década de 1980, Been y Sladen realizaron estudios sobre las arenas del mar de Beaufort debido a la falla de la Berma Nerlerk por licuación estática, este suceso despertó el interés de compañías canadiense en seguir investigando dicho fenómeno en el contexto de estado crítico. En efecto, en los últimos 35 años la compañía canadiense Golder Asociados viene realizando ensayos triaxiales en arenas normalizadas en laboratorio, arenas in situ y en relaves con la finalidad de determinar la curva de estado crítico y comprender mejor este fenómeno.

Actualmente se cuenta con el conocimiento práctico para determinar la curva de estado crítico sugerido por Jefferies y Been (2015), el cual recomienda realizar ensayos triaxiales no drenado y drenado en muestras sueltas, asimismo algunas consideraciones sobre el equipo triaxial estándar.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En este capítulo se abarca un conjunto de teorías y conceptos para entender el desarrollo de la presente investigación, estos son: conceptos básicos de la mecánica de suelo; tales como la resistencia al corte, el criterio de falla de Mohr-Coulomb y las trayectorias de esfuerzo; conceptos sobre los ensayos triaxiales convencionales para comprender el comportamiento esfuerzo normal-deformación axial del material en estudio y familiarizarse con algunos términos técnicos; conceptos generales de la licuación bajo el enfoque de la mecánica de estado crítico y el más importante, el marco teórico del estado crítico que aporta en gran porcentaje al entendimiento teórico para el desarrollo de esta tesis. Además, se define el material de estudio, que viene a ser el relave, y los tipos de construcción de los depósitos de almacenamiento de este material, que han venido presentando fallas en los últimos años en muchos países a causa del fenómeno de licuación por flujo.

Por último, se describe de manera general la aplicación de la teoría de mecánica de suelos en estado crítico (CSSM del inglés *Critical State Soil Mechanic*) en algunas investigaciones de campo, como el CPT y sus correlaciones con ensayos de laboratorio con la finalidad de analizar la susceptibilidad a la licuación y dar a conocer la importancia de complementar con estudios de métodos numéricos ante la complejidad del proyecto en estudio.

2.1. CONCEPTOS DE LA MECÁNICA DE SUELO

2.1.1. Resistencia del suelo al corte

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla por deslizamiento a lo largo del plano de falla. Este tópico es de particular importancia para analizar problemas asociados a la estabilidad del suelo, tales como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras (Das, 2013, p.228).

2.1.2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb

Coulomb (1776) postuló una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica del esfuerzo normal y esfuerzo cortante máximo y no solo debido a uno de ellos. Además, planteó una

ley de variación lineal entre ambos tipos de esfuerzos sobre el plano de falla, que es representada por la siguiente ecuación.

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \varphi \quad (2.1)$$

Donde: τ_f es el esfuerzo cortante sobre el plano de falla, σ_f es el esfuerzo normal perpendicular al plano de falla, c es la cohesión y φ el ángulo de fricción interna.

Años más tarde, Mohr (1900) confirmó esta relación funcional entre esfuerzo normal y esfuerzo cortante sobre el plano de falla, sin embargo, él plantea que esta relación funcional es una curva y no lineal (ver Figura 2.1). La ecuación 2.1 suele denominarse criterio de falla de Mohr-Coulomb, debido a que es usualmente graficada junto al círculo de Mohr para evaluar la proximidad del estado tensional del suelo de la línea de falla de Coulomb como se muestra en la Figura 2.2. Este criterio de falla asume condiciones planas (estado de esfuerzo plano), es decir, no se considera el esfuerzo principal medio (σ_2); incluso, en un ensayo triaxial convencional es igual al esfuerzo principal menor (σ_3).

Se debe tener en cuenta que para un suelo saturado el esfuerzo normal total (σ) en un punto es la suma del esfuerzo efectivo (σ') y la presión del agua intersticial (u), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.2)$$

Y el esfuerzo efectivo es generado por los sólidos del suelo; por lo tanto, para aplicar la ecuación 2.1 a la mecánica de suelo es necesario reescribirla como sigue.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi' = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (2.3)$$

Donde: c' es el esfuerzo de cohesión efectivo y φ' es el ángulo de fricción efectivo.

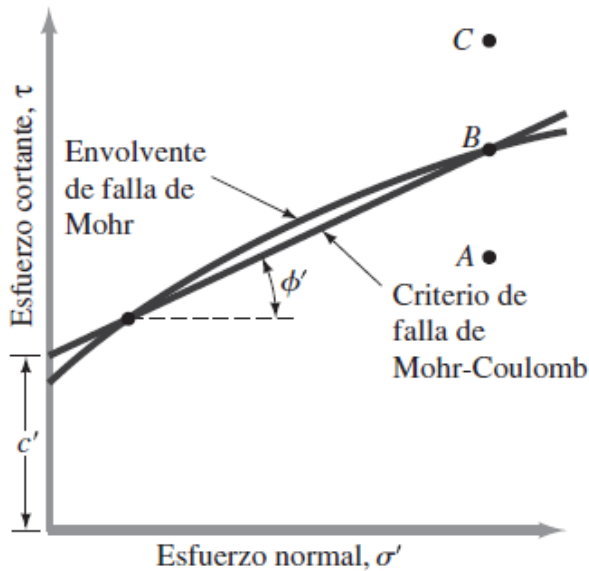


Figura 2.1 Envolvente de falla de Morh y criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Fuente: Das, 2013.

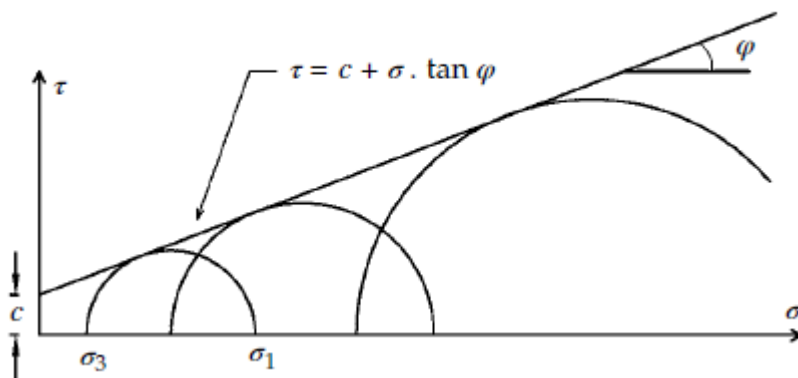


Figura 2.2 Criterio de falla de Morh-Coulomb y círculo de Mohr para estado tensional de falla. Fuente: Lade, 2016.

La importancia de la envolvente de falla (ver Figura 2.1) se explica como sigue: si el esfuerzo normal y esfuerzo cortante sobre un plano de falla son representados por el punto A, entonces no ocurrirá falla y/o deslizamiento a lo largo de ese plano. En cambio, si son representados por el punto B (sobre la envolvente de falla) ocurrirá falla a lo largo de dicho plano. Por otro lado, un estado de esfuerzos como el que representa el punto C no sería posible, ya que el suelo ya habría fallado para un esfuerzo cortante menor (Das, 2013).

2.1.3. Formas de llegar al criterio de falla de Mohr-Coulomb

Como se mencionó anteriormente, el suelo falla por corte cuando alcanza el criterio de falla, representada por la línea recta en la Figura 2.3. El suelo puede alcanzar la falla de diferentes maneras, una opción es incrementando el esfuerzo

cortante y la otra opción es reduciendo el esfuerzo efectivo como se muestra en la Figura 2.3. Este último es de interés para la presente investigación, ya que la reducción de esfuerzo efectivo se debe al exceso de la presión de poros.

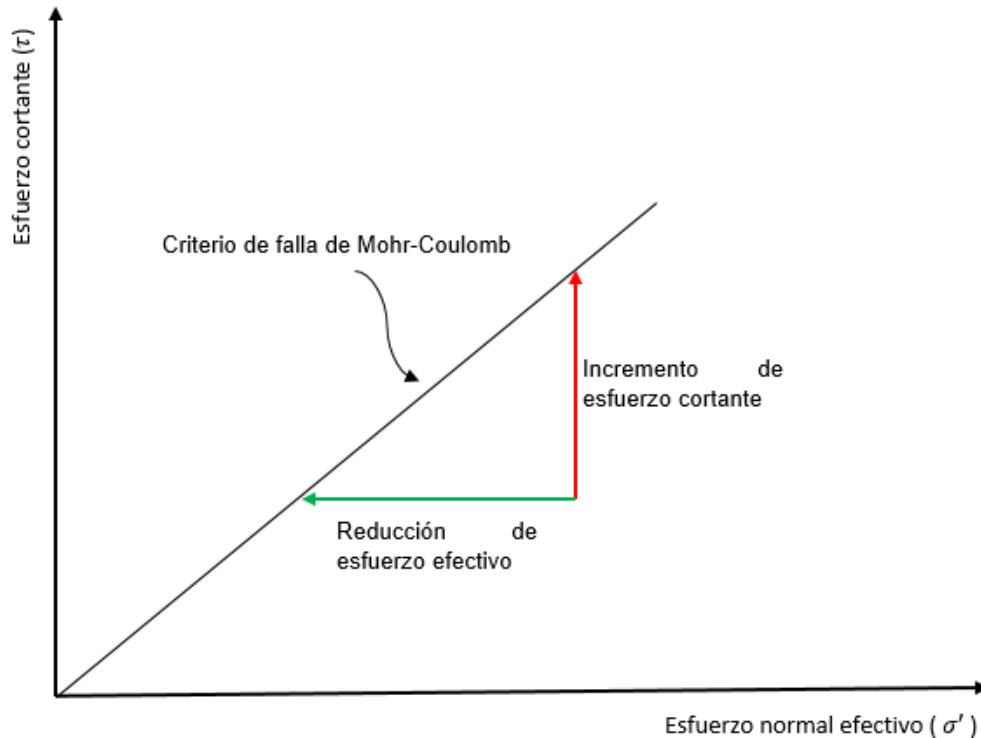


Figura 2.3 Formas de llegar al criterio de falla: Incrementando el esfuerzo cortante o reduciendo el esfuerzo efectivo.

De acuerdo con Vick (1990) se estableció tres mecanismos donde la presión de poros provoca la reducción del esfuerzo efectivo; por ende, la pérdida de la resistencia cortante, éstas son:

- Un nivel freático creciente.
- Una velocidad de crecimiento de la estructura muy rápida, es decir, incremento de la carga vertical muy rápida, esto se conoce como el proceso de consolidación.
- Esfuerzos de corte en condición no drenada en suelos contractivos (incluyendo licuación)

2.1.4. Trayectoria de esfuerzos

Frecuentemente se desea representar los sucesivos estados de esfuerzos que existen en una muestra de suelo al estar sometida a carga y una forma es mediante trazos de círculos de Mohr, como se muestra en la Figura 2.4(a), donde

se observa estados sucesivos de esfuerzos al incrementar σ_1 y manteniendo constante σ_3 , No obstante, un diagrama con muchos círculos resulta confuso y en especial si se representan sobre un mismo diagrama los resultados de diversos ensayos. Por tanto, se opta por el método más simple que consiste en representar los esfuerzos cortante y normal en una serie de puntos (p-q) que se son unidos mediante una línea denomina trayectoria de esfuerzos, que proporciona una representación continua de sucesivos estados de esfuerzos como se observa en la Figura 2.4(b)(Lambe & Whitman, 2004, p.126).

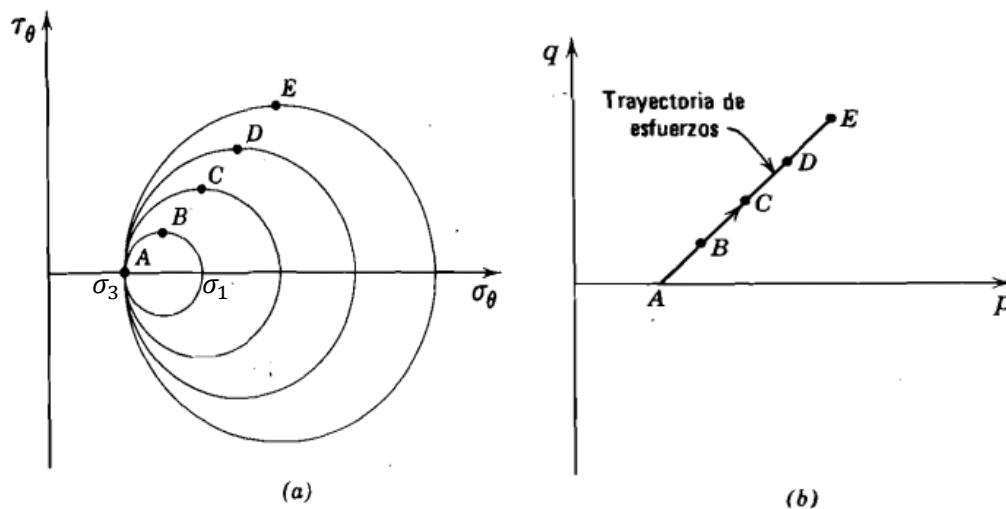


Figura 2.4 Representación de sucesivos estados esfuerzos al aumentar σ_1 manteniendo constante σ_3 . Los puntos A, B, etc., representan idénticos estados en ambos diagramas. a) Circulo de Mohr. b) Diagrama p-q. Fuente: Lambe y Whitman,2004.

Existen diversas trayectorias de esfuerzo que parten de un estado inicial donde los esfuerzos principales son iguales ($\sigma_v = \sigma_h$), este es un estado inicial común en muchos tipos de ensayos de laboratorio. A partir de este estado inicial se puede variar en general los esfuerzos σ_v y σ_h en la misma magnitud o se hace variar uno de los esfuerzos principales mientras que el otro se mantiene constante como se muestra en Figura 2.5.

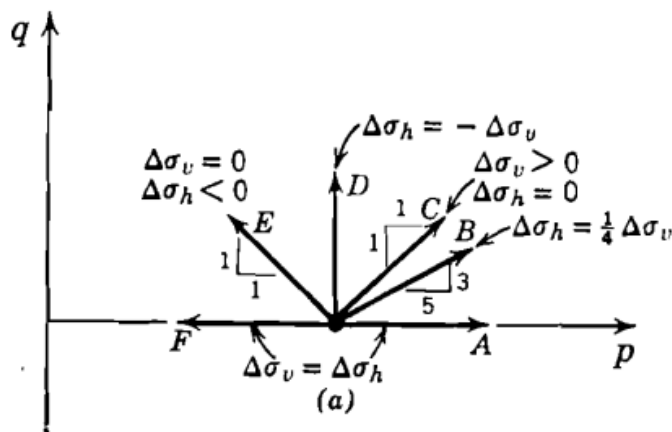


Figura 2.5 Ejemplo de trayectorias de esfuerzos. Fuente: Lambe y Whitman, 2004.

En los ensayos especiales, como el ensayo triaxial convencional es común tener trayectorias de esfuerzo aumentando el esfuerzo principal mayor (σ_1) y manteniendo constante el esfuerzo principal menor (σ_3) generando así una compresión en el espécimen. Existen dos formas de expresar la trayectoria de esfuerzo en la gráfica p y q: una es mediante el concepto del MIT (Massachusetts Institute Technology) y el otro, el de Cambridge. El primero deduce y expresa las ecuaciones de los parámetros p y q usando el criterio de falla de Mohr-Coulomb y el Circulo de Mohr, mientras que el segundo expresa las ecuaciones de p y q considerando los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 . A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.1.4.1. Diagrama p-q del MIT

Este concepto surge de la necesidad de representar mejor la envolvente de falla, ya que usualmente se realizan más de tres ensayos en un suelo y es difícil trazar una envolvente de falla de mejor ajuste tangencial a todos los círculos de Mohr. La Figura 2.6 muestra un ejemplo de una serie de círculos de Mohr de ensayos triaxiales. Por consiguiente, es mucho más fácil ajustar una línea a través de una serie de puntos; incluso, si están dispersos. Para este propósito, cada círculo de Mohr está representado por su punto superior, que tiene las siguientes coordenadas (ver Figura 2.7).

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad , \quad p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (\text{Para ensayo de compresión triaxial})$$

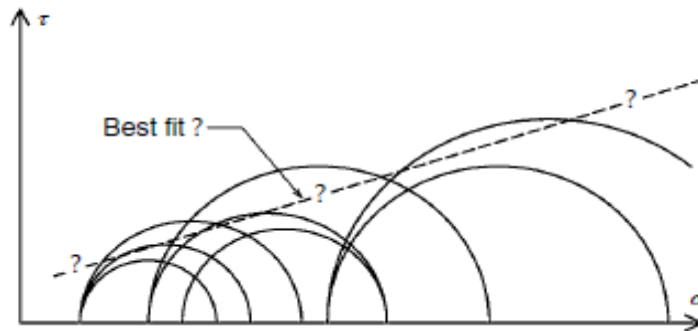


Figura 2.6 Círculos de Mohr obtenidos de una serie de pruebas de compresión triaxial. Fuente: Lade,2016.

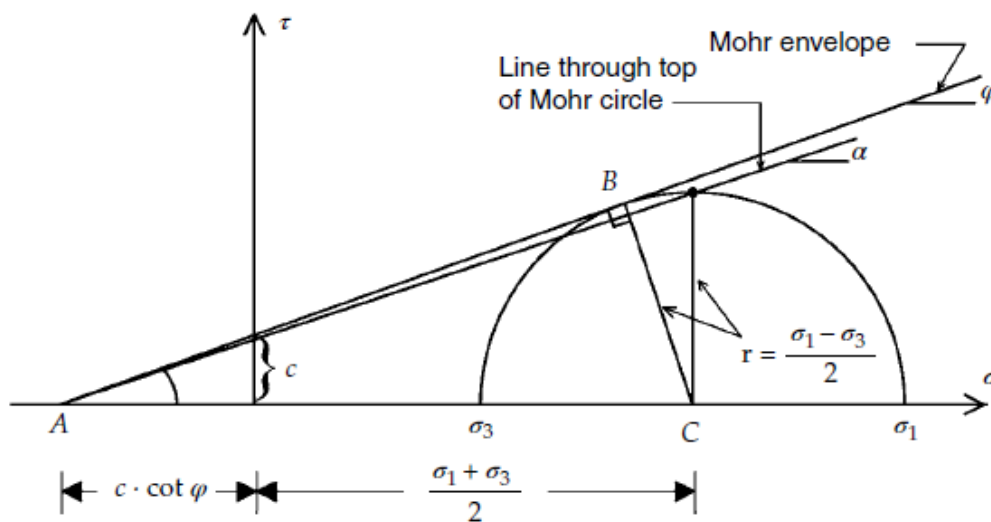


Figura 2.7 Derivación de la expresión para el criterio de falla Mohr-Coulomb en términos de p y q. Fuente: Lade,2016.

Estas coordenadas se trazan en un diagrama p-q como se detalla en la Figura 2.8 y se ajustan mediante una regresión lineal. La expresión para el criterio de falla de Mohr-Coulomb en términos de p y q se derivan de la Figura 2.7.

Del triángulo ABC:

$$r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cdot \cot \varphi \right) \cdot \sin \varphi$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi$$

$$q = p \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \quad (2.4)$$

De la expresión 2.4, $\sin \varphi$ representa la pendiente y $c \cdot \cos \varphi$, la intersección de la línea recta con el eje τ . Los valores de c y φ se determinan de la Figura 2.8.

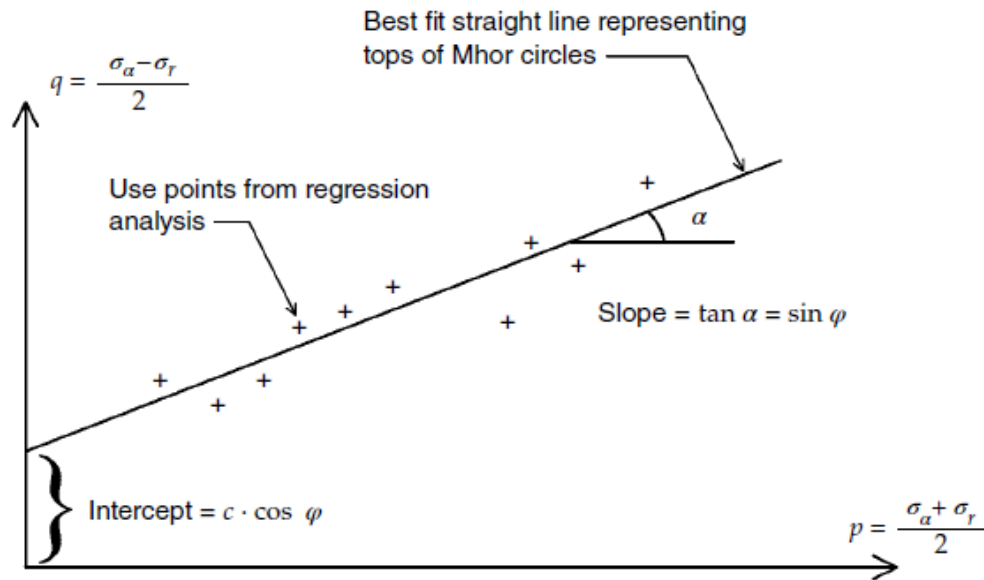


Figura 2.8 Diagrama p-q del MIT con determinación de c y φ para los resultados de una serie de ensayos de compresión triaxial. Fuente: Lade,2016

Determinación de c y φ :

$$\varphi = \arcsin(\tan \alpha) \quad , \quad c = \frac{\text{intersección}}{\cos \varphi} \quad (2.5)$$

2.1.4.2. Diagrama p-q de Cambridge

El diagrama p-q de Cambridge no está relacionado directamente con el diagrama de Mohr, pero considera los tres esfuerzos principales y se definen de la siguiente manera.

Considerando $\sigma_2 = \sigma_3$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad , \quad p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{1}{3}q + \sigma_3$$

Donde: p representa el esfuerzo normal promedio y q representa el esfuerzo desviador en un ensayo compresión triaxial.

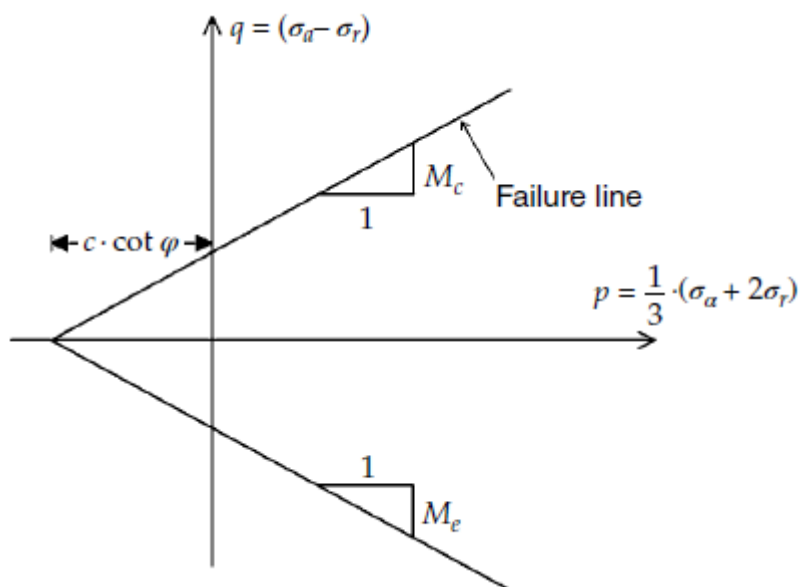


Figura 2.9 Diagrama p-q de Cambridge con determinación de c y φ para los resultados de una serie de ensayos de compresión triaxial. Fuente: Lade, 2016.

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama p y q para condiciones de extensión y compresión triaxial. La envolvente de falla (línea recta) interseca al eje p en $p = -c \cdot \cot \varphi$ (es el mismo valor de intersección que se obtuvo del diagrama de Mohr) y la pendiente de la recta es M . Por tanto, el criterio de falla en este diagrama resulta como sigue:

$$q = M \cdot (p + c \cdot \cot \varphi) \quad (2.6)$$

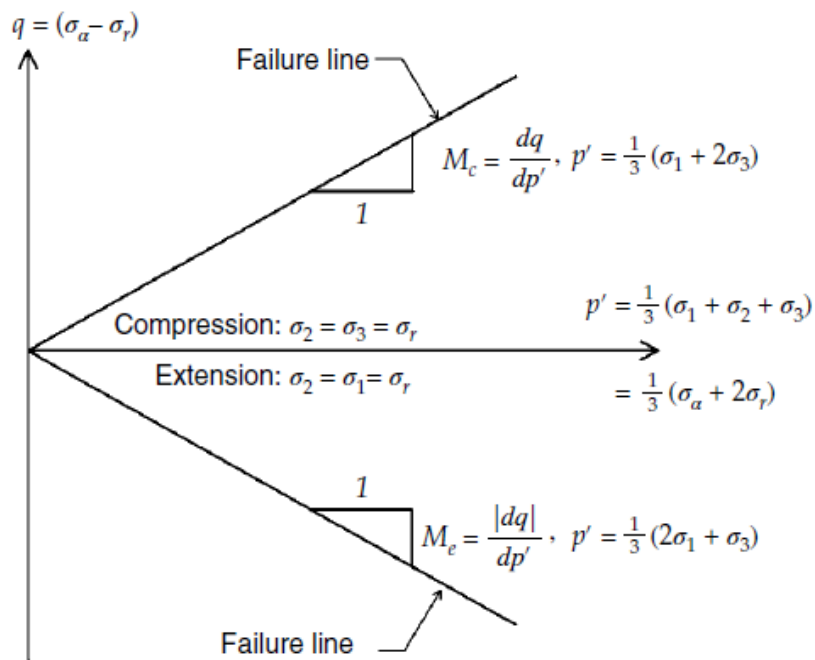
Por otro lado, la Figura 2.10 muestra un diagrama p y q de Cambridge con líneas de falla en compresión y extensión para un suelo sin cohesión. Las pendientes de las líneas de falla están indicadas por M y están relacionadas con los ángulos de fricción en compresión (φ_c) y extensión (φ_e) como sigue (ver derivaciones en la Figura 2.10):

Para compresión triaxial:

$$M_c = \frac{6 \cdot \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c} \quad \varphi_c = \arcsin \left(\frac{3 \cdot M_c}{6 + M_c} \right)$$

Para extensión triaxial:

$$M_e = \frac{6 \cdot \sin \varphi_c}{3 + \sin \varphi_c} \quad \varphi_e = \arcsin \left(\frac{3 \cdot M_c}{6 - M_c} \right)$$



$$M_c = \frac{dq}{dp'} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + 2\sigma_3)} = \frac{3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot 2}{(\sigma_1 + 2\sigma_3) \cdot 2} = \frac{6 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$M_c = \frac{6 \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)}{3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}} = \frac{6 \cdot \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c} \Rightarrow \sin \varphi_c = \frac{3 \cdot M_c}{6 + M_c}$$

$$\varphi = 90^\circ : M_{c_{max}} = 3$$

$$M_c = 1 : \varphi = 25.4^\circ$$

$$M_e = \frac{|dq|}{dp'} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{1}{3} \cdot (2\sigma_1 + \sigma_3)} = \frac{3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot 2}{(2\sigma_1 + \sigma_3) \cdot 2} = \frac{6 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$M_e = \frac{6 \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)}{3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}} = \frac{6 \cdot \sin \varphi_e}{3 + \sin \varphi_e} \Rightarrow \sin \varphi_e = \frac{3 \cdot M_e}{6 - M_e}$$

$$\varphi = 90^\circ : M_{e_{max}} = 1.5$$

$$M_e = 1 : \varphi = 36.9^\circ$$

$$\varphi = 25.4^\circ : M_e = 0.751$$

Figura 2.10 Diagrama p-q de Cambridge con líneas de falla en compresión y extensión para cohesión cero y las derivaciones de los parámetros M y φ . Fuente: Lade, 2016.

Es importante recalcar que el concepto del diagrama p-q de Cambridge es usado en la mecánica de suelo del estado crítico; por esa razón, se utilizó para representar las trayectorias de esfuerzos de los relaves en esta investigación.

2.2. ENSAYO TRIAXIAL

2.2.1. Conceptos generales

La prueba de ensayo triaxial es uno de los métodos más confiables y disponibles para determinar los parámetros de resistencia cortante. Teóricamente en este ensayo se puede hacer variar los esfuerzos actuantes sobre una probeta de suelo en tres direcciones ortogonales, efectuando mediciones sobre las características mecánicas en forma completa. Sin embargo, en la realidad solo se efectúan en dos direcciones, debido a que se utilizan probetas cilíndricas que están sujetas a esfuerzos laterales o radiales por un fluido, generalmente agua, quien también aporta al incremento del esfuerzo axial. El espécimen o probeta de suelo es revestido con una membrana látex dentro de una cámara a presión, asimismo, lleva discos porosos en la parte superior e inferior que conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen (Valerio, 2011).

En general, el ensayo triaxial comprende tres etapas: saturación, consolidación y corte del espécimen. Y de acuerdo con el tipo de cizallamiento se clasifica en ensayo de compresión y extensión. El de compresión es aquel donde la dimensión original axial del espécimen disminuye y el de extensión, aquel en que dicha dimensión aumenta durante el ensayo. Ambos ensayos presentan varias modalidades de laboratorio que combina la variación del esfuerzo axial con la variación del esfuerzo lateral.

Los ensayos triaxiales convencionales y los que se usan en esta presente investigación son de compresión, estos se generan por un esfuerzo lateral constante y aumento progresivo monotónico del esfuerzo axial durante la etapa de corte, permitiendo o no el drenaje. Y en la etapa de consolidación el espécimen es sometido a una secuencia tensional isotrópica, es decir, el incremento de esfuerzo axial es igual al incremento de esfuerzo radial o lateral. Estos ensayos de compresión triaxial convencional utilizan la modalidad de deformación controlada, ya que entrega información sobre la resistencia cortante después de alcanzar la resistencia máxima (Rojas, 2016).

Por otro lado, es usual llamar σ_1 , σ_2 , σ_3 , a los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor respectivamente. En los ensayos triaxiales de compresión, la presión axial siempre es el esfuerzo principal mayor (σ_1); mientras que, los esfuerzos laterales son el esfuerzo intermedio y menor, y estos son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$).

2.2.2. Tipos de ensayos triaxiales convencionales

Existen tres tipos de ensayos triaxiales normados que rigen este tipo de modalidad descrito líneas arriba: ensayo de compresión triaxial no consolidado y no drenado (UU)-ASTM D2850, ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y no drenado (CIU)-ASTM D4767 y el ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y drenado (CID)-ASTM D7181. A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.2.2.1. *Ensayo de compresión triaxial no consolidado y no drenado (UU)*

Es un ensayo rápido y se aplica principalmente a suelos cohesivos y de baja permeabilidad, en este ensayo no se considera la etapa de saturación ni consolidación. La carga axial es aplicada en condiciones no drenadas y sin mediciones de la presión de poros, asimismo, la resistencia determinada en este ensayo es aplicada a situaciones de campo donde se asume que las cargas toman lugar tan rápidamente, y que el suelo es tan impermeable, que no hay tiempo suficiente para que la presión de poros inducida sea disipada y que ocurra consolidación durante este periodo de carga. Por lo tanto, los esfuerzos principales en la falla y en otros estados tensionales son determinados en términos totales, sin tener la posibilidad de expresarlos en términos efectivos. Los parámetros geotécnicos de resistencia al corte también son determinados en términos totales o no drenados (ϕ_u y c_u), siendo de particular importancia la resistencia al corte no drenado obtenido del análisis y ensayo de probetas en estado de completa saturación.

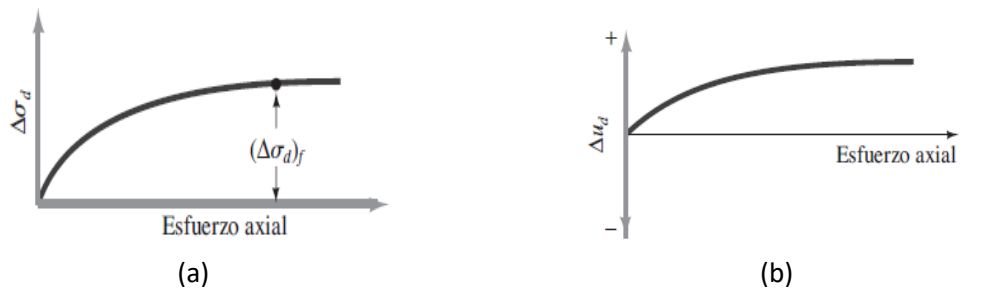
2.2.2.2. *Ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y no drenado (CIU)*

Ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y no drenado, en adelante ensayo triaxial CU. Es un ensayo que considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte o aplicación del esfuerzo desviador. En la etapa de corte no se admite el drenaje, pero si se considera la medición de la presión de

poros, lo cual permite expresar los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte en términos totales o no drenados (σ_1 , σ_3 , φ_u y c_u) y efectivos o drenados (σ'_1 , σ'_3 , φ'_u y c'_u). Cabe mencionar que, para medir correctamente la presión de poros, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja para que así la presión de poros esté continuamente estabilizada a través de todo el espécimen.

En la Figura 2.11 se muestra los patrones generales de variación del esfuerzo desviador ($\Delta\sigma_d$) y la variación de la presión de poros (Δu) con la deformación axial para la arena y los suelos de arcilla.

Arena suelta o arcilla normalmente consolidada



Arena densa o arcilla sobreconsolidada

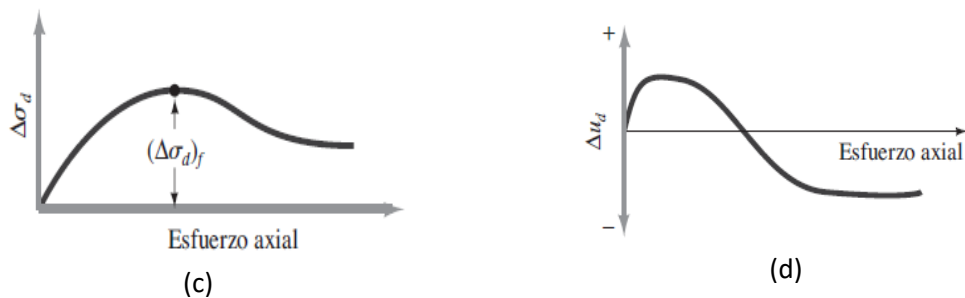


Figura 2.11 Ensayo triaxial consolidado-no drenado: (a) Esfuerzo desviador contra deformación axial de arena suelta y arcilla normalmente consolidada. (b) Variación de la presión de poros con la deformación axial de arena suelta y arcilla normalmente consolidada. (c) Esfuerzo desviador contra deformación axial de arena densa y arcilla sobre consolidada, (d) Variación de la presión de poros con la deformación axial de arena densa y arcilla sobre consolidada. Fuente: Das,2004

De la Figura 2.11(a) se observa que el esfuerzo desviador va en aumento con la deformación axial para una arena suelta o arcilla normalmente consolidada, mientras que en la Figura 2.11(c) el esfuerzo desviador aumenta hasta alcanzar un pico y luego decae a medida que se va deformando axialmente para una arena densa o arcilla sobreconsolidada. Por otro lado, tenemos la variación de la presión

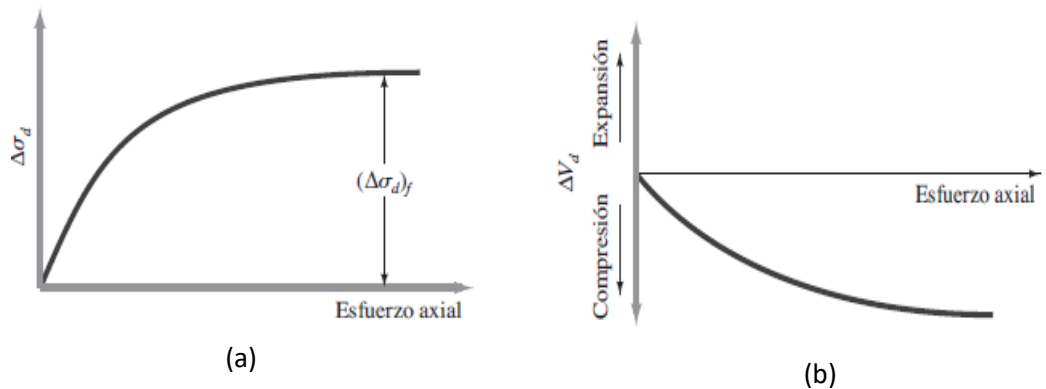
de poros en la Figura 2.11(b), donde se observa en la arena suelta o arcilla normalmente consolidada el aumento de la presión de poro con la deformación, mientras que en la arena densa y arcilla sobreconsolidada la presión del agua intersticial aumenta con la deformación hasta un cierto límite, más allá del cual disminuye y se hace negativo (con respecto a la presión atmosférica). Este patrón es debido a que el suelo tiene tendencia a dilatarse.

2.2.2.3. *Ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y drenado (CID)*

Ensayo de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y drenado, en adelante ensayo triaxial CD. Es un ensayo que también considera las etapas de saturación, consolidación isotrópica y corte. La diferencia radica en que durante la etapa de corte se admite el drenaje y se mide el volumen de agua que entra o sale del espécimen. Los esfuerzos principales y parámetros geotécnicos de resistencia al corte se expresan directamente en términos efectivos o drenados (σ'_1 , σ'_3 , ϕ'_u y c'_u); y para evitar que se generen excesos de presión de poros y los esfuerzos medidos sean realmente efectivos, la velocidad de deformación o aplicación de la carga axial debe ser lo suficientemente baja, en efecto, mucho más baja que en un ensayo triaxial CU.

Los ensayos triaxiales CD se utilizan esencialmente en suelos granulares (arenas), sin embargo, se puede aplicar en suelos finos, pero los ensayos requieren tiempos prolongados del orden de semanas. En la Figura 2.12(a) y (c) se muestra la gráfica típica de la variación del esfuerzo desviador de una arena suelta (arcilla normalmente consolidada) y arena densa (arcilla sobreconsolidada) respectivamente. A diferencia del ensayo triaxial CU, en este ensayo se mide la variación volumétrica, dado que se permite el drenaje. En la Figura 2.12 (b) y (d) se muestra el cambio de volumen que se produce debido a la aplicación del esfuerzo desviador para una arena suelta y densa respectivamente.

Arena suelta o arcilla normalmente consolidada



Arena densa o arcilla sobreconsolidada

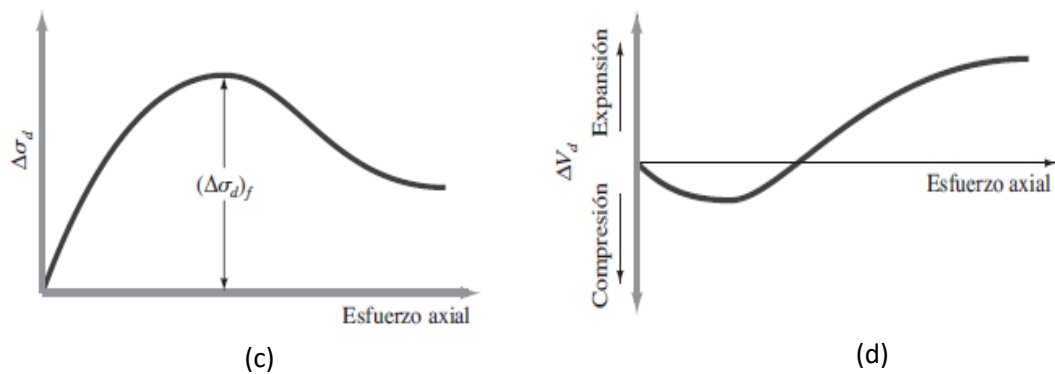


Figura 2.12 Ensayo triaxial consolidado-drenado: (a) Gráfica del esfuerzo desviador contra deformación en la dirección vertical para arena suelta y arcilla normalmente consolidada. (b) Cambio de volumen en la arena suelta y arcilla normalmente consolidada durante la aplicación del esfuerzo desviador. (c) Gráfica del esfuerzo desviador contra deformación en la dirección vertical para arena y arcilla densa sobre consolidada. (d) Cambio de volumen en arena densa y arcilla sobre consolidada durante la aplicación del esfuerzo desviador. Fuente: Das, 2004.

2.2.3. Terminología de ensayos de compresión triaxial convencionales

2.2.3.1. Esfuerzo desviador (σ_d)

Es la diferencia entre el esfuerzo principal mayor σ_1 y el menor σ_3 durante el corte, que se traduce como un incremento del esfuerzo axial sobre el esfuerzo en estado isotrópico definido en la etapa de consolidación. Esta variable tiene el mismo valor en términos totales como efectivos, ya que la presión de poros es la misma en todas las direcciones posibles y se anula (ver ecuación 2.7).

$$\Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 + u - \sigma'_3 - u = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2.7)$$

2.2.3.2. Contrapresión

Es una presión aplicada directamente al agua de poros para comprimir el aire que se encuentra en estos espacios y así posibilitar su disolución en este mismo líquido. Las principales funciones del uso de contrapresión son aumentar el porcentaje de saturación de la muestra y establecer una presión de poros inicial considerable, este último para evitar que las grandes caídas de presión intersticial que ocurren durante el corte de los suelos, que se comportan como densos y fuertemente preconsolidados, puedan causar la cavitación del agua de poros (Rojas, 2016).

2.2.3.3. Esfuerzo efectivo de consolidación

Es la diferencia entre la presión de cámara y la presión de poros al final de la consolidación (comienzo de la etapa de corte). Hay que tener en cuenta que el espécimen sufre una ligera consolidación durante la saturación, por lo que durante y al final de esta etapa también existe un esfuerzo efectivo de consolidación.

2.3. CONCEPTO DE LICUACIÓN EN SUELOS

La licuación es uno de los temas más importantes, interesantes y controvertidos en la ingeniería geotécnica. Sus efectos devastadores llamaron la atención de los ingenieros geotécnicos cuando ocurrió el terremoto de Alaska ($M_w=9.2$) y Niigata Japón ($M_s=7.5$) en el año de 1964. Estos dos eventos muestran los efectos provocados por licuación del suelo, tales como fallas de taludes, fallas de puentes y cimientos de edificios y flotación de estructuras (Kramer, 1996, p. 348).

La licuación es un fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia al corte de una masa de suelo sin cohesión en estado suelto bajo condiciones saturadas y sin drenaje a causa del exceso de presión de poros provocado por cargas monotónicas, cíclicas o dinámicas. Los fenómenos de licuación que resultan de este proceso se pueden dividir en dos grupos principales: licuación por flujo y movilidad cíclica.

2.3.1. Licuación por flujo

La licuación por flujo ocurre cuando el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual, es decir, el esfuerzo de corte estático es mayor que la resistencia al corte del suelo en su estado licuado. La licuación por flujo produce los efectos más dramáticos de

todos los fenómenos relacionados con la licuación: inestabilidades tremendas conocidas como falla de flujo, estas se caracterizan por la naturaleza repentina de su origen, la velocidad con la que se desarrollan y la gran distancia sobre la cual los materiales licuados a menudo se mueven (Kramer, 1996).

La licuefacción por flujo puede ocurrir en cualquier suelo metaestable saturado o casi saturado, como arenas y limos muy sueltos sin cohesión, así como arcillas muy sensibles. En caso de falla de una estructura del suelo, como una pendiente o un terraplén, se debe ablandar un volumen suficiente de material. La falla resultante puede ser un deslizamiento o un flujo dependiendo de las características del material del suelo y la geometría del terreno. Los movimientos resultantes se deben a tensiones internas inducidas por la gravedad y pueden ocurrir después de que inicie el mecanismo de activación.

2.3.2. Movilidad cíclica

A diferencia de la licuación por flujo, este fenómeno hace referencia a la deformación progresiva de suelos saturados bajo cargas cíclicas. Se produce cuando el esfuerzo de corte estático es menor que la fuerza de corte del suelo licuado. Uno de los efectos comúnmente observados es el deslizamiento lateral (dispersiones laterales) en masas de suelo planas o ligeramente inclinadas.

Cabe mencionar que la licuación por flujo ocurre con menos frecuencia que la movilidad cíclica, pero sus efectos suelen ser mucho más graves. Por otro lado, la movilidad cíclica puede ocurrir bajo un rango mucho más amplio de suelo y condiciones del sitio que la licuación por flujo, sus efectos pueden ser desde insignificantes hasta altamente dañinos (Kramer, 1996).

Es importante recalcar que la generación del exceso de presión de poros es clave para el desarrollo de la licuación, ya que de no existir un incremento de presión de poro no va a ocurrir la falla de flujo, ni movilidad cíclica. En la Figura 2.13 se muestra el desarrollo de estos dos fenómenos mediante la gráfica p' vs q .

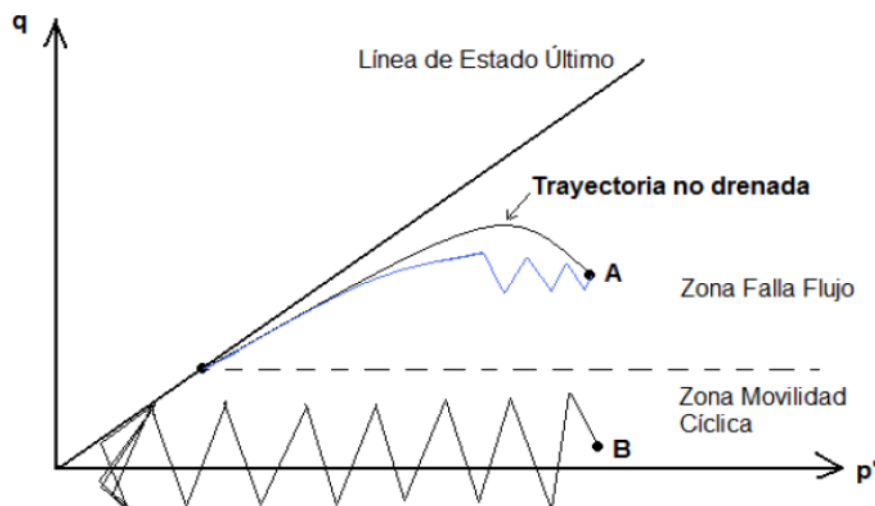


Figura 2.13 Esquema de Falla de Flujo y Movilidad cíclica. Fuente: Asenjo, 2010

Los puntos A y B de la Figura 2.13 representan estados tensionales iniciales de una arena saturada y la línea punteada representa la resistencia última no drenada del suelo (S_u). El punto A por situarse arriba de la S_u es susceptible a desarrollar falla por flujo bajo carga monotónica o cíclica, ya que allí existe una fuerza de corte estático inicial mayor a la resistencia última del suelo. Mientras que el punto B al ubicarse por debajo de la S_u es susceptible a la movilidad cíclica, y para que ocurra es necesario imponer una carga cíclica no drenada que genere un aumento en la presión de poro y disminuya la presión de confinamiento hasta acercarse a cero, lo que provoca que las trayectorias de esfuerzos se acerquen a la línea de transformación de estado último y las deformaciones aumenten drásticamente (Asenjo, 2010).

2.4. TEORÍA DEL ESTADO CRÍTICO

2.4.1. Relación de vacío crítico

En su trabajo pionero sobre la resistencia al corte de los suelos Casagrande (1936) realizó ensayos de corte directo drenado y observó que las arenas sueltas se contraían y las arenas densas se dilataban hasta aproximadamente la misma relación de vacío para grandes deformaciones, al que denominó relación de vacío crítico (ver Figura 2.14).

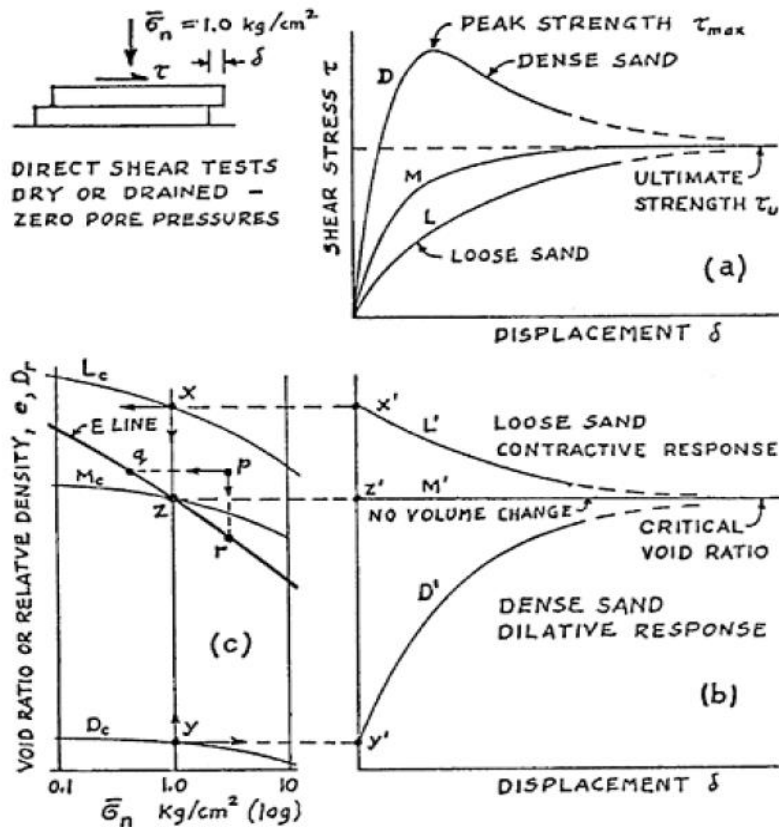


Figura 2.14 Hipótesis temprana de la relación de vacío crítico de las pruebas de corte directo. (a) Esfuerzo corte vs. desplazamiento, (b) relación de vacío vs. desplazamiento y (c) relación de vacío vs. esfuerzo normal. Fuente: Casagrande, 1975.

2.4.2. Estado crítico del suelo

Gonzalo Castro (1969) realizó una serie de pruebas triaxiales no drenadas, bajo condiciones de carga controlada. Se observaron tres tipos de comportamientos de esfuerzo - deformación para muestras anisotrópicamente consolidadas como se muestra en la Figura 2.15. La muestra A (muestras muy sueltas) alcanzó una resistencia máxima no drenada a una pequeña deformación, luego rápidamente la resistencia cae con una disminución significativa en la presión efectiva de confinamiento a grandes deformaciones, este tipo de comportamiento ahora conocido como licuación por flujo se describió en ese momento como licuación. Mientras tanto, la muestra B (muestras densas) inicialmente se contrajo para luego dilatar, con un incremento sustancial en la presión de confinamiento efectiva, alcanzando una gran deformación y resistencia. Por otro lado, la muestra C (muestras a densidades intermedias) alcanza una resistencia máxima a baja deformación seguida de un comportamiento limitado de ablandamiento de la resistencia al corte, para luego comenzar a dilatar aumentando nuevamente la

resistencia al corte con un aumento en la presión de confinamiento efectiva, este comportamiento contractivo a dilatador ocurre en el punto de transformación de fase (Ishihara et al., 1975), este comportamiento fue denominado licuación limitada.

Los resultados de los ensayos de Castro también mostraron una relación única entre la relación de vacío y la presión de confinamiento efectiva a grandes deformaciones denominando a dicha relación línea de estado estable (SSL), actualmente llamada curva de estado crítico (CSL) (Been et al., 1991). Posteriormente se definió el estado estable de deformación o estado crítico como el estado en el que el suelo se deforma continuamente bajo un esfuerzo cortante y presión de confinamiento efectiva constantes a volumen y velocidad constantes (Castro & Poulos, 1977; Poulos, 1981).

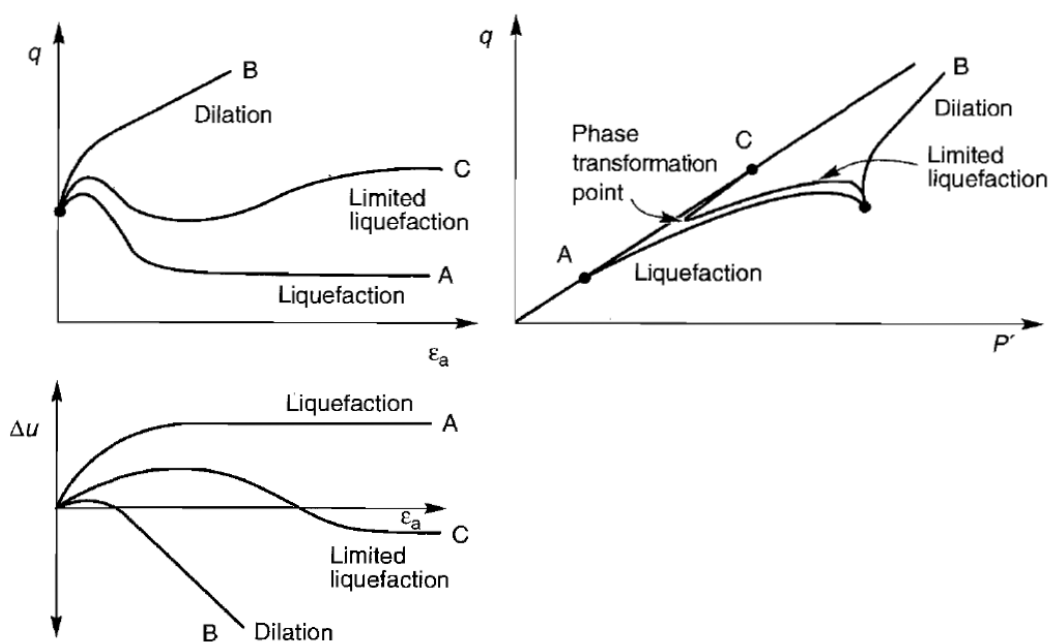


Figura 2.15 Comportamiento típico de ensayos triaxiales no drenados realizados por Castro (1969). Fuente: Kramer, 1996.

2.4.3. Curva de estado crítico (CSL)

La curva de estado crítico es aquel lugar geométrico de puntos que describe la relación entre la relación de vacío y la presión de confinamiento efectiva en el estado crítico. Así mismo, la CSL sirve para identificar las condiciones bajo las cuales un suelo en particular puede ser o no susceptible a la licuación por flujo, es decir, los suelos con relación de vacíos inicial que se encuentran por debajo de la CSL no son susceptibles, mientras que los suelos cuya relación de vacíos se

encuentran por encima de la CSL serán susceptibles solo si el esfuerzo cortante estático excede a su resistencia residual (Kramer, 1996). Ver Figura 2.16.

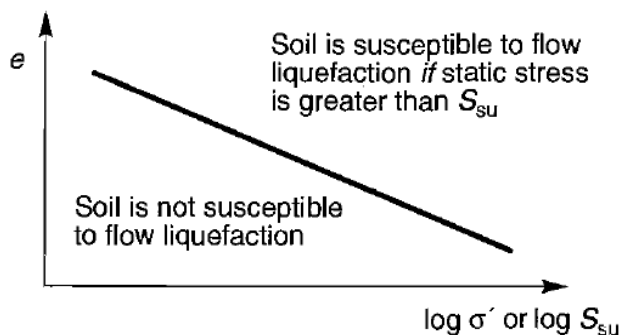


Figura 2.16 Curva de estado crítico o línea de estado de estable, criterio de estado para la susceptibilidad de licuación por flujo. Fuente: Kramer, 1996.

El SSL o CSL en su formal general es una curva tridimensional en el espacio $e - \sigma' - \tau$ o $e - p' - q$ como se muestra en la Figura 2.17, y usualmente es representada por sus proyecciones en los planos $e - \tau$ (relación de vacío - esfuerzo cortante), $e - \sigma'$ (relación de vacío - esfuerzo normal efectivo) y $\tau - \sigma'$ (esfuerzo cortante -esfuerzo normal efectivo). Además, se puede representar utilizando los parámetros de trayectoria de esfuerzos p' y q .

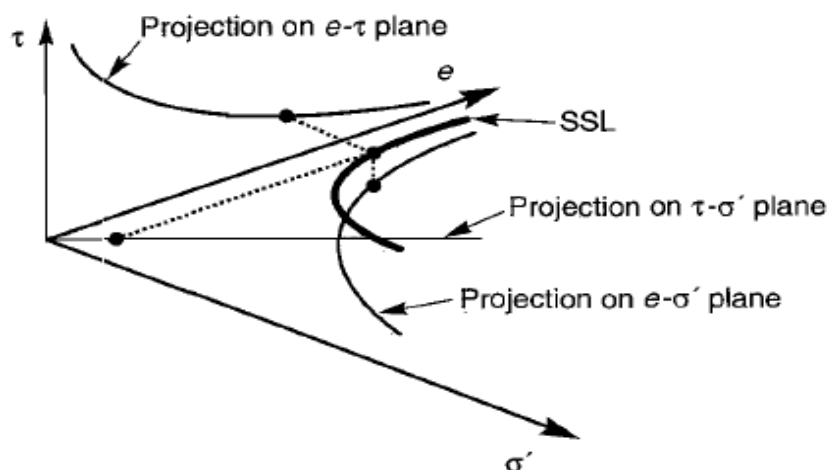


Figura 2.17 Representación de la CSL o SSL en el espacio $e - \sigma' - \tau$ y sus proyecciones en los planos $e - \tau$, $e - \sigma'$ y $\tau - \sigma'$. Fuente: Kramer, 1996.

2.4.4. Parámetro de estado (ψ)

La curva de estado crítico ilustra una aplicabilidad limitada de las medidas absolutas de densidad, como la relación de vacíos y la densidad relativa para la caracterización de un suelo potencialmente licuable, en otras palabras, una

muestra de suelo con una relación de vacío particular puede ser susceptible a la licuación por flujo bajo una presión de confinamiento efectiva alta, pero no susceptible a una presión de confinamiento efectiva baja. Por ejemplo, en la Figura 2.18 se muestra tres ensayos triaxiales no drenados de una arena Kogyuk, los cuales se observa que el ensayo 37 y 103 presentan la misma relación de vacío y densidad relativa, sin embargo, presentan diferentes comportamientos. Una se dilata presentando un parámetro de estado negativo, mientras la otra se contrae y presenta un parámetro de estado positivo. También se observa que los ensayos 103 y 108 a pesar de que presentan diferentes relaciones de vacío y densidad relativa tienen el mismo comportamiento dilatante con un parámetro de estado negativo.

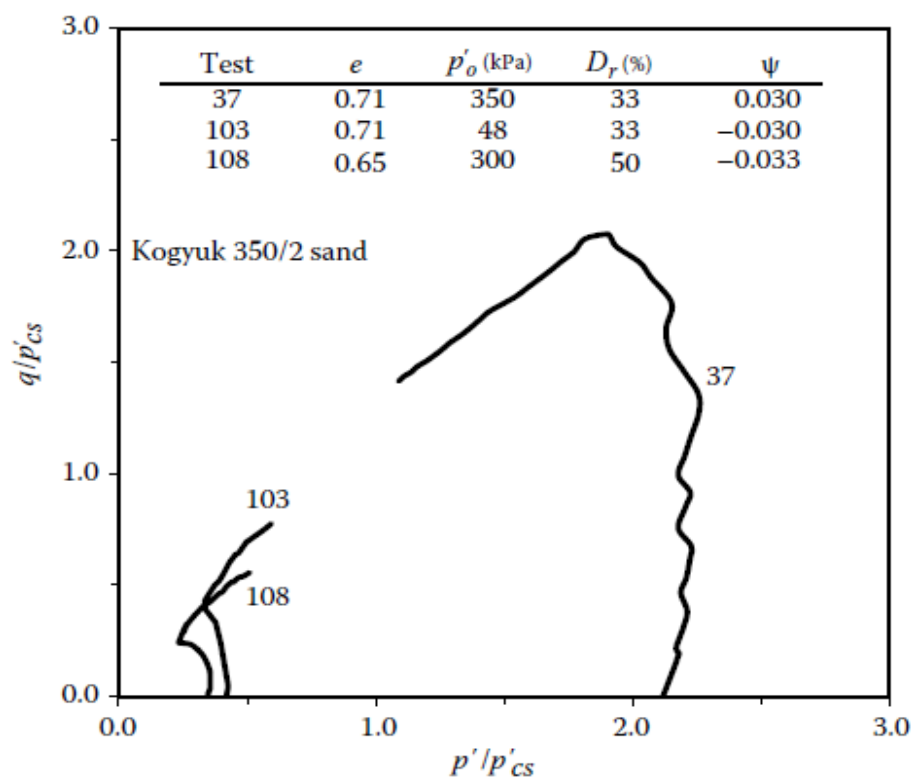


Figura 2.18 Comparación del comportamiento de la arena en función de la densidad relativa y el parámetro de estado para las arenas Kogyuk 350/2. Fuente: Jefferies y Been, 2015

Por lo expuesto, Been & Jefferies (1985) proponen y definen el parámetro de estado como la diferencia de la relación de vacío en el estado inicial o actual respecto a la relación de vacío en el estado crítico para una determinada presión de confinamiento efectiva como se muestra en la siguiente expresión (ver Figura 2.19).

$$\psi = e - e_c \quad (2.8)$$

Donde: e es la relación de vacío actual y e_c es la relación de vacío en el estado crítico, ambas para una presión de confinamiento efectiva de interés.

El parámetro de estado permitirá un mejor análisis de la susceptibilidad a la licuación, ya que cuando el parámetro de estado resulta positivo, el suelo exhibe un comportamiento de contracción y puede ser susceptible a la licuación por flujo. Mientras que cuando resulta negativo se producirá un comportamiento dilatador y el suelo no resulta susceptible a la licuación por flujo.

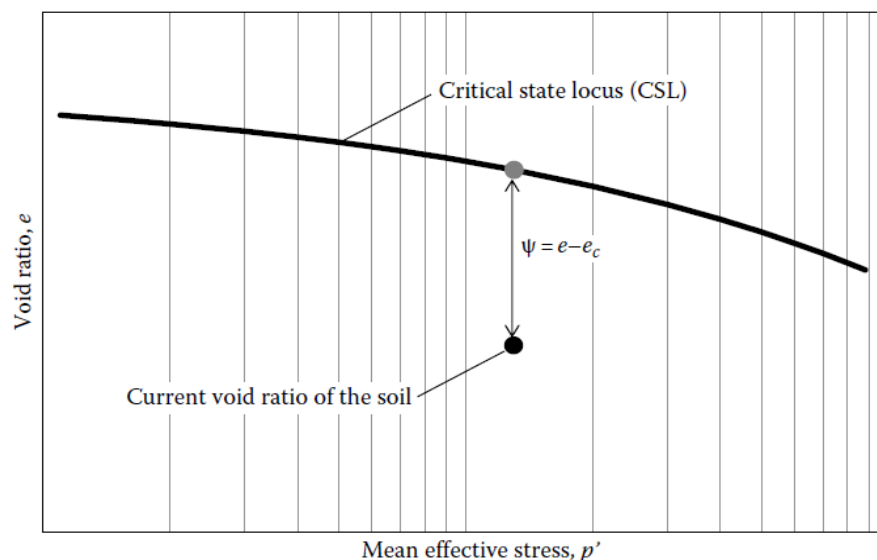


Figura 2.19 Definición del parámetro de estado ψ . Fuente: Jefferies y Been, 2015

2.4.5. Lineamientos básicos de la teoría del estado crítico

Como se mencionó anteriormente en esta presente investigación usaremos el diagrama p-q de Cambridge para representar las trayectorias de esfuerzo del material en estudio que resulta de un ensayo de compresión triaxial isotrópico. La representación gráfica de p-q en los ejes cartesianos ortogonales se representa de la siguiente manera.

En el eje de las ordenadas tenemos el esfuerzo desviador:

$$q = \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

En el eje de las abscisas el esfuerzo normal promedio efectivo:

$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$p' = \frac{1}{3}((\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{\sigma_d}{3} + \sigma_3$$

$$p' = \frac{q}{3} + \sigma_3$$

A continuación, se describe las trayectorias de esfuerzo para una condición drenado y no drenado.

2.4.5.1. Trayectoria de esfuerzo en ensayos triaxiales drenados

Cuando se ejecuta un ensayo triaxial consolidado drenado con medición de cambio de volumen se tiene presiones de poros iguales a cero ($u = 0$). Por lo tanto, en la gráfica $p' - q$ la variación p' sigue la recta de pendiente 1/3, ya que al ser $u = 0$ los puntos que conforman el camino de esfuerzos efectivos se alinean sobre una recta teniendo en cuenta la ecuación 2.9 (ver Figura 2.20).

$$p' = \frac{q}{3} + \sigma_3 - u \tag{2.9}$$

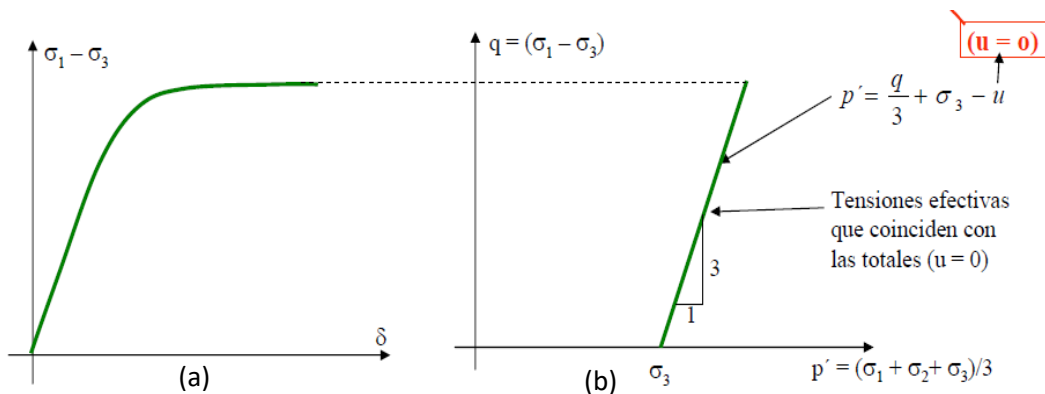


Figura 2.20 Trayectorias de esfuerzos para ensayos triaxiales drenados. (a) Gráfica esfuerzo desviador vs deformación axial. (b) Gráfica trayectoria de esfuerzo para una condición consolidada drenado. Fuente: José (s.f.).

2.4.5.2. Trayectoria de esfuerzo en ensayos triaxiales no drenados

Al ejecutar un ensayo triaxial consolidado no drenado con medición de presiones neutras se presentan presiones poros distintas de cero ($u \neq 0$), tal como se observa en la Figura 2.21(a). Por lo tanto, en la gráfica de $p' - q$ la variación de p' no sigue la recta de pendiente 1/3, ya que al ser $u \neq 0$ los puntos que conforman el camino de los esfuerzos efectivos son el resultado de la recta de pendiente 1/3 menos los valores de u , como se muestra en la Figura 2.21(b).

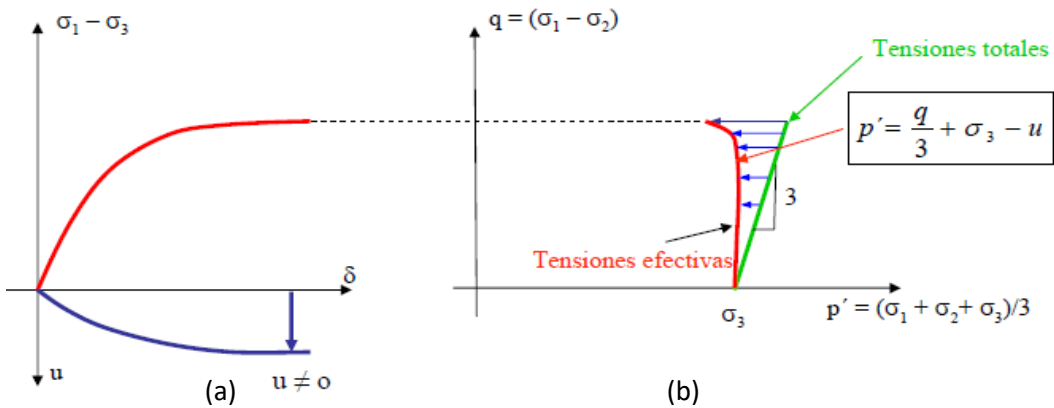


Figura 2.21 Trayectoria de esfuerzos para ensayos triaxiales no drenados. (a) Gráfica de esfuerzo desviador y variación de la presión de poros con la deformación axial. (b) Gráfica de trayectoria de esfuerzo para una condición consolidado no drenado. Fuente: José (s.f.).

En la Figura 2.22 se muestra la trayectoria de esfuerzos para un ensayo compresión triaxial consolidado isotrópicamente en condición drenado y no drenado. Los puntos de falla o críticos en términos de presiones efectivas se alinean según una recta que pasa por el origen de coordenadas y tiene una pendiente M que se denomina línea de estado crítico (CSL)

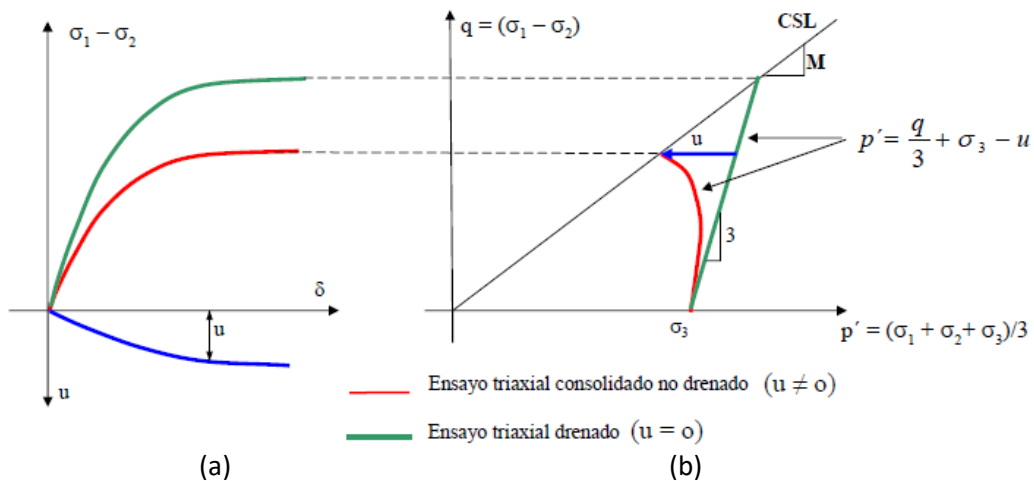


Figura 2.22 Trayectorias de esfuerzos para la condición drenada y no drenada. (a) Gráfica de esfuerzo desviador y variación de la presión de poros con la deformación axial para una condición drenado y no drenado. (b) Gráfica de trayectoria de esfuerzo para una condición consolidado drenado y no drenado. Fuente: José (s.f.).

Además, en la Figura 2.23 se presenta la CSL en los planos $p'-q$ y $p'-e$ de un ensayo triaxial consolidado drenado para diferentes presiones de confinamiento. En la Figura 2.23(a) se observa que los valores iniciales de los esfuerzos efectivos $(\sigma_{3,1}, \sigma_{3,2}, \sigma_{3,3})$ se incrementan durante el ensayo hasta alcanzar la línea del

estado crítico. Y en la Figura 2.23(b) se observa los cambios de volumen, donde los puntos A_1, A_2, A_3 representan los volúmenes o relación de vacío iniciales después de consolidar para cada presión de confinamiento, estos puntos conforman la curva normal de consolidación (NCL del inglés *normal consolidation line*), y los puntos C_1, C_2, C_3 representan los valores finales o críticos de volumen del espécimen.

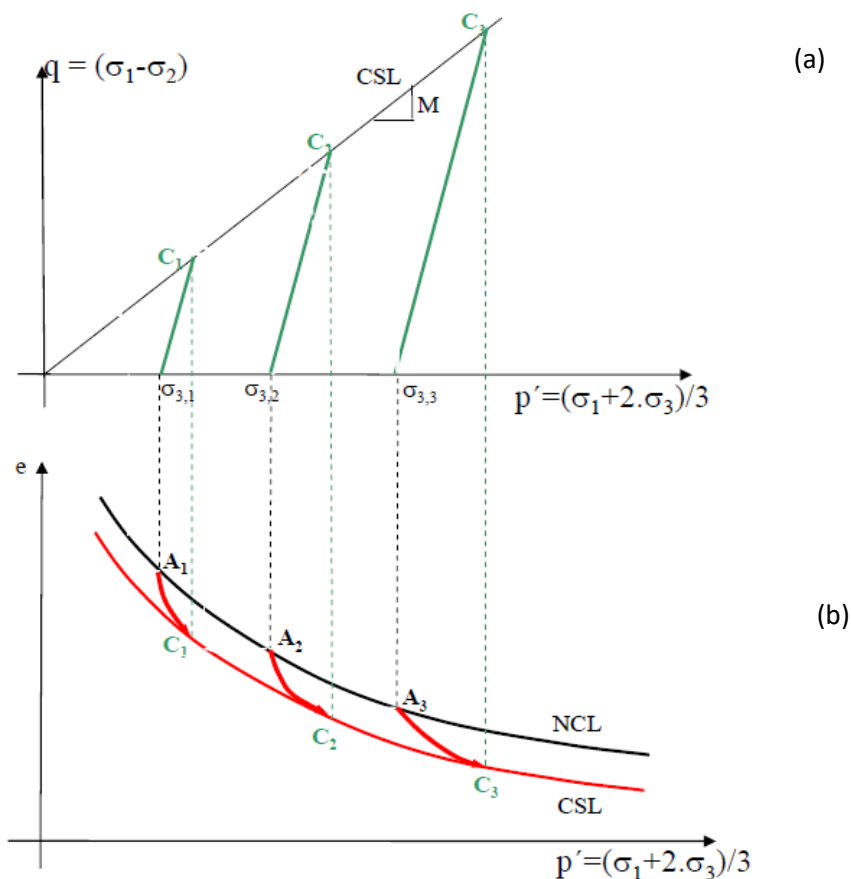


Figura 2.23 Curva de estado crítico en los planos $p'-q$ y $p'-e$ para condiciones drenadas. (a) Gráfica de trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado drenado para diferentes presiones de confinamiento. (b) Gráfica de relación de vacío vs esfuerzo promedio efectivo, definiendo la curva NCL para un estado inicial y la curva CSL para un estado crítico. Fuente: José (s.f.).

Asimismo, en la Figura 2.24(a) se muestra las trayectorias de esfuerzos de un ensayo triaxial consolidado no drenado para diferentes presiones de confinamiento. Se sabe que en estos ensayos no se presentan cambios volumétricos, es decir, los valores de la relación de vacíos e_1, e_2, e_3 se mantienen constantes (ver Figura 24(b)). Los puntos A_1, A_2, A_3 representan el estado inicial después de consolidar y se trasladan hacia los puntos B_1, B_2, B_3 siguiendo una

línea horizontal hacia la izquierda, debido a que el esfuerzo efectivo (p') disminuye por el incremento de las presiones de poros.

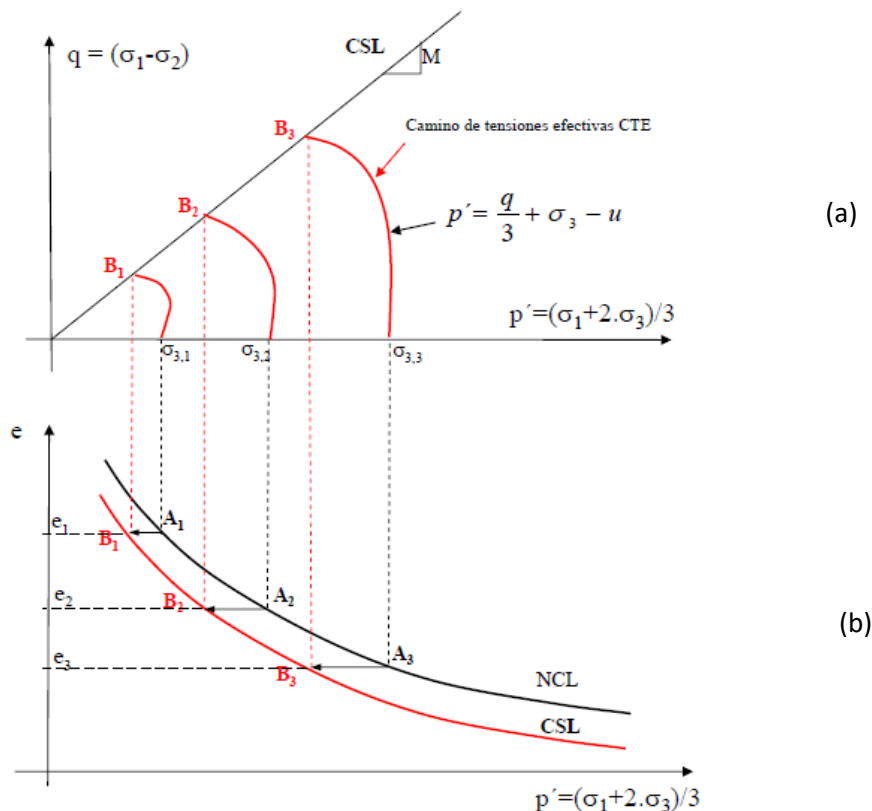


Figura 2.24 Curva de estado crítico en los planos p' - q y p' - e para condiciones no drenadas. (a) Gráfica de trayectorias de esfuerzos para un ensayo triaxial consolidado no drenado para diferentes presiones de confinamiento. (b) Gráfica de relación de vacío vs esfuerzo promedio efectivo, definiendo la curva NCL para un estado inicial y la curva CSL para un estado crítico. Fuente: José (s.f.).

Es común en la geotecnia que la curva de estado crítico en el plano $e - p'$ se represente en escala semi logarítmico como se muestra en la Figura 2.25(b), dando como resultado una recta definida por la siguiente ecuación.

$$e_c = \Gamma - \lambda \ln(p'_c) \quad (2.10)$$

Donde Γ y λ son parámetros que definen la curva de estado crítico. El subíndice "c" denota condiciones críticas del estado.

Se debe tener en cuenta que la ecuación 2.10 expresada en logaritmo natural es usada para modelos constitutivos y expresada en logaritmo de base diez, como la ecuación 2.11, se usa para trazar datos experimentales (Jefferies y Been, 2015).

$$e_c = \Gamma - 2.303\lambda \cdot \log(p'_c) \quad (2.11)$$

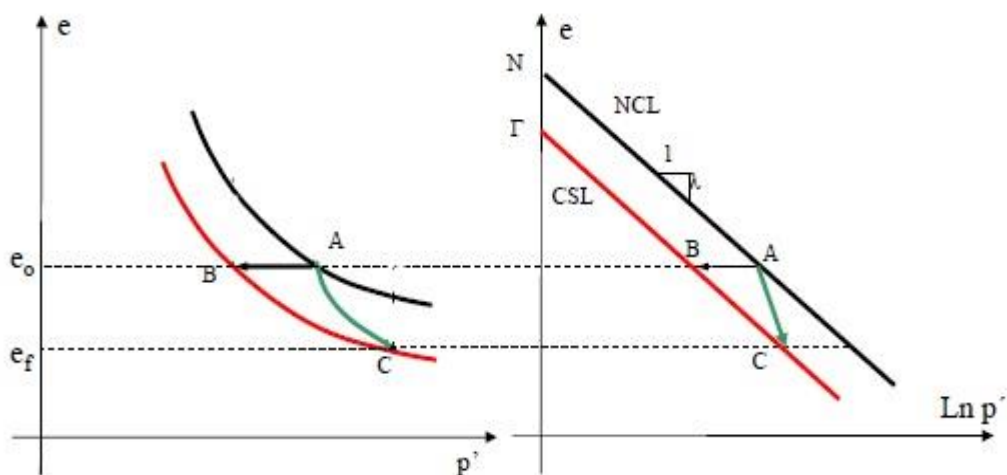


Figura 2.25 Curva de estado crítico en el plano p' - e . a) Gráfica de la CSL en el plano relación de vacío vs esfuerzo de promedio efectivo. (b) Gráfica de la CSL en el plano e - p' en escala semilogarítmica. Fuente: José (s.f.).

2.4.6. Determinación de la curva de estado crítico.

El estado del arte y la experiencia indica que el método usado y preferido para determinar la curva del estado crítico es mediante una serie de ensayos de compresión triaxial en muestras sueltas, o generalmente más sueltas que el estado crítico. De los ensayos triaxiales se opta por los ensayos sin drenaje por la razón práctica de que las deformaciones requeridas para alcanzar el estado crítico están dentro de los límites del equipo triaxial estándar para muestras sueltas, asimismo, porque a pequeñas deformaciones se produce grandes cambios en la presión de poros; por lo tanto, las muestras no drenadas pueden cambiar de estado con rapidez, es decir, alcanzar el estado crítico. No obstante, es complicado obtener datos sobre la CSL para presiones efectivas de $p' > 200 \text{ kPa}$ aproximadamente con ensayos sin drenaje, ya que sería necesario consolidar las muestras a presiones mayores que $p' > 2 \text{ MPa}$ antes del corte, la aplicación de altas presiones resulta inconveniente para muchos equipos triaxiales comerciales y aparte que puede implicar efectos de trituración de granos (Jefferies y Been, 2015).

Por lo tanto, se recomienda realizar ensayos triaxiales drenados y no drenados en muestras sueltas a deformaciones de 20 % como mínimo para estimar la curva de estado crítico. Cabe recalcar que, el objetivo de estos ensayos es determinar con precisión tanto la relación de vacíos y esfuerzo promedio efectivo en el estado crítico, esto implica determinar la variación volumétrica del espécimen en la etapa

de saturación, consolidación y corte. En la siguiente ecuación se muestra los cambios de volumen del espécimen durante todo el proceso del ensayo triaxial.

$$V_f = V_0 + \Delta V_T \quad (2.12)$$

Donde: V_0 es el volumen inicial después de reconstituir la muestra, V_f es el volumen final que se usa para calcular la relación de vacío en el estado crítico y ΔV_T es el cambio de volumen total que combina diferentes cambios durante la saturación, consolidación y corte de la siguiente manera:

$$\Delta V_T = \Delta V_{sat} + \Delta V_{cons.} + \Delta V_{corte} \quad (2.13)$$

Donde: ΔV_{sat} es el cambio de volumen incremental durante la saturación, incluido el enjuague de muestra y la presurización inversa, $\Delta V_{cons.}$ es el cambio de volumen durante la consolidación y ΔV_{corte} es el cambio de volumen incremental durante el corte, tener en cuenta que, para ensayos no drenados ΔV_{corte} será cero.

De la ecuación 2.13 las variaciones volumétricas de consolidación y corte se miden directamente del proceso del ensayo triaxial, no obstante, la medición de la variación volumétrica en la etapa de saturación es difícil de obtener directamente del ensayo triaxial, complicando el cálculo del volumen final del espécimen y; en consecuencia, la relación de vacío en el estado crítico. Las investigaciones de Sladen y Handford (1987) muestra cuán significativos pueden ser los errores si se ignora el cambio de volumen durante la saturación como se muestra la Figura 2.26

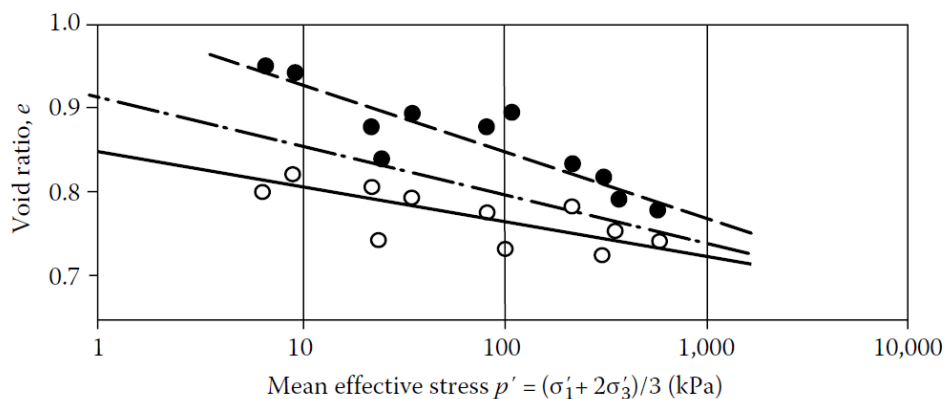


Figura 2.26 Error potencial en la relación de vacío sino se consideran los cambios de volumen durante la saturación. Círculos rellenos no considera cambio de volumen, mientras que, los círculos abiertos representan la relación de vacíos medidos en muestras congeladas después del ensayo triaxial y la línea intermedia representa el cambio de volumen midiendo la deformación axial y considerando un comportamiento isotrópico. Fuente: Sladen y Handford, 1987.

Por lo expuesto, en esta tesis se opta por el procedimiento de congelamiento de las muestras de relave al final del ensayo triaxial para determinar el volumen final

con mejor precisión y calcular la relación de vacío en el estado final (estado crítico). Para tal fin, se realizó algunas modificaciones a la celda triaxial el cual se detalla en el capítulo III.

Respecto a los resultados del proceso experimental se plasman en las siguientes gráficas: en los ensayos triaxiales no drenados se presenta las gráficas de $\sigma_d - \varepsilon$ (esfuerzo desviador – deformación axial), $\Delta u - \varepsilon$ (variación de presión de poros – deformación axial) y la gráfica $q - p'$ de trayectoria de esfuerzos efectivos. Mientras que en los ensayos triaxiales drenados se presentan las gráficas de $\sigma_d - \varepsilon$ (esfuerzo desviador – deformación axial) y $\varepsilon_v - \varepsilon$ (deformación volumétrica – deformación axial) y la gráfica $q - p'$ de trayectoria de esfuerzos efectivos. Las gráficas mencionadas anteriormente permitirán visualizar si las muestras de relave preparadas llegan alcanzar el estado crítico. Cuando esto sucede, se procede a graficar las relaciones de vacíos con su determinada presión de confinamiento efectiva alcanzado al final del ensayo, generando así la curva de estado crítico. En el capítulo III se describe con más detalle el procedimiento experimental y el procesamiento de los datos para determinar la curva de estado crítico para relaves.

Por otro lado, es importante mencionar que una muestra en general puede alcanzar el estado crítico sin importar las condiciones iniciales que presenta, es decir, en una condición inicial suelta (contractiva) o en una condición densa (dilatante). Sin embargo, se recomienda realizar ensayos en muestras de suelo a densidades bajas (condición suelta) por las facilidades de alcanzar el estado crítico como ya se había mencionado líneas arriba, más no se recomienda realizar ensayos en muestras densas debido a que en condiciones drenadas por corte pueden desarrollar bandas de corte con deformación y cambios de volumen que ocurren a lo largo de zonas de localización compleja (Desrues et al., 1996). La evidencia experimental presentada por Desrues et al.(1996) usando tomografía computarizada indica que la relación de vacíos dentro de la zona de corte tiende hacia el estado crítico y que la relación de vacío local es mayor que el promedio global medido convencionalmente en el laboratorio utilizando el volumen del espécimen, en otras palabras, la curva de estado crítico obtenida mediante muestras sueltas no se alcanza con suelos densos, debido a que en las muestras sueltas no se forma planos de corte y no tienen la tendencia a la localización que es usual en muestras densas.

2.4.7. Superficie de licuación por flujo

La superficie de licuación por flujo (FLS del inglés *Flow Liquefaction Surface*) marca el límite entre el estado estable e inestable de la resistencia cortante no drenado de una muestra de suelo con comportamiento de ablandamiento, es decir, si las condiciones de esfuerzo del suelo alcanzan la FLS en condiciones no drenadas ya sea por carga monótonica o cíclica, se activará la licuación por flujo y la resistencia cortante se reducirá a la resistencia de estado crítico. Geométricamente la FLS está representada por una recta en el espacio de la trayectoria de esfuerzo, dicha recta está conformada por puntos que representan el esfuerzo desviador máximo alcanzado por la muestra de suelo para cada presión de confinamiento efectivo (Kramer, 1996) (ver Figura 2.27 y 2.28).

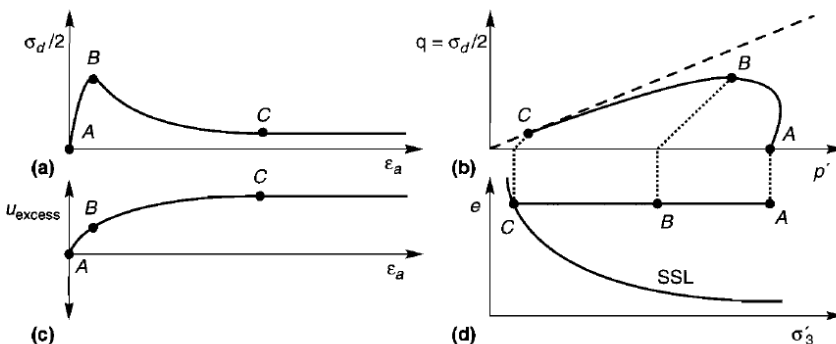


Figura 2.27 Respuesta del ensayo triaxial isotrópico consolidado no drenado de arena suelta y saturada. (a) curva de esfuerzo-deformación; (b) trayectoria de esfuerzo efectivo; (c) exceso de presión de poro; (d) Curva de estado crítico. Fuente (Kramer, 1996).

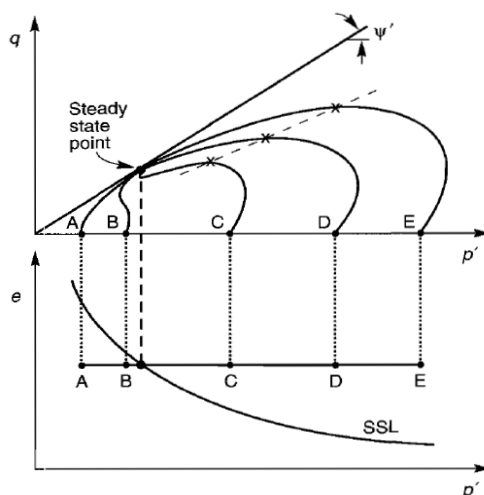


Figura 2.28 Respuesta de cinco especímenes isotrópicos consolidados a la misma relación de vacío inicial a diferentes presiones de confinamiento efectivas iniciales. La licuación de flujo en las muestras C, D y E se inicia en los puntos marcados con una x. La línea de puntos que pasa por estos puntos es una línea de relación de esfuerzo efectiva principal constante llamada superficie de licuación por flujo (FLS). Fuente (Kramer, 1996).

2.5. RELAVE

2.5.1. Definición del relave

Los relaves son desechos o residuos que se generan de la extracción del mineral y están constituidos por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga. En todo proyecto de extracción minera se generan estos residuos los cuales se deben depositar en algún lugar, dada esta necesidad es que se origina la construcción de los depósitos o presas de relaves mineros para albergar todos los desechos que se producen en el proceso de extracción del mineral (Reinoso G. & Olalla M., 2017).

2.5.2. Relave cicloneado

Es la fracción arenosa de los relaves obtenida del proceso de clasificación granulométrica mediante un equipo mecánico llamado ciclón, gracias a su geometría de este equipo se aprovecha la fuerza centrífuga para separar las partículas más gruesas

2.6. DEPÓSITOS O PRESAS DE RELAVES

Los depósitos se construyen para retener los residuos mineros que se originan de su explotación. Esta estructura presenta dos partes importantes: el vaso y el dique (Ver Figura 2.29. El dique del depósito suele construirse con suelos naturales (relleno estructural) extraídos de una cantera, sin embargo, también se usa el material grueso o arenoso del proceso de cicloneado mediante el uso de ciclones en la cresta, depositándose la parte gruesa al dique y lo fino al vaso.

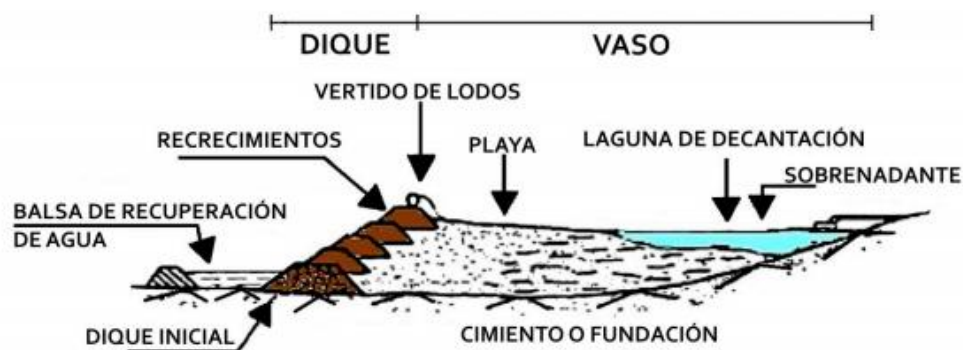


Figura 2.29 Esquema básico de la estructura de una presa de relaves. Fuente: Modificado de IGME (1986).

Existen tres métodos fundamentales de construcción de las presas de residuos de acuerdo con el recrecimiento del dique de retención, estos son: aguas arriba,

aguas abajo y línea central (ver Figura 2.30). Estas denominaciones hacen referencia a la dirección en que la cresta del recrecimiento del dique de contención se mueve respecto al dique inicial, a medida que la estructura aumenta de altura.

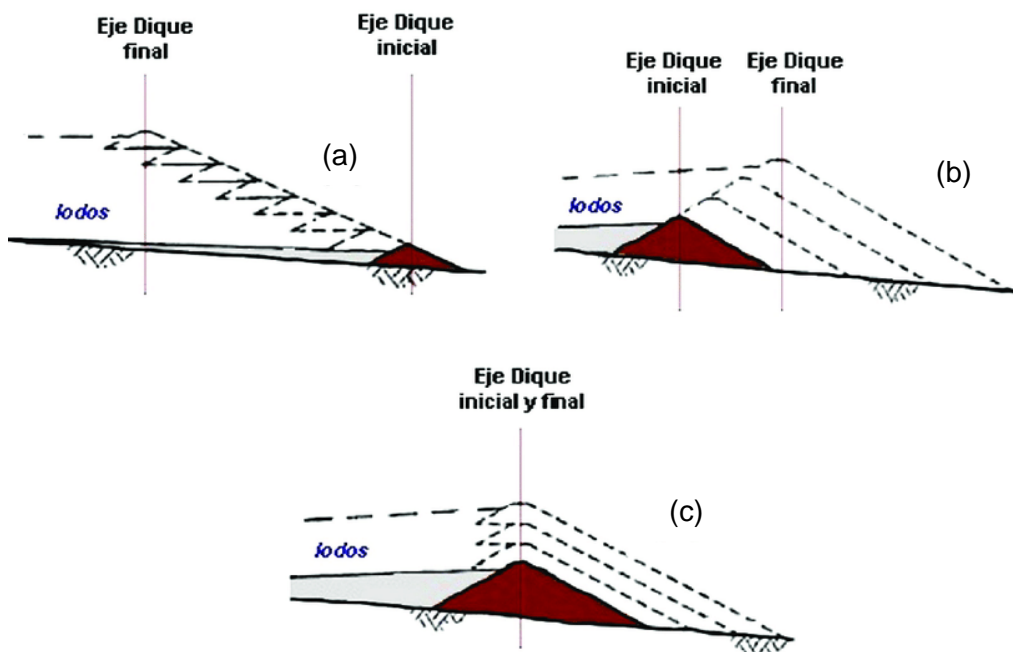


Figura 2.30 Tipologías de presas mineras construidas mediante relleno hidráulico con los propios residuos en función del sistema de recrecimiento. a) Aguas arriba, b) Aguas abajo, c) Línea central. Fuente: Modificado de (Junghans & Helling, 1998)

El método de aguas arriba (*upstream*) consiste en levantar diques sucesivos, cada uno de ellos ligeramente retranqueado respecto al anterior (IGME, 1986). Los diques construidos mediante el método de aguas arriba son los más propensos a sufrir deslizamientos con superficie de rotura en el propio dique, así como procesos de licuación, tubificación y erosión por sobrepaso; además, respecto a los otros métodos de recrecimiento con residuos mineros presenta una menor capacidad de almacenamiento y una alta susceptibilidad a la licuación ante solicitaciones sísmicas. Existe una sugerencia general de que en áreas sísmicas no se debería usar dicho método de construcción (ICOLD & UNEP, 2001; USEPA, 1994; Vick, 1990) estando actualmente prohibido su empleo en países como Chile, Perú, Argentina y México. Por otro lado, el método de aguas abajo (*downstream*) se llama así porque las fases sucesivas de la construcción del dique se apoyan en la parte superior del talud situado en la posición de aguas abajo con respecto a la fase anterior, cambiando la línea central de la parte superior de la presa. El espesor del muro de contención en su base aumenta con la altura por lo que este tipo de diques suelen ser más estables debido a su gran anchura, y por apoyarse

además directamente sobre el sustrato (Junghans & Helling, 1998). El método de aguas abajo ofrece un grado de estabilidad que no es posible obtener mediante el método de construcción aguas arriba, por la posibilidad de compactación y la facilidad para incorporar drenajes que faciliten la depresión del nivel freático, siendo habitual la impermeabilización de la cara del muro de la presa que está en contacto con el depósito. Así mismo, el método de línea central combina algunas de las ventajas de los otros métodos (con una mejor estabilidad sísmica que el método aguas arriba y con menos requerimientos de volumen de material en los recrecimientos respecto al sistema de aguas abajo). Los sucesivos recrecimientos del dique arrancan desde el eje del dique inicial, extendiéndose aguas abajo, pero manteniéndose en el mismo vertical que al comienzo de la construcción del depósito

2.6.1. Casos de fallas de presas de relaves en el mundo

Con el paso del tiempo se han registrado números fallas de presas por licuación, ya sea por carga estática o dinámica, o en general por condiciones de resistencia no drenada. Tales como, la presa Fort Peck Dam-EE. UU (1938), El Cobre-Chile (1965), San Fernando-EE. UU (1971), Merriespruit-Sudáfrica (1994), TVA Kingston-EE. UU (2008), Louyang- China (2016), Mount Polley-Canada (2014), Fundao-Brasil (2015), Cadia-Australia (2018) y recientemente Brumadinho-Brasil (2019). Estos sucesos causaron muchas pérdidas de vidas humanas, materiales y un impacto negativo en el medio ambiente (World Information Service on Energy, 2020). A continuación, se describe cada una de ellas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales casos de falla de presas de relaves en el mundo

Fecha	Nombre/ Localización	Mineral	Tipo de falla	Consecuencias
1938(*)	Fort Peck EE. UU	Agua	Licuación por flujo generado por una carga estática.	Alrededor de 7.5 millones de m ³ de material estuvieron involucrados en la falla y ocho personas perdieron la vida.
1965	El Cobre Chile	Cobre	Licuación durante el terremoto.	Los relaves recorrieron 12 km río abajo, destruyeron el pueblo de El Cobre y mataron a más de 200 personas, 350,000 m ³ de relaves movilizados.

Fecha	Nombre/ Localización	Mineral	Tipo de falla	Consecuencias
1971(*)	Bajo San Fernando EE. UU	Agua	Licuación por flujo generada por carga sísmica.	El terremoto de San Fernando de 1971 provocó un deslizamiento de los 30 pies superiores de la presa. Ante la posibilidad de falla de la presa por completo 80,000 personas serían afectadas por una inundación catastrófica, ya que estas vivían en un área de 6 millas de largo en el valle cerca de la presa.
1994	Merriespruit Sudáfrica	Oro	Ruptura por rebose después de fuertes lluvias, Licuación estática.	Los relaves fluyeron 4 km aguas abajo; 17 personas muertas; grandes pérdidas materiales en un municipio residencial. 600,000 m ³ de relaves movilizados.
2008	TVA Kingston EE. UU	Ceniza de carbón	Falla de la pared de retención	El deslizamiento de cenizas cubrió 1,6 kilómetros cuadrados con un espesor de 1,83 metros. La ola de ceniza y barro derribó líneas eléctricas, cubrió Swan Pond Road y rompió una línea de gas. Dañó 12 viviendas y hubo que rescatar a una persona, aunque nadie resultó gravemente herido. Se movilizó 4,1 millones de m ³ de lechada de cenizas.
2014	Mount Polley Canadá	Cobre, oro	Falla del terreno de cimentación, falla por condiciones de resistencia no drenada.	Flujo de relaves hacia lagos adyacentes; 7.3 millones de m ³ de relaves movilizados.
2015	Fundao Brasil	Hierro	Falla de la presa sobre su estribo izquierdo. Una capa de relaves finos presente dentro del embalse de relaves gruesos produjo una zona débil a lo largo de la cual se inició la falla.	Flujo total combinado de 62 millones de m ³ de relaves. La ola de relaves inundó la ciudad de Bento Rodrigues; al menos 17 personas muertas y dos desaparecidas; 158 viviendas destruidas; contaminación del océano Atlántico, del Río Gualaxo y del Río Doce.
2016	Louyang China	Bauxita /Aluminio	Falla de una presa de relaves de Aluminio debido a licuación estática por colocación de relaves filtrados sobre el depósito.	Pueblo totalmente sumergido en barro rojo, alrededor de 300 aldeanos evacuados y muchos animales murieron.

Fecha	Nombre/ Localización	Mineral	Tipo de falla	Consecuencias
2018	Cadia Australia	Oro, cobre	Falla de la presa de relaves, principalmente debido a la existencia de una capa de cimentación de baja densidad en las cercanías del asentamiento.	La falla del terraplén da como resultado un "avance limitado" de material de relaves desde el dique de relaves del norte al sur. El avance se ha contenido dentro de la presa de relaves del sur. Se movilizó 1,33 millones de m3 de relaves.
2019	Brumadinho Brasil	Hierro	Licuación por flujo debido a cargas estáticas.	La ola de relaves devastó la estación de carga de la mina, su área administrativa y dos cuencas de retención de sedimentos más pequeñas (B4 y B4A); luego viajó aprox. 7 km cuesta abajo hasta llegar a Río Paraopeba, destruyendo así un puente del ramal ferroviario de la mina y extendiéndose a partes de la comunidad local Vila Ferteco, cerca de la ciudad de Brumadinho; la lechada fue luego llevada más lejos por el río Paraopeba; 259 personas murieron y 11 están desaparecidas.

Fuente: Adaptado de WISE. Chronology of major tailings dam failures - Online y Jefferies y Been (*) 2015.

Cabe recalcar que las presas Fort Peck y San Fernando no son presas de relaves, sino de retención de agua, sin embargo, se consideran dentro de la Tabla 2.1 porque son unas de las primeras evidencias de fallas debido a la licuación por flujo generado por carga estática y sísmica respectivamente. Por otro lado, la presa Mount Polley no presentó falla por licuación, no obstante, falló por condiciones de resistencia no drenada. Estos problemas de fallas similares siguen persistiendo en la actualidad pese a que existen antecedentes y eso se debe a la falta de entendimiento de la mecánica de suelo del estado crítico, esta teoría permitirá entender estos tipos de fallas y prevenirlas.

A continuación, se muestra algunas imágenes de las fallas de las presas mencionadas en la Tabla 2.1.

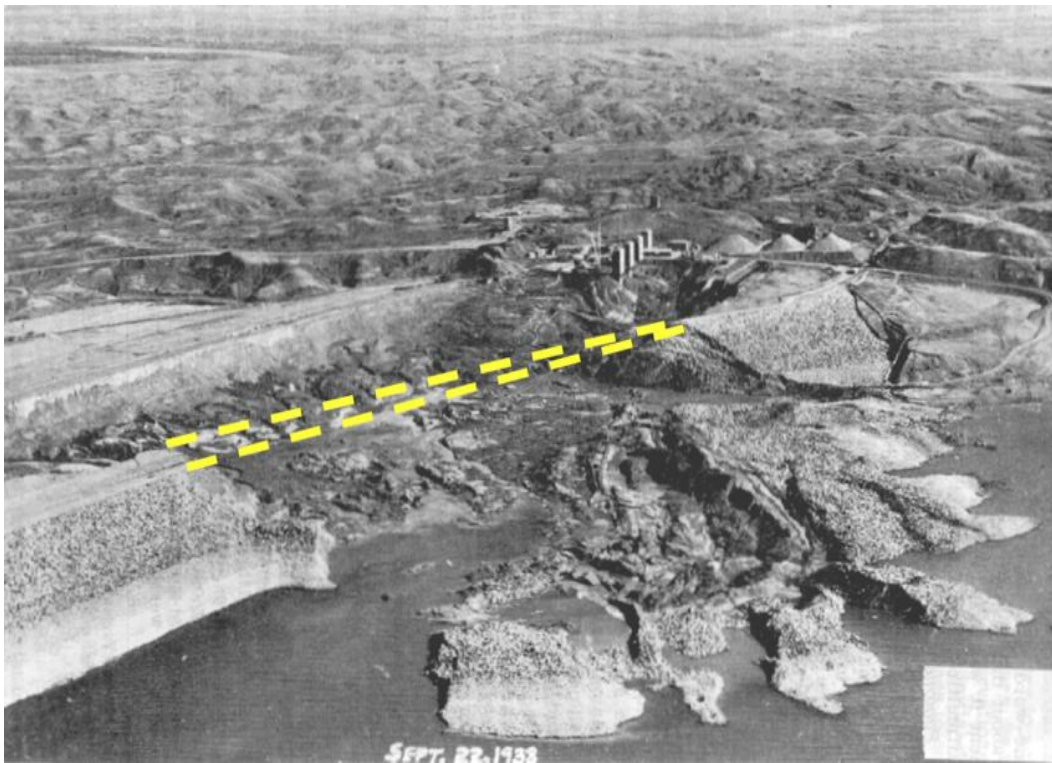


Figura 2.31 Vista aérea oblicua de la falla del talud aguas arriba cerca del estribo derecho de la presa Fort Peck-EE. UU (1938). Fuente: Adaptado de Redlinger et al., 2018.



Figura 2.32 Vista de la falla de la presa San Fernando-EE. UU (1971). Fuente: Adaptado de Civil and Environmental Engineerig (s.f.). Consultado el 07 de junio 2021. <https://cutt.ly/smrSzVe>



Figura 2.33 Vista de la falla de la presa Merriespruit-Sudáfrica (1994). Fuente: Adaptado de Minerals Council-South Africa (s.f.). Consultado el 07 de junio del 2021. <https://cutt.ly/tnmVeTi>



Figura 2.34 Vista de la falla de la presa Mount Polley-Canadá (2014). Fuente: Adaptado de The Bulletin (Marshall, 2018). *Tailings Dam Spills at Mount Polley and Mariana*. Consultado el 07 de junio del 2021 <https://cutt.ly/RbZn2a1>



Figura 2.35 Vista del flujo de material de relave debido a la falla de la presa Fundao-Brasil (2015). Fuente: Adaptado de Fondazione Stava 1985 (2019) *The Fundão tailings dams failure, 2015*. Consultado el 07 de junio del 2021. <https://cutt.ly/qmyalRw>



Figura 2.36 Vista del flujo de material de relave debido a la falla de la presa Brumadinho-Brasil (2019). Fuente: Adaptado de Jamasmie (2020). *La respuesta de los mineros al desastre de la presa de Brasil sigue siendo débil*. Consultado el 07 de junio del 2021. <https://cutt.ly/fmyoCxE>

2.7. APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE SUELOS EN ESTADO CRÍTICO PARA EL ESTUDIO DE LA LICUACIÓN

La mecánica de suelos en estado crítico proporciona un marco conceptual excelente para evaluar el comportamiento del suelo y entender los fenómenos que involucran la resistencia no drenada. El fenómeno más común es la licuación por flujo que puede generarse por carga estática o cíclica. La licuación por flujo es un problema de diseño importante para grandes estructuras de suelo, como depósitos de relaves de minas y presas de tierra, dado que, estas estructuras presentan un terreno inclinado y, por ende, están sujetos a esfuerzos cortantes estáticos. Existen muchos casos históricos en el mundo de licuación por flujo y fenómenos en general que tienen relación con la resistencia no drenada (algunas se mencionan en la Tabla 2.1), sin embargo, la ocurrencia de estos fenómenos persiste en la actualidad, por ejemplo, la falla de la presa Brumadinho en Brasil (2019).

Dada esta problemática, se viene estudiando y desarrollando investigaciones con enfoque a la mecánica de estado crítico. Una de ellas es la determinación de la curva de estado crítico (CSL) mediante ensayos triaxiales, el cual es el objetivo de esta tesis. Como se menciona en el ítem 2.3.4 la curva de estado crítico nos permite identificar las condiciones de estado bajo las cuales un suelo puede ser susceptible o no a la licuación por flujo, es decir, si el estado inicial del suelo se ubica por debajo de la CSL presentará un comportamiento dilatante y un parámetro de estado negativo ($\psi < 0$), por ende, no será susceptible. Mientras que, si el estado inicial del suelo se encuentra por encima de la CSL presentará un comportamiento contractivo y un parámetro de estado positivo ($\psi > 0$), y será susceptible a licuación. No obstante, se debe considerar que Jefferies & Been, (2006) y Shuttle & Cuning (2007) sugieren que cuando un suelo tiene un parámetro de estado de $\psi > -0.05$ se puede esperar un ablandamiento por deformación y una pérdida de resistencia cortante no drenada.

Por otro lado, se han venido realizando investigaciones para estimar el estado del suelo mediante los resultados de los ensayos de penetración de cono (CPT) y evaluar la susceptibilidad a la pérdida de resistencia y la resistencia al corte residual no drenado bajo el enfoque de la teoría del estado crítico. Así bien, basado en el trabajo de Plewes et al. (1992), Jefferies & Been (2006) y Shuttle & Cuning (2007) y combinados con los resultados de las pruebas de muestras

congeladas de Robertson et al (2000), es posible identificar una zona en el gráfico de clasificación de tipo comportamiento del suelo (SBT) basado en parámetros de CPT normalizados (Q_{tn} y F_r) que representa el límite aproximado entre la respuesta dilatante y contractiva del suelo como se muestra en la Figura 2.37. En la parte inferior izquierda de la gráfica SBT se define a suelos que probablemente son susceptibles a un comportamiento contractivo y pérdida de resistencia cortante no drenada.

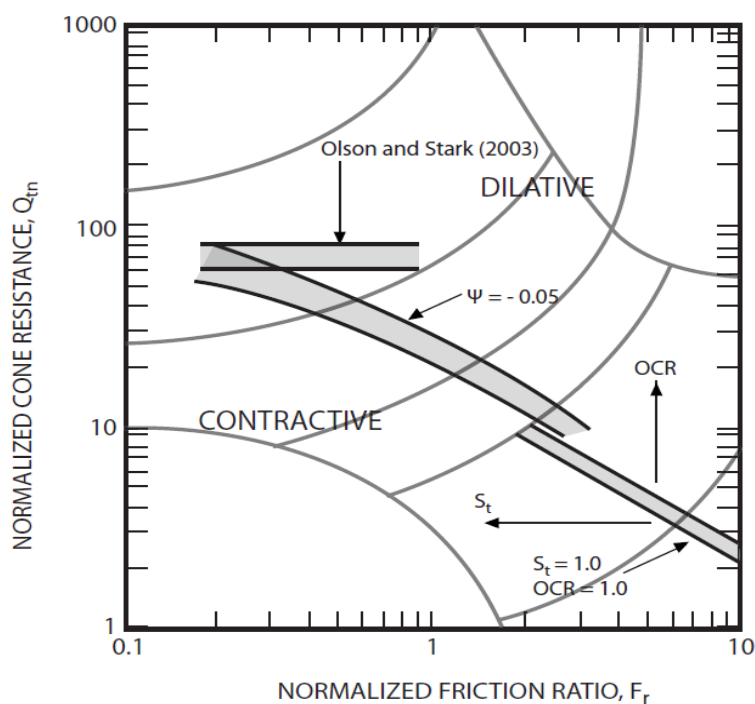


Figura 2.37 Límite aproximado entre la respuesta del suelo dilatante y contractivo utilizando parámetros CPT normalizados. Fuente: Robertson,2010.

Años más tarde, Robertson (2010) estimó una resistencia a la penetración equivalente de arena limpia ($Q_{tn,cs}$) mediante resultados de ensayos de CPT de algunos casos históricos que presentaron pérdida de resistencia (ver Figura 2.38). El contorno de $Q_{tn,cs} = 70$ captura los registros del historial de casos razonablemente bien y captura el cambio en la respuesta de CPT ya que los suelos varían desde arenas limpias hasta arcillas y limos suaves y sensibles. Por lo tanto, los suelos con un $Q_{tn,cs} > 70$ probablemente se dilatan y endurecen por deformación cortante no drenado consistente con el enfoque de parámetro de estado descrito por Jefferies & Been (2006), mientras que los suelos con un $Q_{tn,cs} \leq 70$ puede usarse para evaluar si es susceptible al ablandamiento por deformación cortante no drenado y, por tanto, susceptible a la licuación por flujo.

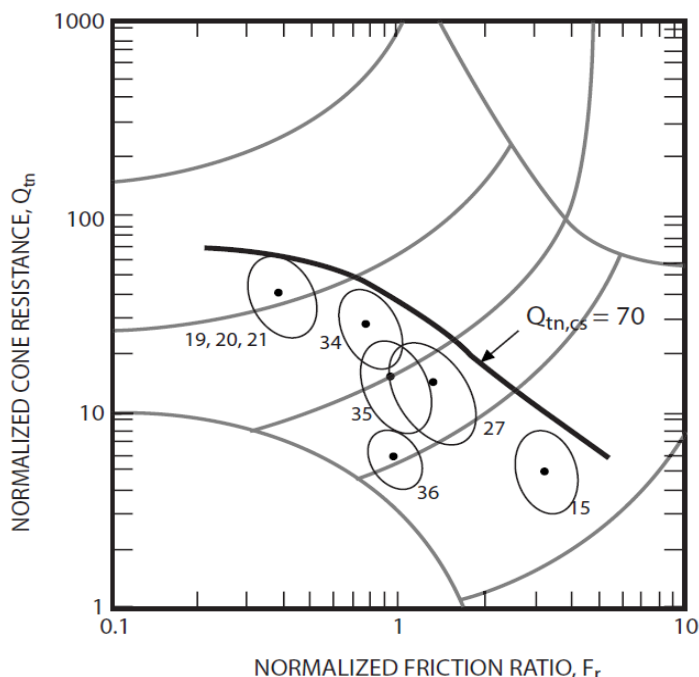


Figura 2.38 Gráfica de tipo de comportamiento del suelo (SBT) basado en CPT que muestra historias de casos donde ocurrió la licuación por flujo. Fuente: Modificado de Robertson,2010

Así mismo, Robertson (2010) propone una relación única para determinar la resistencia no drenada respecto a esfuerzo vertical efectivo ($S_{u(liq)}/\sigma'_{vo}$) basado en el historial de casos estudiados con ensayos de CPT como se muestra en la Figura 2.39.

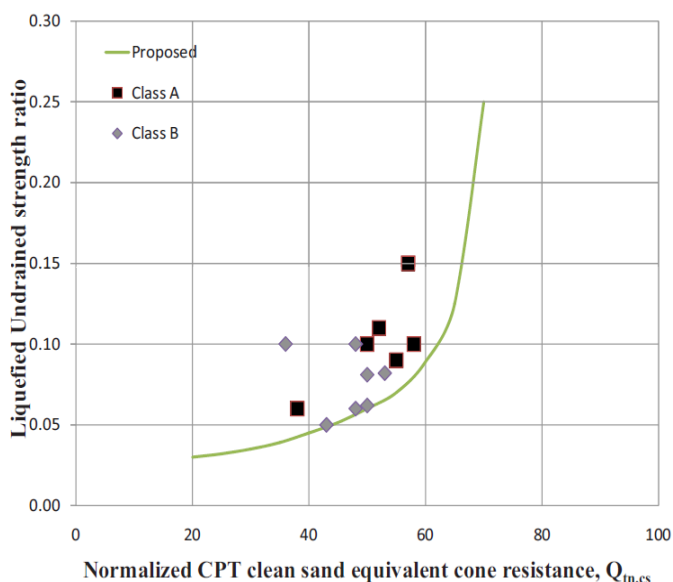


Figura 2.39 Relación de resistencia no drenada y resistencia a la penetración equivalente a la arena limpia CPT normalizada de casos de fallas de licuación de flujo de las clases A y B. Fuente: Robertson,2010.

Esta gráfica se representa por la siguiente ecuación cuando $Q_{tn,cs} \leq 70$.

$$\frac{S_{u(liq)}}{\sigma'_{vo}} = \frac{0.02199 - 0.0003124 \cdot Q_{tn,cs}}{1 - 0.02676 \cdot Q_{tn,cs} + 0.0001783 \cdot (Q_{tn,cs})^2}$$

Donde: $0.03 \leq S_{u(liq)}/\sigma'_{vo} \leq \tan \varphi'$

Es importante mencionar que el CPT es un ensayo in situ que puede proporcionar estimaciones del potencial de licuación por flujo. Sin embargo, debe usarse de manera apropiada dependiendo del riesgo del proyecto. Para proyectos de bajo riesgo, el método basado en CPT es apropiado cuando se combina con muestras selectivas para confirmar el tipo de suelo, así como estimaciones conservadoras de la respuesta del suelo. Para proyectos de riesgo moderado, el método basado en CPT debe combinarse con ensayos in situ adicionales apropiadas, así como con muestreos seleccionados sin perturbaciones y ensayos de laboratorio, para confirmar la respuesta del suelo. Mientras que, para proyectos de alto riesgo, el método basado en CPT debe usarse como una evaluación inicial para identificar el alcance y la naturaleza de los problemas potenciales, seguido de ensayos in situ y ensayos de laboratorio adecuadas con muestras de alta calidad, asimismo, un modelo numérico avanzado es apropiado para proyectos de alto riesgo donde la selección inicial indica una necesidad (Robertson, 2010).

De lo descrito en los párrafos anteriores, es importante entender el comportamiento del suelo bajo el enfoque de la mecánica de suelo en estado crítico y su aplicación en ensayos de laboratorio, ensayos de campo y modelos constitutivos, además de complementarse entre ellos, con la finalidad de prever el evento de licuación por flujo o movilidad cíclica.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el desarrollo del estudio experimental con la finalidad de alcanzar el objetivo general de la presente investigación, el cual abarca desde la descripción del material de relave, la descripción de los equipos convencionales, instrumentados y fabricados que se utilizaron en el proceso experimental, y la descripción detallada del procedimiento experimental.

Por último y no menos importante, se describe algunas consideraciones y fórmulas que se utilizaron para el procesamiento de la data que se obtuvo de los ensayos experimentales de la investigación.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Las muestras de relave que se utilizaron en la presente investigación son de diferentes zonas mineras del Perú que provienen del proceso de cicloneado, estos son el relave fino y grueso, se ensayaron dos muestras de relave grueso y una muestra de relave fino a densidades bajas. En la Tabla 3.1 se describe la designación de código de las muestras, el tipo de relave y el contenido de humedad al cual fueron ensayados para estimar la curva del estado crítico.

Tabla 3.1 Resumen de las muestras de relave que fueron ensayadas para obtener la curva del estado crítico.

Código de muestra	Tipo de muestra	Contenido de humedad (%)
M-1	Relave fino	5
M-2	Relave grueso	5
M-3	Relave grueso	8

A continuación, se muestra imágenes de las tres muestras de relave que se utilizaron en esta investigación.

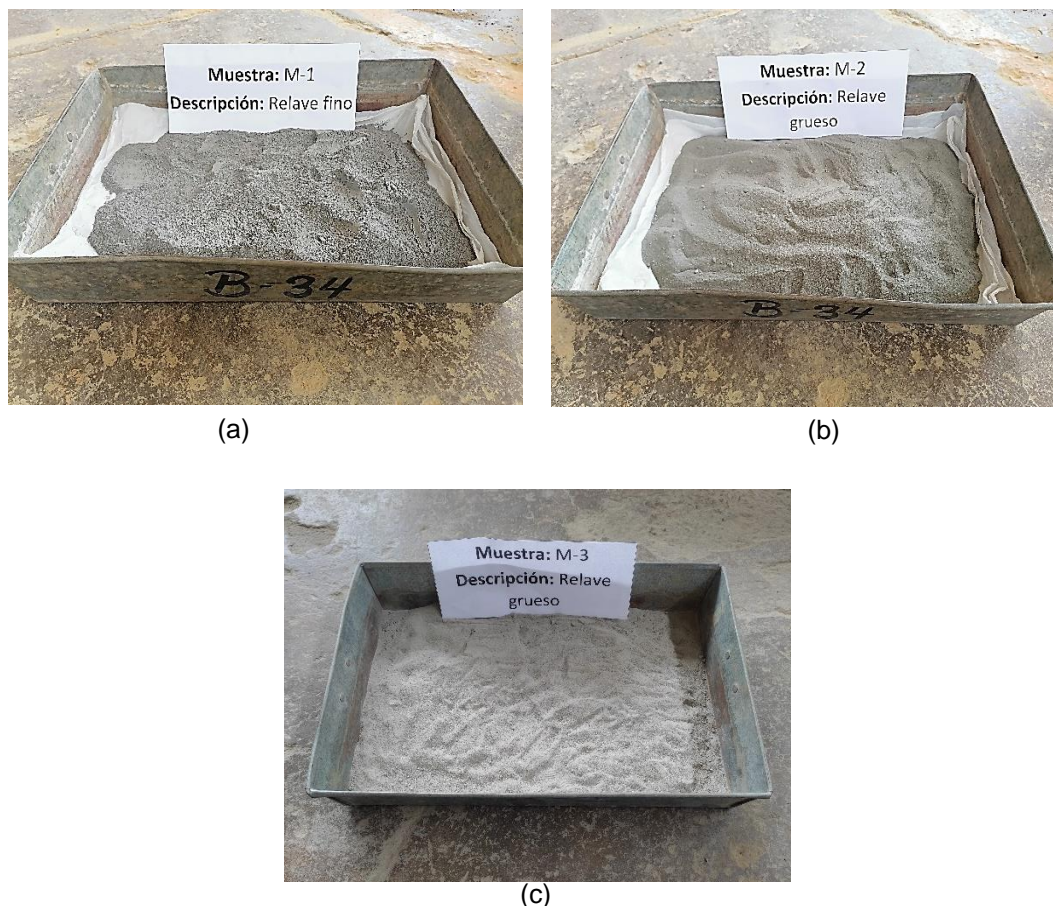


Figura 3.1 Fotografías de las muestras de relaves. a) Muestra de relave fino M-1. (b) Muestra de relave grueso M-2. (c) Muestra de relave grueso M-3.

Respecto a la caracterización física, gravedad específica, densidad mínima y máxima de las muestras de relave se describe a detalle en el capítulo IV.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Con la finalidad de alcanzar los objetivos de la presente investigación se utilizó el equipo triaxial convencional para estimar la curva de estado crítico, el cual fue instrumentado con un sensor de carga interna y un adquisidor de datos en tiempo real para los sensores de carga, desplazamiento y presión de poros. Además, se fabricó un molde de reconstitución de especímenes que permite la aplicación de vacío a la membrana mientras se reconstituye la muestra, ya que se encuentra a una densidad muy baja respecto al del estado crítico, asimismo, se modificó el pedestal de la celda triaxial bajo las recomendaciones de Jefferies y Been (2015). Los equipos utilizados en esta investigación se clasifican en dos grupos: 1) Equipos convencionales y 2) Equipos instrumentados y fabricados.

3.2.1. Equipos convencionales

En este grupo se encuentra el panel de control, bastidor de carga, bomba de vacío y equipo automático de cambio de volumen. A continuación se describe cada uno de ellos.

3.2.1.1. Panel de control triaxial

El panel está conformado por válvulas y reguladores mediante los cuales se administra el flujo de aire y agua desaireada entre los equipos para la ejecución del ensayo triaxial (ver Figura 3.2). El panel de control se utiliza en la etapa de saturación, consolidación y corte del espécimen.



Figura 3.2 Fotografía del panel de control triaxial.

3.2.1.2. Bastidor de carga

El bastidor de carga consiste en un marco de dos columnas con una viga transversal móvil (marco de carga) y una base que contiene la unidad de empuje mecánico, el motor eléctrico, los componentes electrónicos y los controles (ver Figura 3.3). El bastidor de carga permite ensayar el espécimen por corte y mediante sensores se registra las fuerzas normales a medida que se va deformando axialmente. En la Tabla 3.2 se describe las especificaciones técnicas del bastidor de carga.

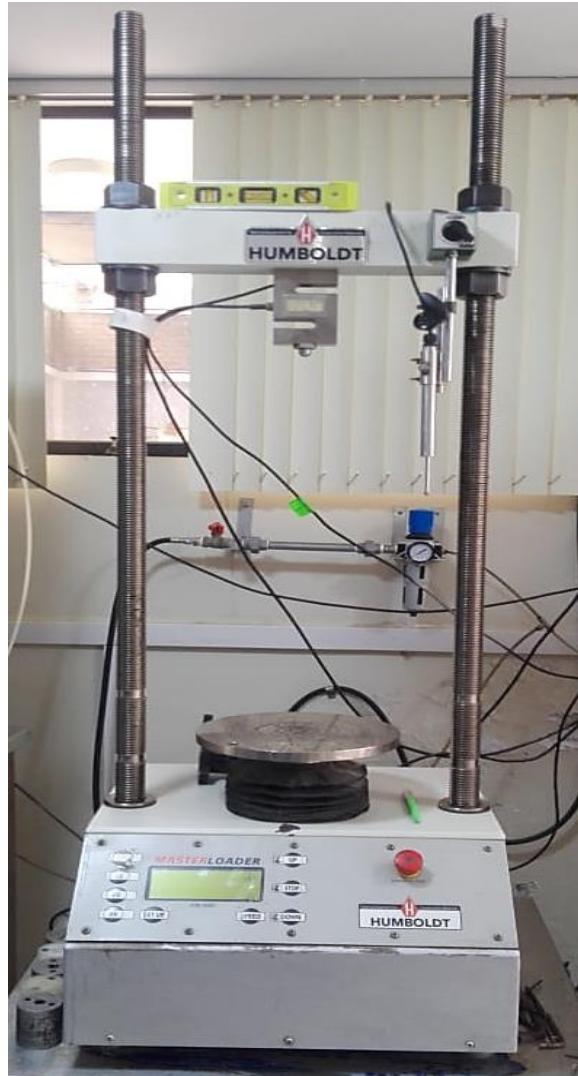


Figura 3.3 Fotografía del bastidor de carga.

Tabla 3.2 Resumen de las especificaciones técnicas del bastidor de carga

Descripción	Especificaciones técnicas
Tipo	HM-5030
Capacidad de carga	50 kN
Rango de velocidad-Prueba	0.00001 - 50.80000 mm/min
Rango de velocidad-Enfoque rápido	75.0 mm/min
Tamaño/recorrido de la platina/viaje	10" (254 mm) / 4" (100 mm)
Espacio libre vertical	40" (1000 mm)

Descripción	Especificaciones técnicas
Voltaje	110/220 V 50/60 Hz - 5.0 amperios
Peso de envío	300 libras (136 kg).

Fuente: Adaptado del catálogo virtual de Humboldt.

3.2.1.3. Bomba de vacío de una fase

La bomba de vacío se utilizó para la reconstitución de las muestras de relave, ya que presentaban densidades más bajas al del estado crítico. En la Figura 3.4 se muestra una fotografía de la bomba de vacío y en la Tabla 3.3 se describe sus especificaciones técnicas.



Figura 3.4 Fotografía de la bomba de vacío.

Tabla 3.3 Resumen de las especificaciones técnicas de la bomba de vacío

Descripción	Especificaciones Técnicas
Modelo	VE160N
Desplazamiento de aire libre	7.0 CFM
Último vacío	150 micrón
Voltaje	230 V / 50-6 Hz
Potencia	½ HP
Capacidad de aceite	415 ml

Capacidad de vacío

50 kPa

Fuente: Adaptado del manual de fabricación de la bomba de vacío

3.2.1.4. Equipo automático de cambio de volumen

Este es un equipo automático que sirve para medir el volumen de agua desalojado en el ensayo triaxial drenado, evitando así las lecturas manuales en las buretas durante el ensayo. El equipo de cambio de volumen realiza su función comprimiendo un pistón sellado contra un dispositivo de precisión en la cámara de calibración de tal forma que un movimiento lineal del pistón es exactamente proporcional al cambio de volumen de agua que se da en la cámara de calibración (ver Figura 3.5). El pistón está conectado a un medio de medición externo, un transductor de desplazamiento axial, adecuado para el sistema de adquisición de datos permitiendo que los cambios de volumen de la muestra sean desplegados y registrados directamente en centímetros cúbicos.



Figura 3.5 Fotografía de equipo automático de cambio de volumen.

3.2.2. Equipos instrumentados y fabricados

En este grupo se encuentra la celda triaxial con sensor de carga interna, adquisidor de datos, pedestal modificado, molde fabricado, válvulas y la congeladora, los cuales se describen a continuación.

3.2.2.1. Celda triaxial con sensor de carga interna

La celda triaxial es de 4.0", presenta una cámara de acrílico transparente que tiene una presión de trabajo de 1000 kPa, además, tiene una base sólida que permite centrar la celda con el pedestal y ajustar con 3 perillas de giro fácil. El sensor de carga interna tipo sumergible se ubica al interior de la celda en la parte superior como se muestra en la Figura 3.6 y en la Tabla 3.4 se indica sus especificaciones técnicas.

La finalidad de usar la celda triaxial con sensor de carga interna en esta investigación es evitar la fricción entre el pistón y la celda, y así obtener resultados con mejor precisión. Esto es especialmente importante para muestras de arena con baja densidad donde el esfuerzo desviador en el estado crítico puede ser del orden de 1 a 5 kPa (Jefferies y Been, 2015, p. 463).

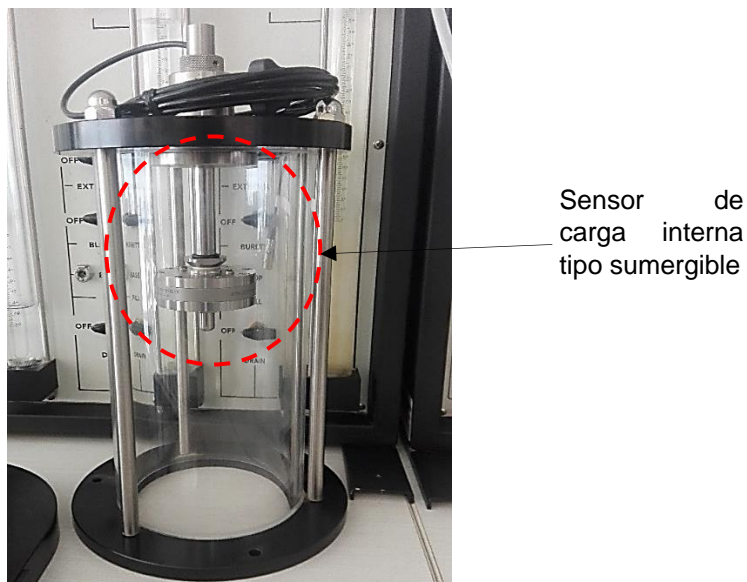


Figura 3.6 Fotografía de la celda triaxial con sensor de carga interna.

Tabla 3.4 Resumen de las especificaciones técnicas del sensor de carga interna

Descripción	Especificaciones Técnicas
Capacidad de carga	5 kN
Capacidad de sobre carga	200 %
Voltaje de excitación	10 VCC
No linealidad máxima:	±0.005 %.

Histéresis:	0.05 % de salida a escala completa.
Diámetro:	75 mm de salida a escala completa
Longitud de cable:	2 m

Fuente: Adaptado del catálogo virtual de Humboldt

3.2.2.2. Adquisidor de datos

La finalidad de usar los adquisidores de datos es obtener datos en tiempo real para los sensores de carga, desplazamiento y presión de poros, el cual nos proporciona mediciones con mejor precisión. En la Figura 3.7 se muestra una fotografía del adquisidor de datos utilizado en la investigación y en la Tabla 3.4 se describe sus especificaciones técnicas.



Figura 3.7 Fotografía del adquisidor de datos.

Tabla 3.5 Resumen de las especificaciones técnicas del adquisidor de datos

Descripción	Especificaciones Técnicas
Tipo	HM-5320
Pantalla:	7" (178 mm) VGA (480x800) Pantalla táctil resistiva
Datos de prueba en tiempo real:	Gráfico y tabulación.
Procesador:	Doble ARM de 32 bits.

Descripción	Especificaciones Técnicas
RAM:	64 MB
Memoria no volátil:	4 GB
Convertidor analógico a digital:	24 bit
Adquisidor de datos:	4 canales.
Velocidad de grabación:	Hasta 50 lecturas por segundo.
Almacenamiento de prueba múltiple:	1000 datos.
Puntos por prueba:	3000.
Puerto USB (frontal):	Se utiliza para exportar datos e importar/exportar calibración.
Conexión Ethernet:	Para conectividad de red.

Fuente: Adaptado del catálogo virtual de Humboldt

3.2.2.3. Molde fabricado (sistema de vacío)

Se mandó a fabricar un molde de reconstitución de muestras de 220 mm de altura, 71 mm de diámetro interior y 76 mm de diámetro externo, este es un molde partido longitudinalmente en dos partes, el cual se ajusta con abrazaderas en la parte superior e inferior y presenta dos orificios en la parte lateral para insertar vacío.

La finalidad de utilizar este molde es lograr reconstituir muestras de densidades bajas aplicando vacíos o presión negativa a la membrana en el proceso de reconstitución. En la Figura 3.8 se observa el prototipo del molde partido.



Figura 3.8 Prototipo del molde partido.

Nota:

El molde es de material de bronce SAE64

3.2.2.4. Pedestal modificado (Top Cap and Base)

Se modificó el pedestal a efectos de controlar problemas de contorno en los esfuerzos que experimenta el espécimen en la periferia de su base colocando dos discos de membrana látex triaxial estándar con una fina capa de grasa intercala entre ellos, esto generó el uso de una piedra porosa pequeña de 30 mm de diámetro en el centro de base y no de tamaño del diámetro del espécimen. Asimismo, la base y la tapa se fabricaron 5 mm de diámetro más grande que del espécimen para permitir deformaciones radiales uniformes.

La modificación del pedestal también se realizó de tal forma que el molde de reconstitución encaje correctamente con la base del pedestal, y además que facilite desacoplar la base de la subbase para congelar el espécimen al finalizar el ensayo, y de esta manera medir con mayor exactitud el contenido de humedad final de la muestra. Por otro lado, la tapa (*top cap*) se cambió por uno de material acrílico debido a que se debe generar el mínimo peso posible sobre el espécimen para evitar que éste se consolide, ya que las muestras de relave se ensayaron a densidades bajas. En la Figura 3.9 se muestra un prototipo del pedestal y tapa modificado.

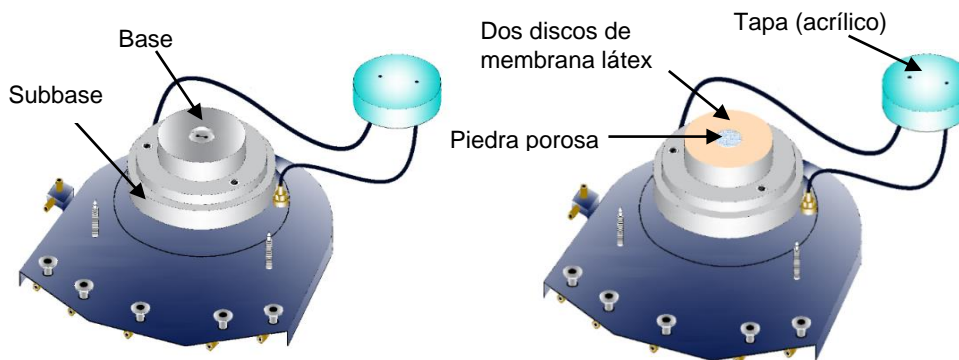


Figura 3.9 Prototipo del pedestal modificado del equipo triaxial

Nota:

El pedestal es de material acero inoxidable 304, la base y subbase son de 76 mm y 100 mm de diámetro respectivamente. La tapa superior (color celeste) es de material acrílico de 76 mm de diámetro. Se optó por dicho material debido a que se debe generar el mínimo peso posible sobre el espécimen para evitar que éste se consolide.

3.2.2.5. Válvulas de macho cilíndrico

Las válvulas se usaron con el objetivo de retener el agua interna del espécimen en el proceso de desinstalación. Las válvulas son del tipo macho cilíndrico de

cuarto de vuelta, de material latón y presentan un tamaño de conexión de 1/8", ver Figura 3.10.

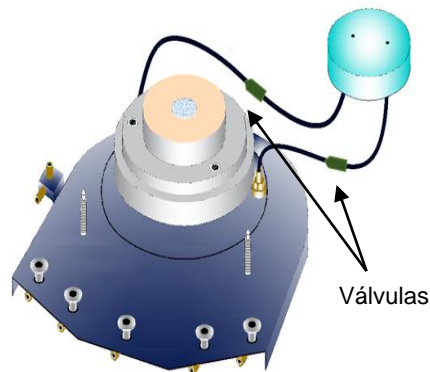


Figura 3.10 Válvulas en las mangueras que conectan la base con la tapa.

3.2.2.6. Congeladora

La congeladora se utilizó para congelar el espécimen después de haber sido ensayado por corte. Es una congeladora de uso doméstico de 96 cm de Alto ,102 cm de ancho y 72 cm de fondo, su capacidad de congelamiento es de -24° y conserva hasta 7°, ver Figura 3.11.



Figura 3.11 Fotografía de la congeladora que se usó en esta investigación.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este ítem se describe el procedimiento experimental para estimar la curva de estado crítico del relave fino y grueso mediante ensayos de compresión triaxial y congelamiento del espécimen al final del ensayo. A continuación, se describe las etapas que comprende el procedimiento experimental.

- Preparación y reconstitución de la muestra de relave.
- Ejecución de ensayos de compresión triaxial drenados y no drenados.
- Determinación de la relación de vacío en estado crítico.

3.3.1. Preparación y reconstitución de la muestra de relave

La preparación y reconstitución de las muestras de relave se realizó por el método de apisonamiento húmedo (*moist tamping method*), el cual consiste en usar un contenido de humedad inicial de aproximadamente 5 % (este porcentaje puede variar de acuerdo con la necesidad y objetivo de alcanzar el estado crítico) lo que da como resultado fuerzas capilares entre los granos del material y permite el volcado de este a bajas densidades que no se puede obtener con muestras húmedas o secas.

Asimismo, se debe tener en cuenta las dimensiones objetivo del espécimen para su reconstitución, en esta presente investigación las dimensiones del espécimen que se buscó alcanzar fueron 71.2 mm de diámetro y 154.5 mm de altura, estas dimensiones están dentro del rango establecido por las normas ASTM D7181 y ASTM D4767 que hacen mención que la altura debe ser de 2 a 2.5 veces el diámetro.

Es importante recalcar que en esta investigación se usó muestras de relave fino y grueso en estado suelto para estimar la curva de estado crítico. Por ende, esta etapa es clave para obtener buenos resultados en el estudio experimental. No obstante, es la más complicada, dado que la reconstitución de la muestra de relave en un estado muy suelto necesita de atenciones minuciosas para evitar que el espécimen se desmorone cuando se retire el molde o se succione al aplicar vacío para mantener su verticalidad del espécimen.

A continuación, se describe el procedimiento de la preparación y reconstitución de las muestras de relave.

3.3.1.1. Preparación de la muestra

El primer paso de esta etapa fue determinar la densidad mínima relativa de cada una de las muestras de relave de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM D4254, para luego calcular las densidades húmedas mediante la asignación de un contenido de humedad inicial, por ejemplo, para las muestras de relave M-1 y M-2 se usó un contenido de humedad de 5 % y para la muestra M-3 un contenido

de humedad de 8 %, se optaron por estas humedades porque las muestras de relave presentaron un mejor comportamiento para alcanzar el estado crítico. A continuación, se explica el procedimiento de la preparación de las muestras de relave.

- Según la humedad objetivo se determinó la cantidad de agua para mezclar con la muestra de relave y con el fin de obtener una mezcla uniforme se dejó en el conservador por un mínimo de 16 horas, ver Figura 3.12.



Figura 3.12 Preparación de la muestra. (a) Mezcla de la muestra de relave con agua. (b) Mezcla uniforme de la muestra de relave.

- Es importante que la mezcla de relave preparada mantenga la humedad asignada para alcanzar el estado crítico, ya que si existe variación en la humedad se podría obtener un comportamiento no deseado. Por tal motivo, se recomienda que la mezcla de relave no se encuentre en un ambiente húmedo o de temperatura alta para evitar la variación de la humedad.
- Con los datos de densidad seca (densidad mínima), contenido de humedad y volumen del espécimen se determinó la cantidad de mezcla de relave para la reconstitución del espécimen, el cual se dividió en seis porciones iguales, ver Figura 3.13.



Figura 3.13 Peso de las muestras de relave. (a) Peso de cada porción. (b) Seis porciones de la mezcla de relave.

3.3.1.2. Reconstitución del espécimen

La reconstitución del espécimen con la mezcla de la muestra de relave se realizó de la siguiente manera.

- Antes de iniciar con la reconstitución del espécimen se procedió a limpiar el pedestal del equipo triaxial para luego acoplar la base a la subbase con los pernos, seguidamente se colocaron las dos mangueras que conectan la base con la tapa con las válvulas abiertas. Después se colocó la piedra porosa de 30 mm de diámetro en el centro de la base del pedestal y a sus extremos, dos discos de membrana látex con una fina capa de grasa de silicona intercalada entre ellas. Esta última consideración permitió reducir los problemas de contorno en los esfuerzos que experimenta el espécimen en la periferia de su base. En la Figura 3.14 se muestra a detalle la descripción de este procedimiento.





(c)



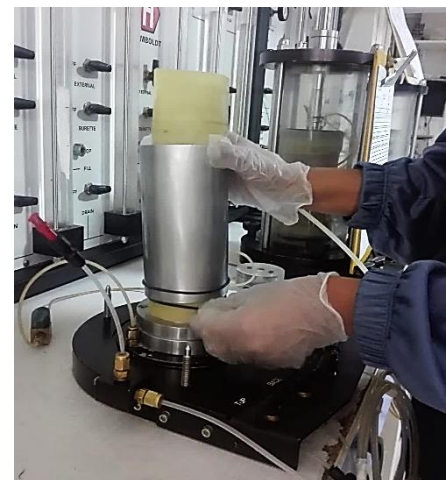
(d)

Figura 3.14 Armado del pedestal. (a) Acople de la base a la subbase. (b) Conexión de las dos mangueras con las válvulas abiertas. (c) Colocación de piedra porosa y aplicación de grasa silicona en los discos de membrana látex. (d) Pedestal listo para el siguiente paso.

- El siguiente paso fue enrollar la membrana látex en la base del pedestal y ajustar con o-ring, luego se procedió a colocar el molde partido sobre la base del pedestal el cual se ajustó con las abrazaderas y la membrana se estiró por la parte superior ajustándose en el molde con el o-ring. En la Figura 3.15 se muestra el procedimiento fotográfico.



(a)



(b)

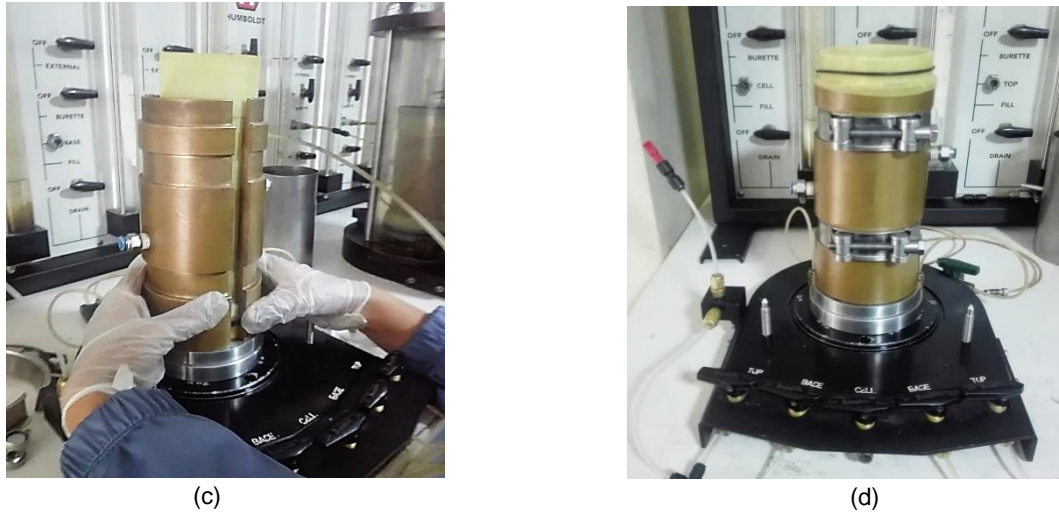


Figura 3.15 Armado del molde con membrana látex. (a) Colocación de la membrana látex en la base del pedestal. (b) Ajuste de la membrana con dos o-ring. (c) Colocación del molde partido. (d) Ajuste del molde con abrazaderas y ajuste de la membrana en la parte superior con o-ring.

- Asimismo, se instaló las mangueras en los orificios laterales del molde para aplicar succión (vacío) con la bomba de vacío en todo el proceso de reconstitución, ver Figura 3.16.



Figura 3.16 Instalación de la bomba de vacío al molde de reconstitución.

- Luego se procedió a colocar y apisonar cada porción de la mezcla de relave en capas, la altura de cada capa se controló con un vernier teniendo en cuenta que este mide la sexta parte de la altura del espécimen. Antes de echar la siguiente capa se recomienda escarificar suavemente la parte superior de la capa apisonada para evitar formar una superficie lisa entre capas. En la Figura 3.17 se describe este procedimiento.

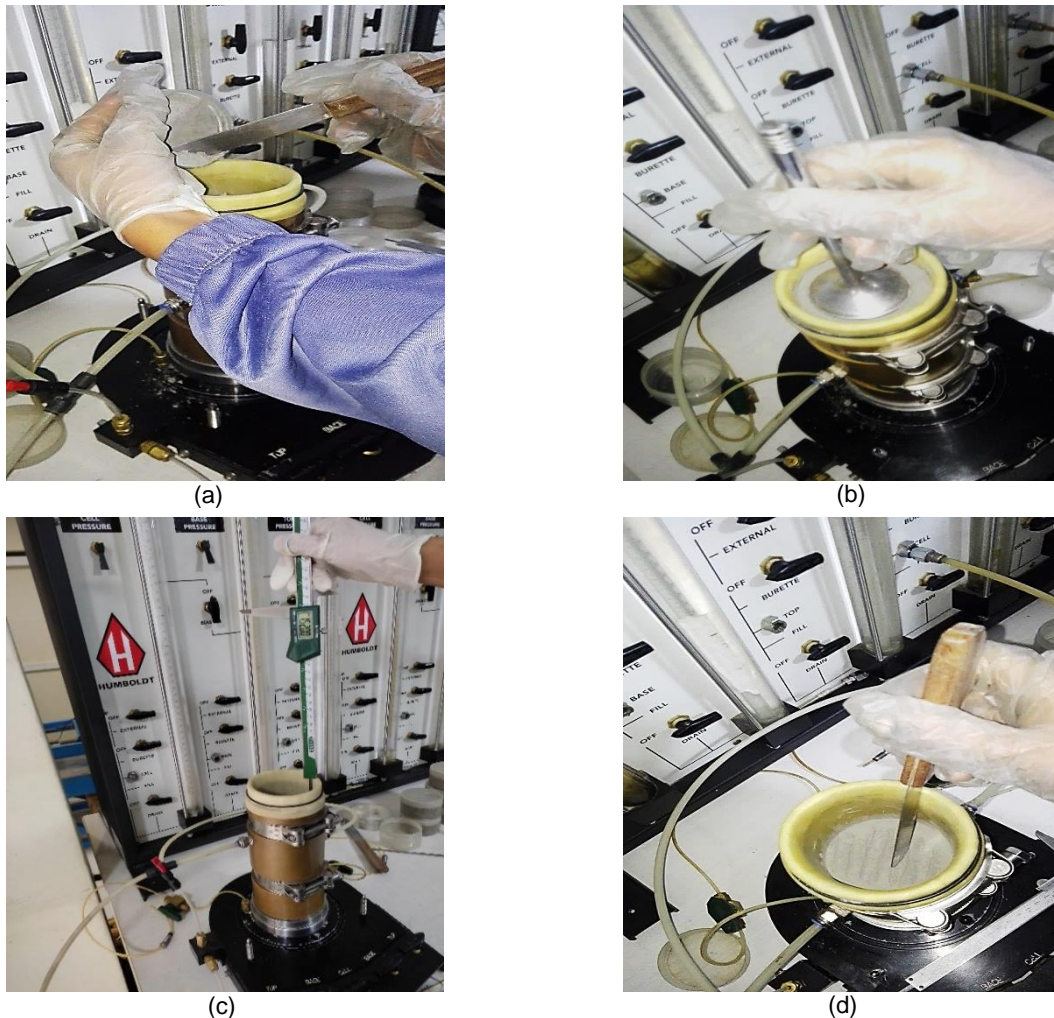


Figura 3.17 Reconstitución del espécimen de relave. (a) Se echa la muestra capa por capa. (b) Apisonamiento de cada capa aplicando pequeños esfuerzos verticales con el apisonador. (c) Control de altura de las capas con el vernier. (d) Escarificar la superficie antes de echar la siguiente capa.

- Después de apisonar las seis capas, se colocó los discos de papel filtro y piedra porosa como se muestra en la Figura 3.18a y seguidamente se colocó la tapa y las dos mangueras que conectan en los orificios de la tapa, la tapa debe enrollarse con la membrana y ajustar con o-ring, ver Figura 3.18b.

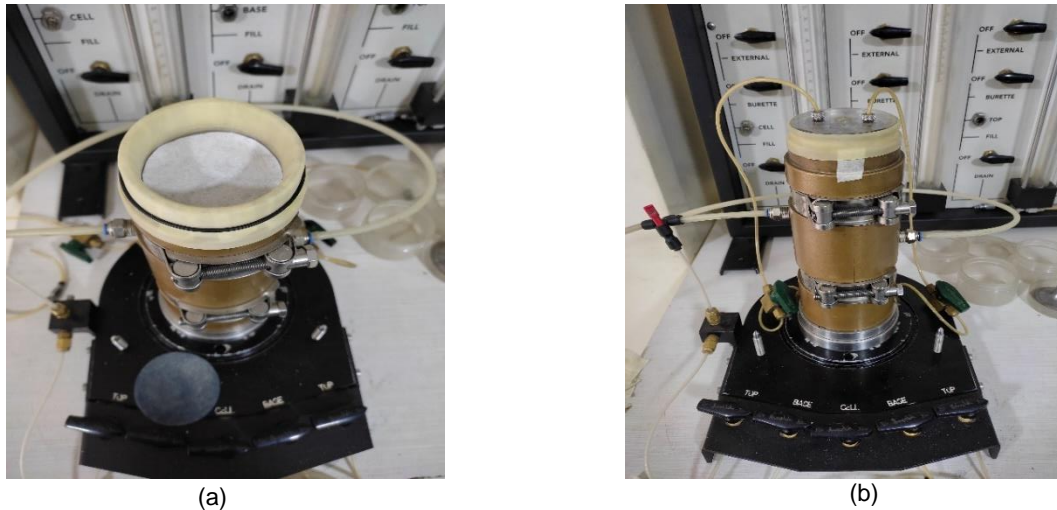


Figura 3.18 Aseguramiento del espécimen luego de su reconstitución. (a) Colocación del papel filtro y piedra porosa. (b) Colocación de la tapa y conexión de las mangueras en los orificios de la tapa.

- El siguiente paso fue aplicar vacíos menores al espécimen - por ejemplo - 10 kPa o -20 kPa como máximo- a través de la línea de drenaje para mantener su verticalidad y poder extraer el molde. Esto dependerá de la densidad al cual fue reconstituida el espécimen, es decir, si la muestra presenta una densidad muy baja (estado suelto) y al ser reconstituido no logra mantenerse verticalmente, sino se desmorona con cualquier movimiento. Por ejemplo, en esta investigación para la muestra M-1 que es un relave fino fue necesario aplicar vacío de -5 kPa para mantener la geometría del espécimen, mientras que, para las muestras de relave grueso M-2 y M-3 no fue necesario aplicar vacío. Es importante realizar ensayos previos para saber cuánto de vacío es necesario aplicar de tal forma que no se altere la geometría objetivo del espécimen.
- Y para finalizar, se retiró el molde partido con mucho cuidado y se realizaron como mínimo tres mediciones de altura (separadas 120°) y diámetro del espécimen para obtener un promedio y comprobar el volumen establecido inicialmente, ver la Figura 3.19.

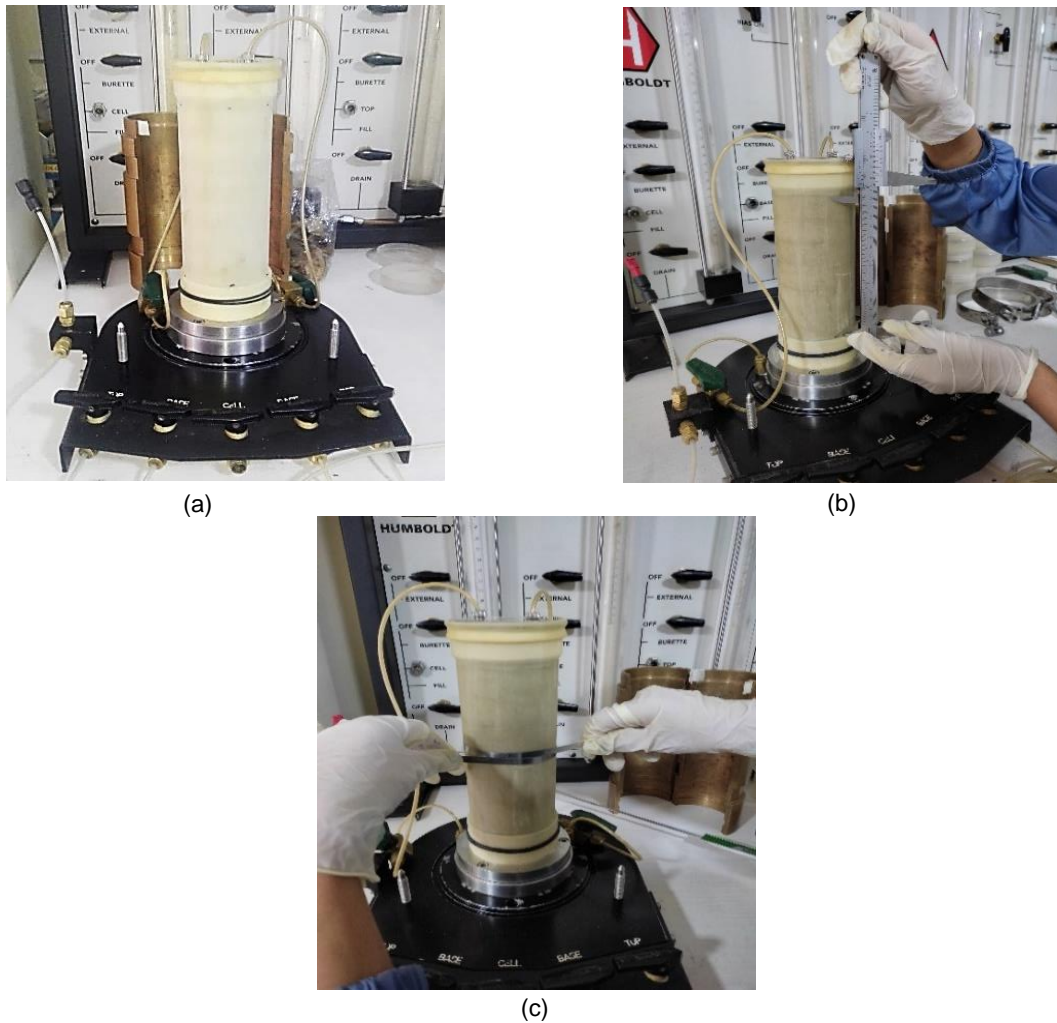


Figura 3.19 Medición del espécimen. (a) Retiro del molde partido. (b) Medición de altura del espécimen con vernier. (c) Medición del diámetro del espécimen con la cinta pi.

3.3.2. Ejecución del ensayo de compresión triaxial drenado y no drenado

La ejecución de esta etapa se rige por las normas ASTM D7181 y ASTM D4767 que corresponden a los ensayos de compresión triaxial consolidados isotópicamente drenados y no drenados respectivamente. Esta etapa comprende tres fases, estos son: la saturación, consolidación y el ensayo por cizallamiento del espécimen. A continuación, se describe cada una de estas fases.

3.3.2.1. Saturación del espécimen

Después del ensamble de la cámara triaxial, contacto del pistón de carga axial interna con la tapa superior del espécimen y llenado de la cámara con agua, se procedió a saturar el espécimen. El objetivo de esta fase de saturación es llenar todos los huecos (vacíos) de la muestra con agua y se logró aplicando contrapresión con agua desaireada. Se recomienda que antes de aplicar la

contrapresión, se aplique vacío (presión de succión) al espécimen para eliminar las burbujas de aire atrapadas en su interior y así alcanzar una saturación con facilidad y rapidez, ver Figura 3.20.

La contrapresión que se usó para iniciar la saturación es de 2.20 Psi (15 kPa aprox.) y la presión de celda es de 3.20 Psi (22 kPa aprox.), estas presiones se aplicaron de manera incremental de 3 Psi con el tiempo hasta alcanzar la saturación. El grado de saturación se mide mediante el parámetro β de Skempton, el cual consiste en aplicar un incremento gradual en la presión de celda total (σ_3) sin drenar y medir el incremento correspondiente en la presión de poro (u). El valor de β se determina de la siguiente manera.

$$\beta = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.1)$$

El espécimen se considera completamente saturado cuando el parámetro β es mayor o igual a 0.95.

Así mismo, en esta etapa inicia la variación volumétrica del espécimen y como se menciona en el ítem 2.5.6 es complicado medir la variación volumétrica en esta etapa, sin embargo, se logró medir la variación de altura de los especímenes de la muestra M-1 (relave fino) mediante el desplazamiento del pistón. Se realizó este procedimiento porque se observó que la variación de altura era significativa en el proceso de saturación, por ende, afectaría a los cálculos del esfuerzo desviador si no se considera tal variación. Para las muestras de relave M-2 y M-3 (relave grueso) no se realizó el desplazamiento del pistón porque la variación de altura no era significativa; además, porque mover el pistón implicaba que el espécimen se ladea lateralmente con facilidad debido a que se encuentra saturado y por ser material arenoso.



Figura 3.20 Inicio del proceso de saturación.

3.3.2.2. Consolidación del espécimen

Esta fase inicia cuando se completa la fase de saturación. El objetivo de la consolidación es permitir que la muestra alcance el equilibrio en un estado drenado de esfuerzo de consolidación efectivo para el cual se requiere una determinación de resistencia. Esta fase consiste en mantener constante la contrapresión máxima y aumentar la presión de celda hasta que la diferencia entre ellos sea igual a la presión efectiva de consolidación deseada.

En esta investigación las muestras de relaves fueron consolidadas a 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 600 kPa y 800 kPa.

3.3.2.3. Ensayo de corte

Esta fase consiste en cizallar el espécimen hasta por lo menos el 20 % de deformación axial para alcanzar el estado crítico. Así bien, en esta investigación se llegó hasta el 25 % de deformación axial.

El cizallamiento del espécimen va a depender del tipo de ensayo, es decir, para ensayos triaxiales drenados se mantiene abierta la válvula de drenaje mientras que, para los ensayos triaxiales no drenados se cierra la válvula de drenaje. En la Figura 3.21 se muestra uno de los ensayos por corte no drenado.

Para estimar la curva de estado crítico para las muestras de relaves M-1, M-2 y M-3 se realizaron como mínimo cuatro ensayos triaxiales no drenados con presión de confinamiento 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa, y dos ensayos drenados de 200 kPa y 400 kPa. Es importante mencionar que la cantidad de ensayos y presiones de confinamiento a utilizar pueden variar de acuerdo con el comportamiento que va teniendo la muestra en estudio y la necesidad de obtener la curva de estado crítico completa mediante más puntos.

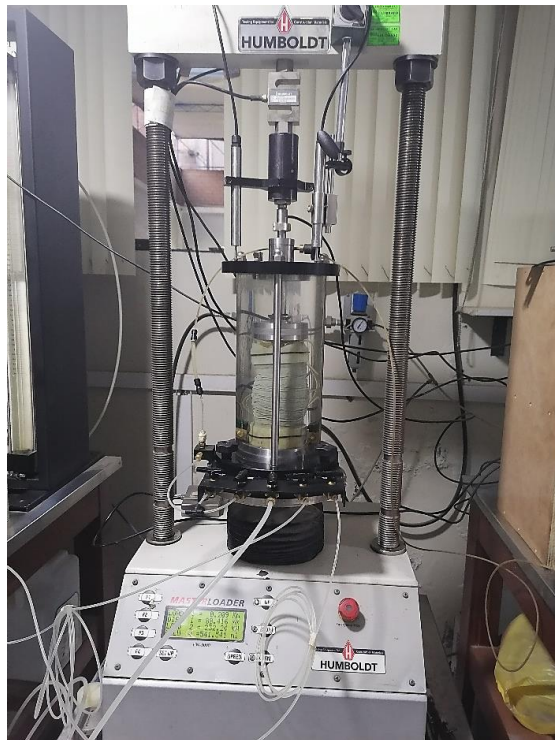


Figura 3.21 Ensayo por corte no drenado de la muestra M-1.

Por otro lado, es importante mencionar que las velocidades utilizadas en estos ensayos triaxiales fueron de $0.250^{\circ}\text{mm}/\text{min}$ para los triaxiales consolidados no drenados y $0.125^{\circ}\text{mm}/\text{min}$ para los triaxiales consolidados drenados. Estos valores son utilizados en los ensayos triaxiales convencionales, sin embargo, en las normas ASTM D7181 y ASTM D4767 se describe como se calcula mediante los ensayos de consolidación.

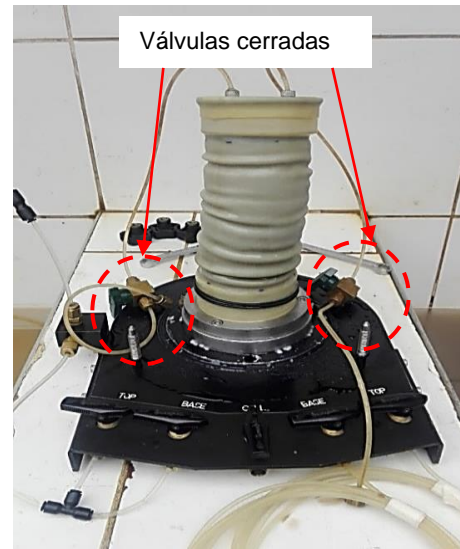
3.3.3. Determinación de la relación de vacío en estado crítico

Para determinar la relación de vacío en estado crítico se optó por el proceso de congelamiento del espécimen (Sladen y Handford, 1987), ya que permite determinar su contenido de humedad al final del ensayo con mejor precisión. A continuación, se describe a detalle el procedimiento de esta fase.

- Al finalizar el ensayo de corte del espécimen, se desalojó el agua de la celda, seguidamente se cerró las válvulas laterales para evitar perder el agua interna del espécimen, después se desacopló la base juntamente con el espécimen de la subbase del pedestal con la finalidad de congelar el espécimen. Se recomienda bajar la temperatura a -3°C , ya que es suficiente para inmovilizar el agua en los poros y así evitar que el espécimen se enfríe mucho que dificulte retirar la base y la tapa. Para esta investigación se contó con un congelador doméstico de temperatura máxima de -18°C y según la necesidad de lograr congelar el espécimen se regulaba la temperatura.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.22 Congelamiento del espécimen de relave. (a) Desalojo del agua de la celda. (b) Cierre de las dos válvulas para evitar el drenaje del agua que se encuentra en el interior del espécimen. (c) espécimen de la muestra del relave M-1 recién colocada en la congeladora doméstica. (d) Espécimen congelado durante 24 horas.

- Después de haber logrado congelar el espécimen, se secó con una franela para eliminar trozos de hielo. Luego el espécimen se retiró intacta y se pesó como se muestra en la Figura 3.23.



Figura 3.23 Peso del espécimen de relave congelado. (a) Secado del espécimen con una franela (muestra M-3) (b) Peso del espécimen congelado (muestra M-3).

- Tener en cuenta que la expansión volumétrica del agua al congelar el espécimen no es un problema, ya que solo se usa el contenido de agua y no el volumen del espécimen.
- Se usó un horno para el secado del espécimen a 110°C, después se determinó el contenido de humedad, el cual es de nuestro interés para obtener la relación de vacío en el estado crítico para un esfuerzo de confinamiento dado, ver Figura 3.24.



Figura 3.24 Secado de los especímenes de la muestra M-3 en el horno para determinar el contenido de agua.

3.4. PROCESAMIENTO DE LA DATA EXPERIMENTAL

En este ítem se describe algunos conceptos y consideraciones para procesar la data obtenida del estudio experimental con el objetivo de lograr estimar la curva de estado crítico.

3.4.1. Etapa de consolidación

3.4.1.1. Altura del espécimen después de la consolidación ($H_{fcons.}$)

La altura después de consolidar se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{fcons.} = H_0 - \Delta H_{fcons.} \quad (3.2)$$

Dónde: H_c es la altura después de consolidar, H_0 es la altura inicial (reconstituida) y ΔH_0 variación de altura del espécimen al final de la consolidación.

Tener en cuenta que para el cálculo de la altura $H_{fcons.}$ de los especímenes de las muestras de relave M-1 se consideró a la H_0 como altura después de ser saturada, ya que se observó una variación de altura en el proceso de saturación. En la Tabla 3.6 se muestra el resumen de las variaciones de las alturas de los especímenes de la muestra M-1 ensayadas a diferentes presiones de confinamiento.

Tabla 3.6 Resumen de las variaciones de alturas de la muestra de relave M-1 en la etapa de saturación.

N°	Tipo de ensayo	Presión de confinamiento (kPa)	$\Delta H_{fsat.}$ (cm)
1	CU	50	1,05
2	CU	100	1,05
3	CU	200	0,65
4	CD	200	0,75
5	CD	400	1,02

Abreviaturas:

$\Delta H_{fsat.}$: variación de altura del espécimen al final de la etapa de saturación.

CU: ensayo triaxial consolidado no drenado.

CD: ensayo triaxial consolidado drenado.

Mientras que, para calcular las $H_{fcons.}$ de los especímenes de las muestras de relave M-2 y M-3 se utilizó la ecuación 3.2, debido a que no presentaban en

algunos ensayos una variación significativa de altura en la etapa de saturación y en otros casos, era complicado medir con el pistón debido a granulometría gruesa y condición saturada del espécimen; por esta razón, fue considerada cero. En el Anexo C se detalla las variaciones de alturas de las tres muestras de relave en la etapa de saturación.

3.4.1.2. Área transversal del espécimen después de consolidar (A_c)

Para determinar el área transversal del espécimen después de consolidar se aplicó el método A como se describe en las normas ASTM D7181 y ASTM D4767 como sigue.

$$A_c = \frac{V_o - (\Delta V_{sat} + \Delta V_{cons.})}{H_c} \quad (3.3)$$

Donde: V_o es el volumen inicial del espécimen (reconstituido), ΔV_{sat} variación de volumen del espécimen durante la saturación y $\Delta V_{cons.}$ es la variación de volumen durante la consolidación.

3.4.2. Etapa de corte

3.4.2.1. Cálculo de la deformación axial (ε_1)

La deformación axial para una carga axial aplicada se determina de la siguiente manera.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_{fcons.}} \quad (3.4)$$

Donde: ΔH es la variación de altura del espécimen durante la carga, según lo determinado por las lecturas del indicador de deformación.

3.4.2.2. Cálculo del área transversal (A_i)

El área transversal para una determinada deformación axial se calcula de la siguiente manera.

$$A_i = \frac{V_{fcons.} - \Delta V_{\varepsilon i}}{H_{fcons.} - \Delta H_{\varepsilon i}} \quad (3.5)$$

Dónde: $V_{fcons.}$ es el volumen después de la consolidación, $\Delta V_{\varepsilon i}$ es el cambio en el volumen desde el comienzo del corte a cualquier deformación, y $\Delta H_{\varepsilon i}$ es el cambio de altura desde el comienzo del corte a cualquier deformación.

3.4.2.3. Cálculo del esfuerzo desviador (σ_d)

Para determinar el esfuerzo desviador se aplica la siguiente ecuación.

$$\sigma_d = \frac{F}{A_i} \quad (3.6)$$

Dónde: F es la fuerza axial aplicada y A_i es el área transversal para una deformación axial determinada.

A la ecuación 3.5 se divide entre $H_{fcons.}$ y se obtiene la expresión para el área transversal para una determina deformación axial, ver ecuación 3.7.

$$A_i = \frac{\frac{V_c}{H_{fcons.}} - \frac{\Delta V_{\varepsilon i}}{H_{fcons.}}}{\frac{H_{fcons.}}{H_{fcons.}} - \frac{\Delta H_{\varepsilon i}}{H_{fcons.}}}$$

$$A_i = \frac{A_c - \frac{\Delta V_{\varepsilon i}}{H_{fcons.}}}{1 - \varepsilon_i} \quad (3.7)$$

A continuación, se presenta la deducción de las expresiones para determinar el esfuerzo desviador para los ensayos triaxiales no drenados y drenados usando la ecuación 3.6 y 3.7.

Para ensayos triaxiales no drenados:

En la etapa de corte no hay un cambio volumétrico del espécimen por ende la expresión $\Delta V_{\varepsilon i}$ es cero, quedando la ecuación 3.7 de la siguiente manera.

$$A_i = \frac{A_c}{1 - \varepsilon_i}$$

Entonces el cálculo del esfuerzo desviador para ensayos triaxiales no drenado es de la siguiente manera.

$$\sigma_d = \frac{F}{A_c} \cdot (1 - \varepsilon_i) \quad (3.8)$$

Para ensayos triaxiales drenados:

En la etapa de corte existe un cambio volumétrico del espécimen, por ende, la expresión $\Delta V_{\varepsilon i}$ es diferente de cero, determinándose el esfuerzo desviador con la siguiente ecuación.

$$\sigma_d = \frac{A_c - \frac{\Delta V_{\varepsilon i}}{H_{fcons.}}}{1 - \varepsilon_i} \cdot (1 - \varepsilon_i) \quad (3.9)$$

Hay que recalcar que la variación volumétrica durante el corte $\Delta V_{\varepsilon i}$ se obtiene de los registros del equipo automático de medición de volumen.

3.4.2.4. Corrección del esfuerzo desviador por el uso de membrana

Si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%, se utiliza la siguiente ecuación para corregir el esfuerzo desviador.

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{4 \cdot E_m \cdot t_m \cdot \varepsilon_1}{D_c} \quad (3.10)$$

Dónde:

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ es la corrección de la membrana que se restará al esfuerzo desviador.

$D_c = \frac{4A_c}{\pi}$ diámetro del espécimen después de consolidar

E_m modulo de Young para el material de membrana

t_m grosor de la membrana

ε_1 Deformación axial (forma decimal)

Para el cálculo se utilizó un valor típico de módulo de Young de la membrana ($E_m = 1400 \text{ kPa}$), recomendado en el ASTM D7181 y ASTM D4767. Asimismo, el grosor de la membrana látex que se usó en todos los ensayos fue de 0.8 mm.

Los cálculos de estas correcciones se encuentran en el Anexo B para las tres muestras de relaves para cada ensayo triaxial realizado.

3.4.3. Etapa del estado crítico

3.4.3.1. Relación de vacío crítico

La relación de vacío en el estado crítico se calculó a partir del contenido de humedad que presentan las muestras de relave al final del ensayo como se describe en la ecuación 3.11 considerando un grado de saturación de 100%.

$$G_s \cdot w\% = S \cdot e_c \quad (3.11)$$

Donde: G_s es la gravedad específica de los sólidos, w es el contenido de humedad del espécimen al final del ensayo de corte, S es el grado de saturación y e_c es la relación de vacío crítico.

3.4.3.2. Angulo de fricción crítico

De acuerdo con los conceptos de la trayectoria de esfuerzos por Cambridge, el ángulo de fricción en el estado crítico se calcula con la siguiente ecuación.

$$M_c = \frac{6 \cdot \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c} \quad , \quad \varphi_c = \arcsin \left(\frac{3 \cdot M_c}{6 + M_c} \right) \quad (3.12)$$

Donde: M_c es la pendiente de la línea de estado crítico en el plano $p' - q$ y φ_c es el ángulo de fricción en el estado crítico.

CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO DE RELAVES

En este capítulo se muestra los resultados de los ensayos de laboratorio, tales como: ensayo de caracterización física, gravedad específica de sólidos, ensayo de densidad mínima y máxima, y el ensayo Proctor estándar para las tres muestras de relave. Los resultados de los tres primeros ensayos mencionados fueron los datos de entrada para realizar los ensayos triaxiales. Además, se muestra un cuadro resumen de los ensayos triaxiales de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 que alcanzaron el estado crítico para un determinado estado inicial de densidad o relación de vacío.

4.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los ensayos de caracterización física para una muestra de suelo, en este caso muestras de relave, abarca realizar los siguientes ensayos: granulometría por tamizado y los límites de Atterberg. Los resultados de estos ensayos permiten clasificar las muestras de relave mediante la aplicación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

En la Tabla 4.1 se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de caracterización física y clasificación SUCS de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3. Además, en el Anexo A.1. se muestra los reportes de laboratorio de estos ensayos para una mejor comprensión de resultados.

Tabla 4.1 Resumen de los resultados de los ensayos de caracterización física y clasificación SUCS de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3

Muestra	Tipo	Ensayos de caracterización física	Resultados		Clasificación SUCS	
			Nombre	Símbolo		
M-1	Relave cicloneado parte fino	granulometría por tamizado (ASTM-D6913-04)	Grava (%)	0.0	Arena pobremente gradada con arcilla	SP-SC
			Arena (%)	93.9		
			Limos y arcillas (%)	6.1		
		Límites de Atterberg (ASTM-D4318)	LL (%)	21.2		
			LP (%)	12.7		
IP (%)	8.5					
M-2	Relave cicloneado parte grueso	granulometría por tamizado (ASTM-D6913-04)	Grava (%)	0.0	Arena pobremente gradada	SP
			Arena (%)	98.1		
			Limos y arcillas (%)	1.9		
		Límites de Atterberg (ASTM-D4318)	LL (%)	N.P		
			LP (%)	N.P		
IP (%)	N.P					
			Grava (%)	0.0		SP

Muestra	Tipo	Ensayos de caracterización física	Resultados		Clasificación SUCS	
			Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
M-3	Relave cicloneado parte grueso	granulometría por tamizado (ASTM-D6913-04)	Arena (%)	99.6	Arena pobremente gradada	
			Limos y arcillas (%)	0.4		
			LL (%)	N.P		
			LP (%)	N.P		
		Límites de Atterberg (ASTM-D4318)	IP (%)	N.P		

Abreviaturas:

LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: índice de plasticidad

4.2. ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS

El ensayo de gravedad específica de sólidos (G_s) para las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 se realizó bajo la norma ASTM-D854, debido a que estas muestras de relaves pasan el tamiz N°4 (4.75°mm). El objetivo de realizar este ensayo es obtener la gravedad específica de sólidos y mediante la formulación matemática calcular la relación de vacíos de las muestras de relaves en la etapa final (estado crítico) del ensayo triaxial.

En la Tabla 4.2 se muestra los valores de gravedad específica de sólidos de las tres muestras de relaves y en el Anexo A.2 se muestra el reporte de laboratorio de estos ensayos.

Tabla 4.2 Resumen de los resultados del ensayo de gravedad específica de sólidos de las muestras de relaves utilizadas en esta investigación

Código	Muestra	Gravedad específica de sólidos (G_s)
M-1	Relave fino	3.36
M-2	Relave grueso	2.96
M-3	Relave grueso	2.92

4.3. ENSAYOS DE DENSIDAD RELATIVA MÍNIMA Y MÁXIMA

Los ensayos de densidad relativa mínima y máxima se rigen bajo la norma ASTM-D4254 y ASTM-D4253 respectivamente. Estos ensayos de densidades permiten tener un rango de densidades relativas de las muestras de relave en estado seco. En la siguiente tabla se muestra los valores de densidades relativas mínima y

máxima de las muestras M-1, M-2 y M-3. En el Anexo A.3 se muestra el reporte de los ensayos.

Tabla 4.3 Resumen de los resultados de los ensayos de densidad mínima y máxima de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3

Código	Muestra	Densidad mínima (g/cm^3)	Densidad máxima (g/cm^3)
M-1	Relave fino	1.138	1.633
M-2	Relave grueso	1.340	1.842
M-3	Relave grueso	1.472	1.859

4.4. ENSAYO PROCTOR ESTÁNDAR

El ensayo Proctor estándar se rige bajo la norma ASTM-D698, se realizó este ensayo para las tres muestras de relave con el objetivo de conocer que porcentaje representa la densidad mínima de la máxima densidad seca (MDS). En la Tabla 4.4 se muestra un resumen de los resultados de MDS, el contenido de humedad óptimo y la relación entre la densidad mínima y MDS para las muestras de relave M-1, M-2 y M-3. Adicionalmente, el reporte de cada uno de los ensayos se encuentra en el Anexo A.4.

Tabla 4.4 Resumen de los resultados de los ensayos Proctor Estándar de las muestras de relaves M-1, M-2 y M-3

Código	MDS (g/cm^3) (2)	OCH (%)	Densidad mínima ($\frac{g}{cm^3}$) (1)	$\frac{(1)}{(2)}$ (%)
M-1	1.938	17.2	1.138	58.7
M-2	1.751	15.4	1.340	76.5
M-3	1.809	13.7	1.472	81.4

Abreviaturas:

MDS: máxima densidad seca; OCH: óptimo contenido de humedad

4.5. ENSAYOS TRIAXIALES NO DRENADOS Y DRENADOS

En Tabla 4.5 se muestra el listado de los ensayos triaxiales que se realizó para las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 que alcanzaron el estado crítico. En el Anexo B se muestra el reporte de todos los ensayos triaxiales, el reporte

fotográfico de los especímenes ensayados y el reporte de las correcciones del esfuerzo desviador por efecto de la membrana.

Es importante recalcar que se realizó varias pruebas de ensayos triaxiales a diferentes estados iniciales para las tres muestras hasta conseguir un estado inicial que permita alcanzar el estado crítico. En el Anexo D se muestra los resultados de estas pruebas.

Tabla 4.5 Resumen de los ensayos triaxiales drenados y no drenados de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 que alcanzaron el estado crítico

Código	Muestra	Ensayo	Confinamiento	Contenido de humedad
M-1	Relave fino	CU	50	5.0
		CU	100	5.0
		CU	200	5.0
		CU	400 ⁽¹⁾	5.0
		CD	200	5.0
		CD	400	5.0
M-2	Relave grueso	CU	50	5.0
		CU	100	5.0
		CU	200	5.0
		CU	300	5.0
		CU	400	5.0
		CD	200 ⁽²⁾	5.0
		CD	400	5.0
M-3	Relave grueso	CU	50	8.0
		CU	100	8.0
		CU	300	8.0
		CU	400	8.0
		CU	600	8.0
		CU	800	8.0
		CD	50	8.0
		CD	200	8.0
CD	400	8.0		

Abreviaturas:

CU: ensayo triaxial consolidado no drenado; CD: ensayo triaxial consolidado drenado

Notas:

1. La muestra M-1 para el confinamiento de 400°kPa en condición no drenada no alcanza el estado crítico para las mismas condiciones iniciales que el resto de los ensayos, probablemente necesita de mayor deformación axial (ver Figura 5.1).
2. El ensayo triaxial de la muestra M-2 en condición drenado de confinamiento de 200°kPa no se consideró para la estimación de la CSL con el fin de obtener un mejor ajuste.

Los resultados de estos ensayos triaxiales mencionados en la Tabla 4.4 se muestra en el capítulo V.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

En este capítulo se da a conocer los resultados de los ensayos de compresión triaxial drenados y no drenados de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 que alcanzaron el estado crítico. Asimismo, se presenta los resultados de la estimación de la curva de estado crítico y la superficie de licuación de flujo para cada una de las muestras en estudio.

5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL DRENADO Y NO DRENADO

Los resultados de los ensayos triaxiales se muestran mediante gráficas, tales como $\sigma_d - \varepsilon$ (esfuerzo desviador - deformación axial), $\Delta u - \varepsilon$ (variación de presión de poros - deformación axial), $\Delta V - \varepsilon$ (variación volumétrica - deformación axial) y $q - p'$ (trayectoria de esfuerzos efectivos) para cada una de las muestras de relave. Tener en cuenta que los reportes de ensayos triaxiales de las tres muestras de relave se encuentran en el Anexo B para una mejor comprensión de los resultados. A continuación, se muestra los resultados de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3.

5.1.1. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-1

Hay que recalcar que la muestra de relave M-1 es de granulometría fina y las condiciones iniciales de densidad seca y contenido de humedad para alcanzar el estado crítico fueron 1.138 g/cm^3 y 5 % respectivamente.

5.1.1.1. Ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU)

La Figura 5.1 muestra el esfuerzo desviador que adquiere la muestra M-1 a medida que se va deformando para confinamientos de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa. Del mismo modo en la Figura 5.2 se presenta la variación de la presión de poro para cada confinamiento. En ambas figuras se observa que la muestra de relave M-1 empieza alcanzar un estado estable para los tres primeros confinamientos a partir de una deformación del 20 %, sin embargo, para el confinamiento de 400 kPa la muestra no logra alcanzar un esfuerzo desviador y poro presión constantes para deformaciones del 25 %; por lo tanto, no se consideró en la estimación de la curva de estado crítico.

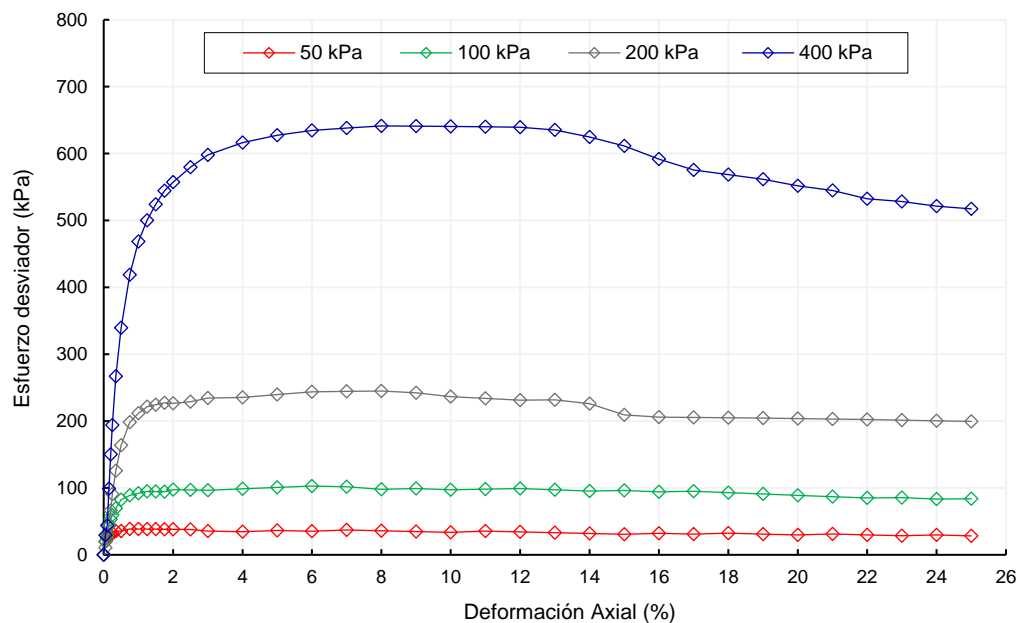


Figura 5.1 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.

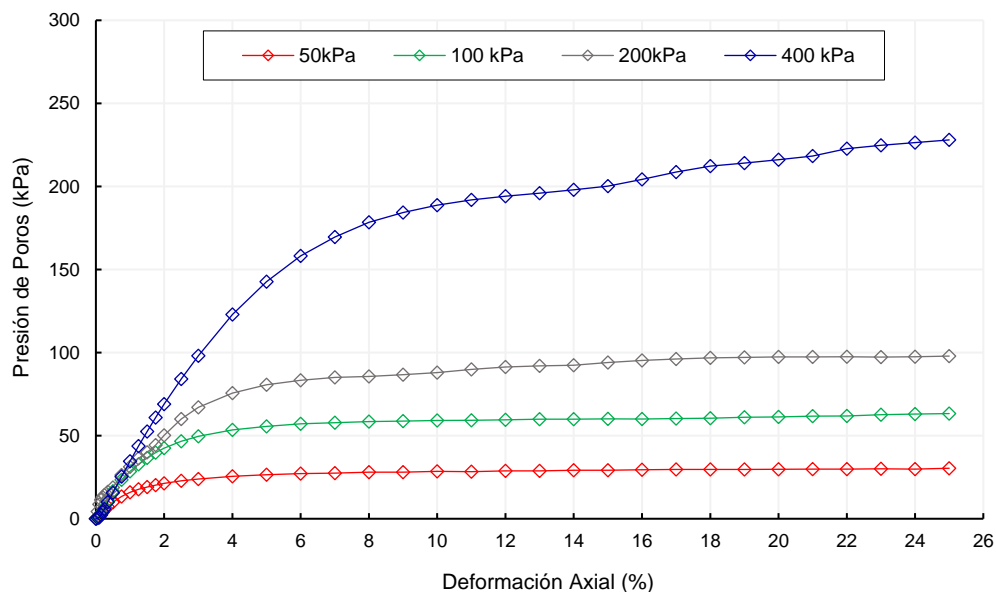


Figura 5.2 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación de 25 %.

5.1.1.2. Ensayo de compresión triaxial consolidado drenado (CD)

Los resultados de los ensayos triaxiales drenados para la muestra M-1 se presentan en las Figuras 5.3 y 5.4. En la primera se muestra el esfuerzo desviador que soporta la muestra de relave para confinamientos de 200 kPa y 400 kPa; y en la segunda figura se muestra la variación volumétrica de la muestra de relave para las mismas presiones de confinamiento.

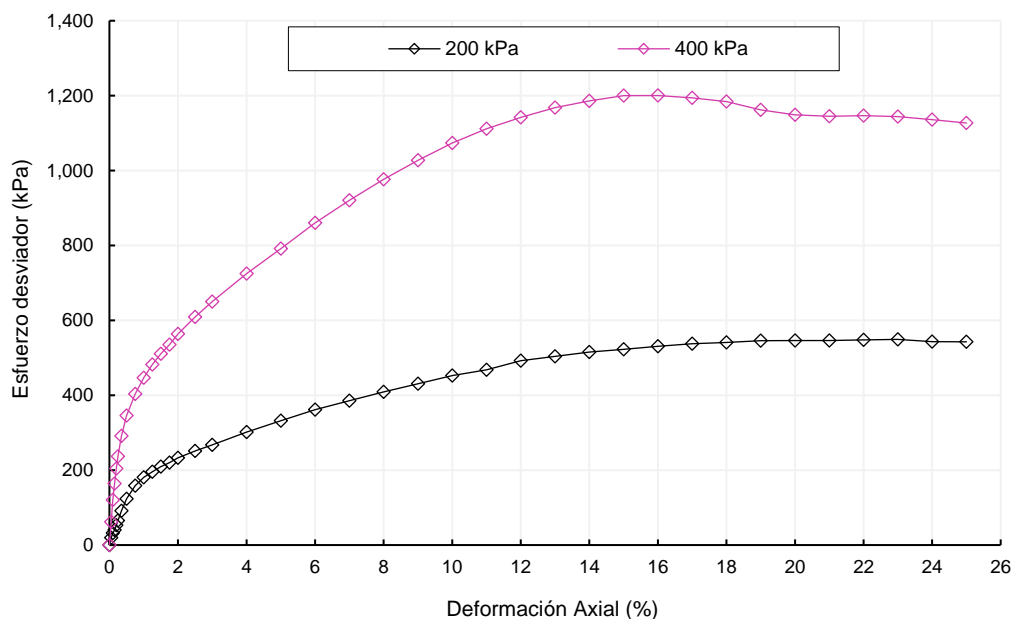


Figura 5.3 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.

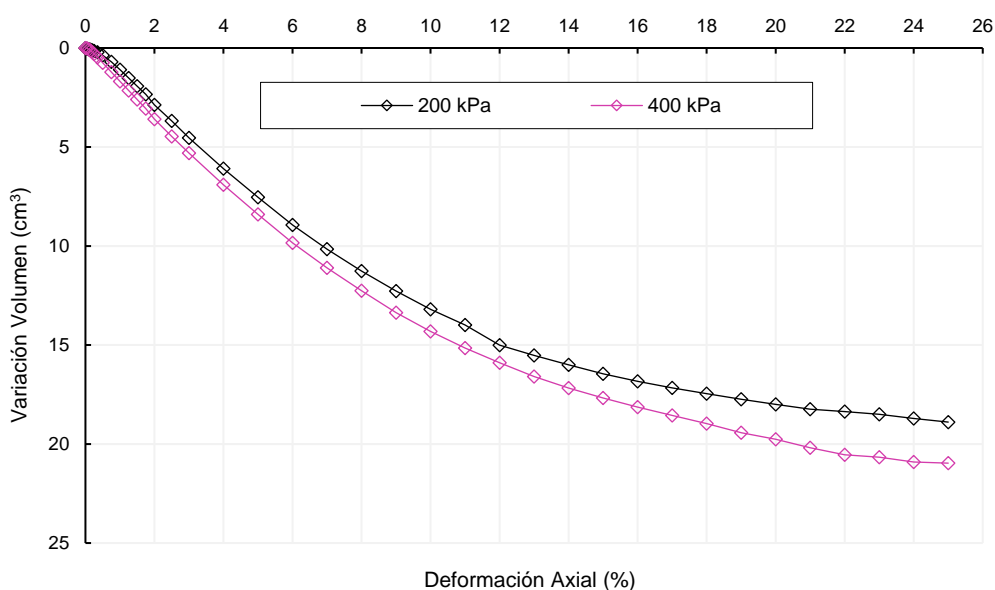


Figura 5.4 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-1 hasta una deformación del 25 %.

En ambas figuras se observa que la muestra de relave M-1 alcanza el estado crítico a partir del 20 % de deformación axial, es decir, se observa el esfuerzo desviador y variación volumétrica constantes a partir del 20 % de deformación.

5.1.1.3. Trayectoria de los esfuerzos efectivos

A continuación, se muestra la gráfica p'-q' que representa la trayectoria de esfuerzos efectivos de la muestra de relave M-1 en las condiciones no drenado y drenado.

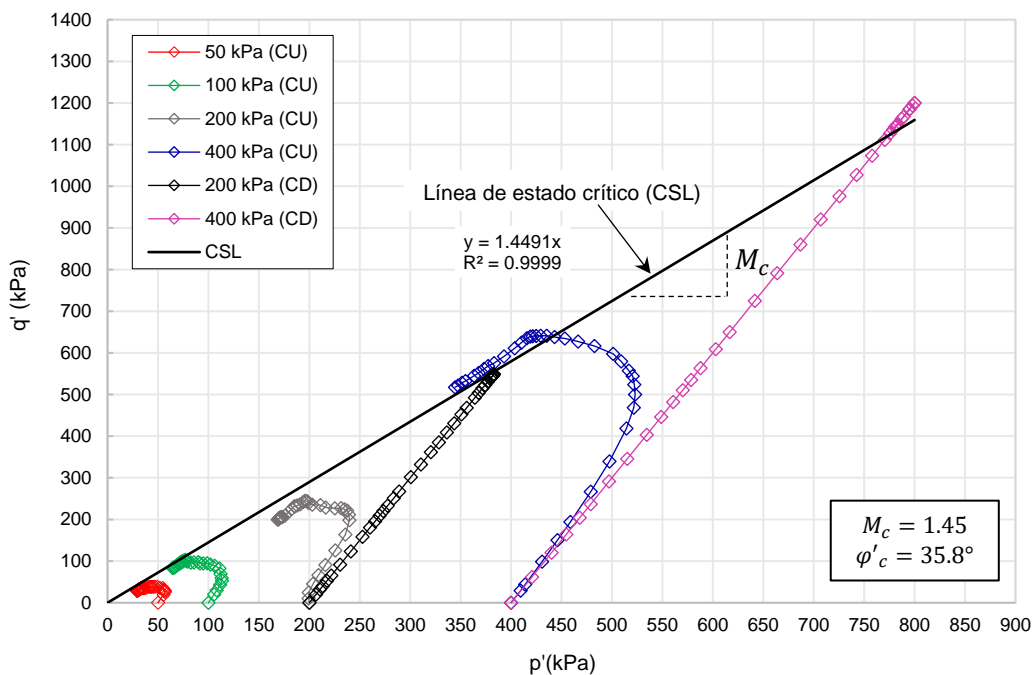


Figura 5.5 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de las muestras de relave M-1.

En la Figura 5.5 se observa el desarrollo de las trayectorias de esfuerzos para la condición drenado y no drenado hasta alcanzar la recta de pendiente M_c , que pasa por el origen, llamada línea de estado crítico (CSL). No obstante, para el confinamiento de 200 kPa en condición no drenada la muestra no logra desarrollarse hasta alcanzar la línea de estado crítico, este comportamiento se comprueba con la Figura 5.16 de la curva de estado crítico de la muestra de relave M-1.

Tener en cuenta que para el trazo de la línea de estado crítico solo se consideró los ensayos triaxiales CU de 50 kPa y 100 kPa, y los triaxiales CD de 200 kPa y 400 kPa de confinamientos, ya que son los que alcanzaron el estado crítico.

5.1.2. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-2

La muestra de relave M-2 es de granulometría gruesa y las condiciones iniciales de densidad mínima y contenido humedad al que fueron ensayadas para alcanzar el estado crítico fueron 1.34 g/cm^3 y 5 % respectivamente.

5.1.2.1. Ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU)

En la siguiente figura se observa un comportamiento de ablandamiento de la muestra de relave M-2 para confinamientos de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa y 400 kPa hasta una deformación axial del 25 %.

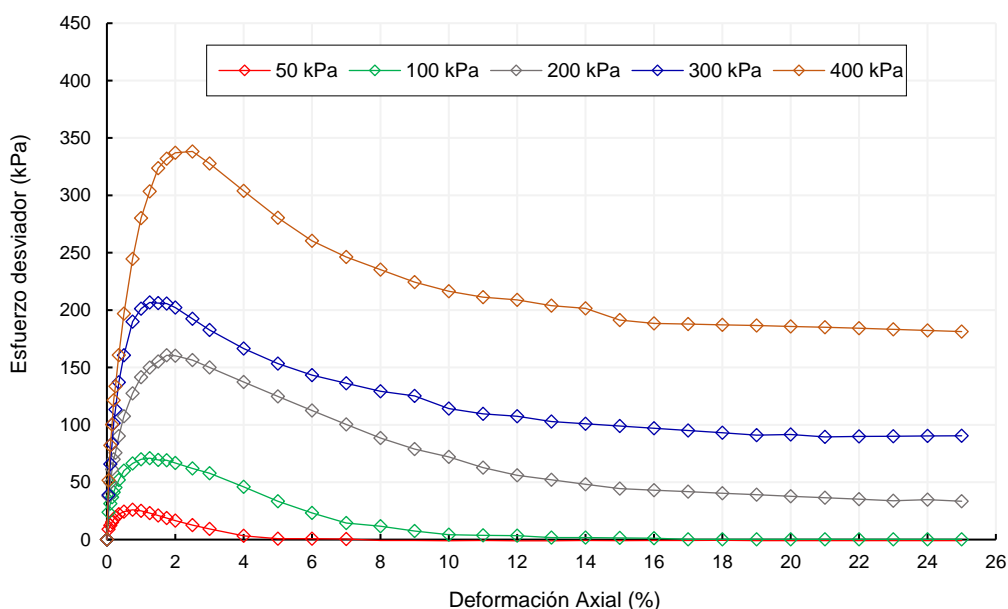


Figura 5.6 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.

Además, se observa que la muestra de relave presenta licuación estática (esfuerzo desviador nulo) para confinamientos de 50 kPa y 100 kPa, esto se debe a la aplicación de bajas presiones de confinamientos a la muestra en una condición de densidad suelta; por lo tanto, no fueron considerados en la estimación de la curva de estado crítico. En cambio, para los confinamientos de 200 kPa, 300 kPa y 400 kPa la muestra de relave alcanza el estado crítico a partir del 16 % de deformación.

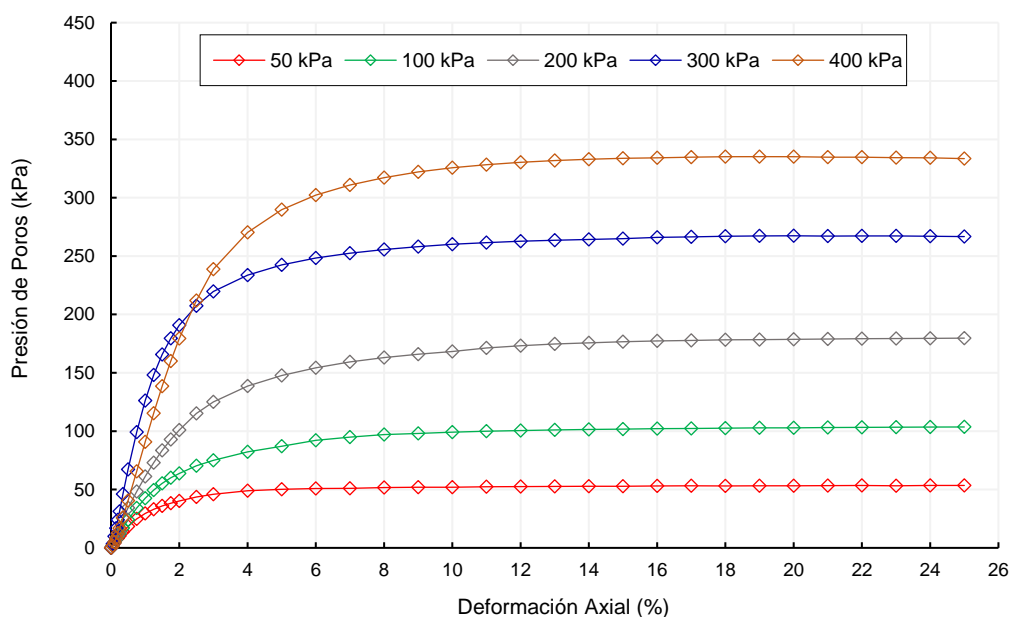


Figura 5.7 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación de 25 %.

Asimismo, en la Figura 5.7 se muestra la presión de poros para cada presión de confinamiento y mantiene un valor constante a partir del 16 % de deformación.

5.1.2.2. Ensayo de compresión triaxial consolidado drenado (CD)

Para la muestra de relave M-2 se realizaron dos ensayos triaxiales drenados de confinamientos de 200 kPa y 400 kPa. En la Figura 5.8 se presenta el esfuerzo desviador para los dos confinamientos hasta un 25 % de deformación, asimismo, en la Figura 5.9 se muestra la variación volumétrica para ambos confinamientos hasta una deformación del 25 %. En ambas figuras se observa que la muestra de relave M-2 alcanza un estado estable a partir del 22 % de deformación, es decir, alcanza el estado crítico. No obstante, el ensayo de 200 kPa de confinamiento no se consideró para el ajuste de la curva de estado crítico, ya que el resultado de la relación de vacío crítico se encuentra muy disperso al resto de los resultados (ver Anexo C.2).

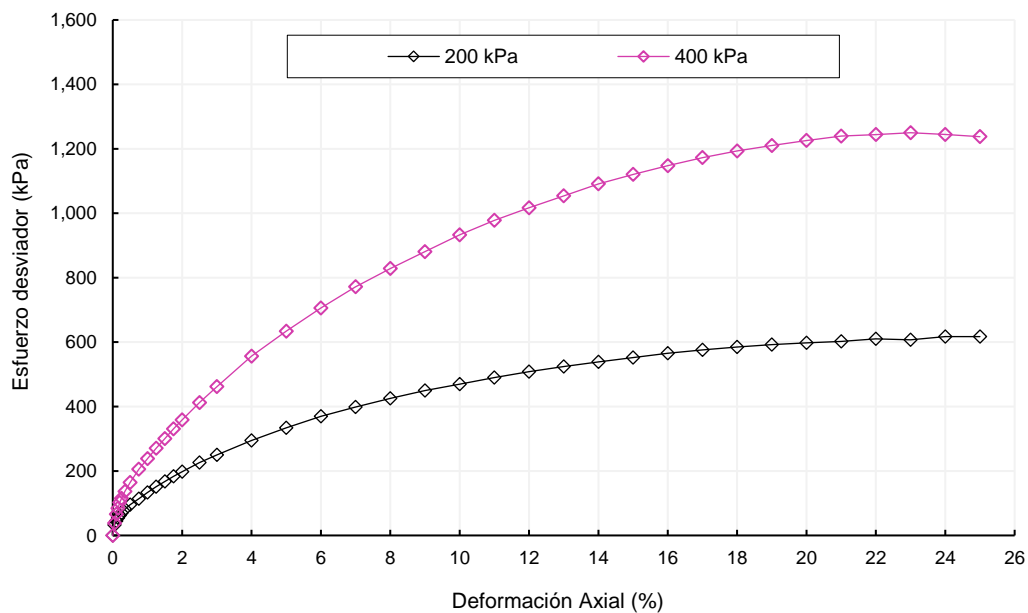


Figura 5.8 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.

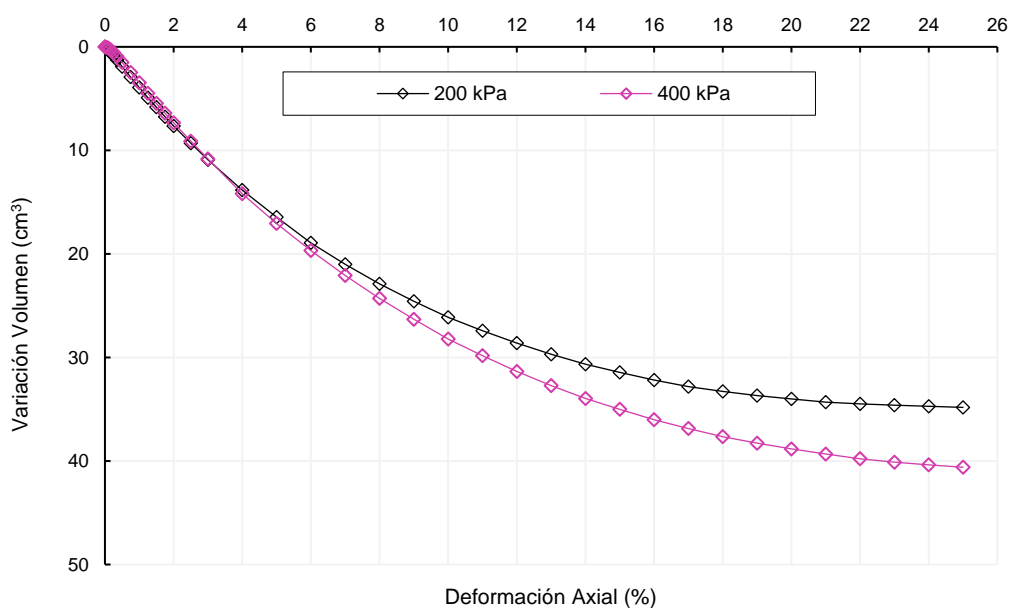


Figura 5.9 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-2 hasta una deformación del 25 %.

5.1.2.3. Trayectoria de los esfuerzos efectivos

En la Figura 5.10 se presenta el desarrollo de los esfuerzos efectivos de la muestra de relave M-2 en condiciones no drenado y drenado. Para la condición no drenado se tiene confinamientos de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa y 400 kPa; y para la condición drenado confinamientos de 200 kPa y 400 kPa. Asimismo, se observa

en ambas condiciones de ensayo y para cada presión de confinamiento que la muestra de relave M-2 tiende hacia la línea de estado crítico.

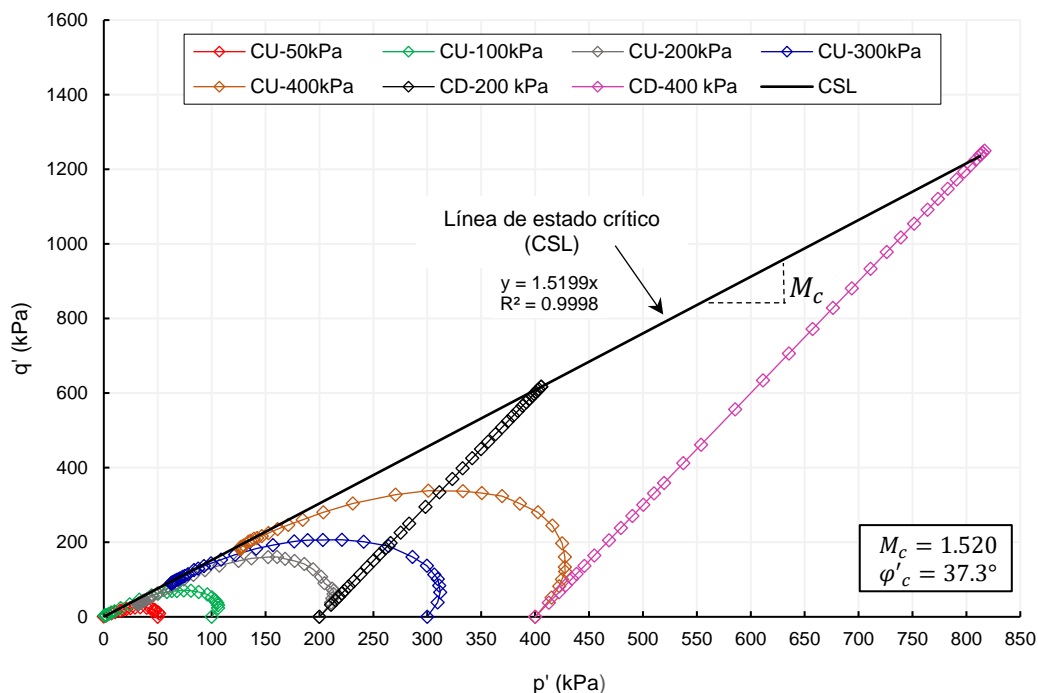


Figura 5.10 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de la muestra de relave M-2.

La línea de estado crítico en el plano p' - q' pasa por el origen y tiene una pendiente M_c , y mediante la ecuación descrita en el ítem 3.4.3.2 se calculó el ángulo de fricción crítico (ϕ'_c).

5.1.3. Resultados de los ensayos de compresión triaxial de la muestra de relave M-3

La muestra de relave M-3 es de granulometría gruesa y las condiciones iniciales de densidad mínima y contenido humedad al que fueron ensayadas para alcanzar el estado crítico fueron 1.47 g/cm^3 y 8% respectivamente.

5.1.3.1. Ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU)

La muestra de relave M-3 presenta un comportamiento de ablandamiento en la condición no drenada para las presiones de confinamiento de 50 kPa, 100 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 600 kPa y 800 kPa. Para los confinamientos de 50 kPa y 100 kPa el esfuerzo desviador es prácticamente nulo para grandes deformaciones, así que no aportan a la estimación de la curva de estado crítico. En cambio, para los confinamientos de 300 kPa, 400 kPa, 600 kPa y 800 kPa el

valor del esfuerzo desviador se vuelve constante a grandes deformaciones, en otras palabras, se alcanza el estado crítico (ver Figura 5.11).

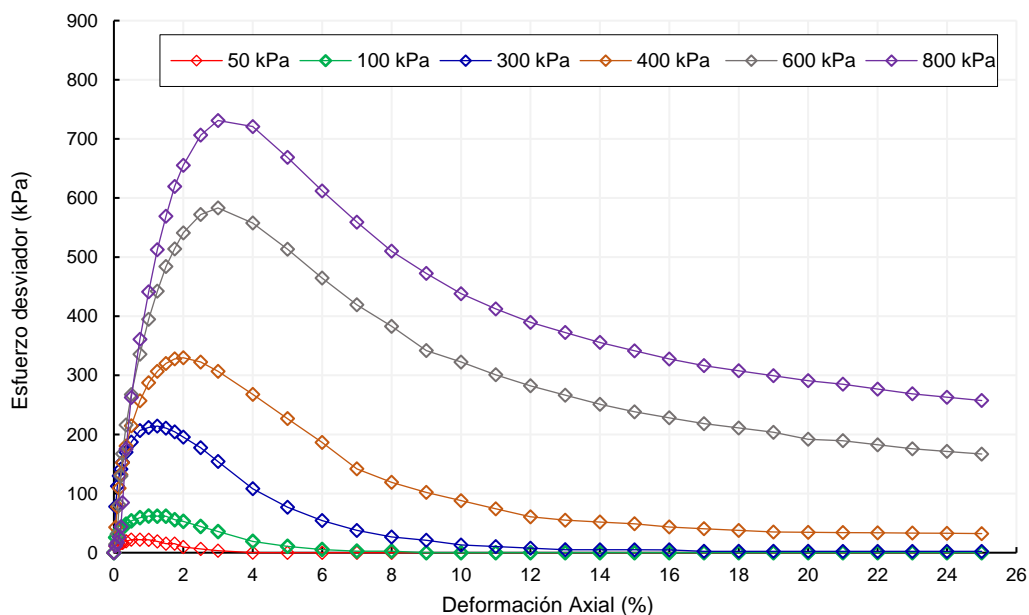


Figura 5.11 Ensayo triaxial CU: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.

Por otro lado, en la Figura 5.12 se muestra la presión de poros que adquiere la muestra de relave para cada presión de confinamiento. Además, se observa que las presiones de poros presentan valores constantes para deformaciones mayores al 20 %.

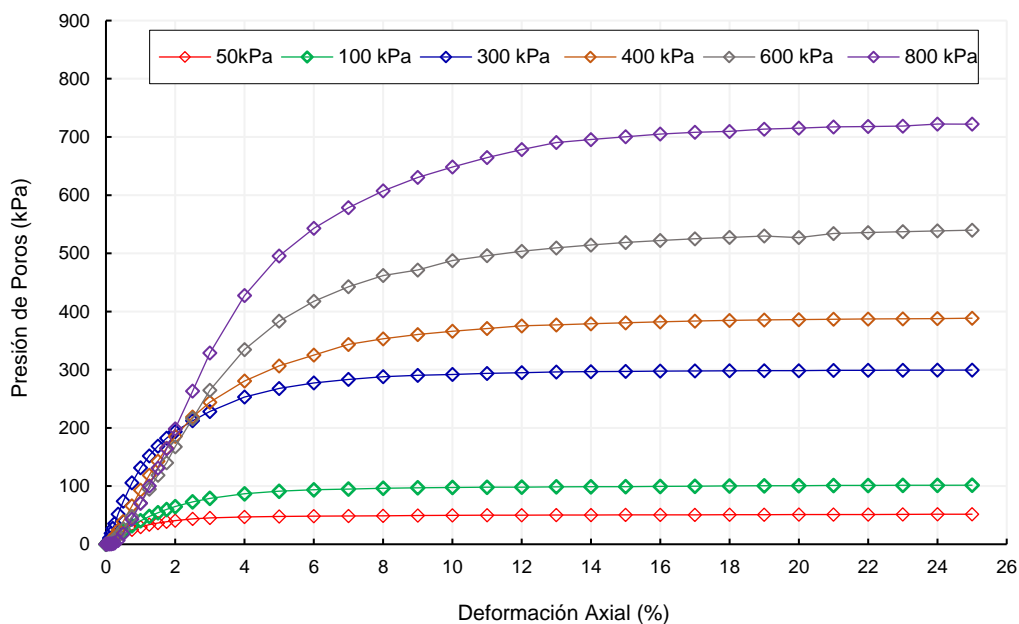


Figura 5.12 Ensayo triaxial CU: Presión de poros – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación de 25 %.

5.1.3.2. Ensayo de compresión triaxial consolidado drenado (CD)

En este caso se realizaron tres ensayos triaxiales drenados para la muestra de relave M-3 con presiones de confinamiento de 50 kPa, 200 kPa y 400 kPa para un mejor ajuste de la curva de estado crítico. En la Figura 5.13 se observa el desarrollo del esfuerzo desviador para cada presión de confinamiento hasta alcanzar un valor constante, a partir del 22 % de deformación. Por otro lado, en la Figura 5.14 se presenta la variación de volumen que sufre la muestra de relave a medida que se va deformando hasta alcanzar un estado estable, es decir, el cambio de volumen permanece constante a partir del 22 % de deformación.

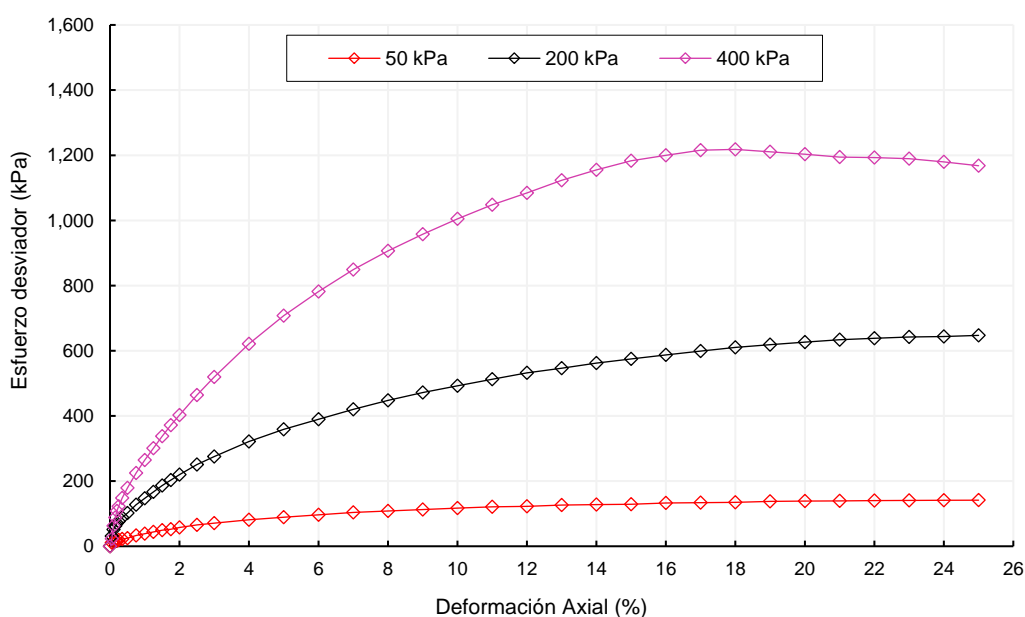


Figura 5.13 Ensayo triaxial CD: Esfuerzo desviador – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.

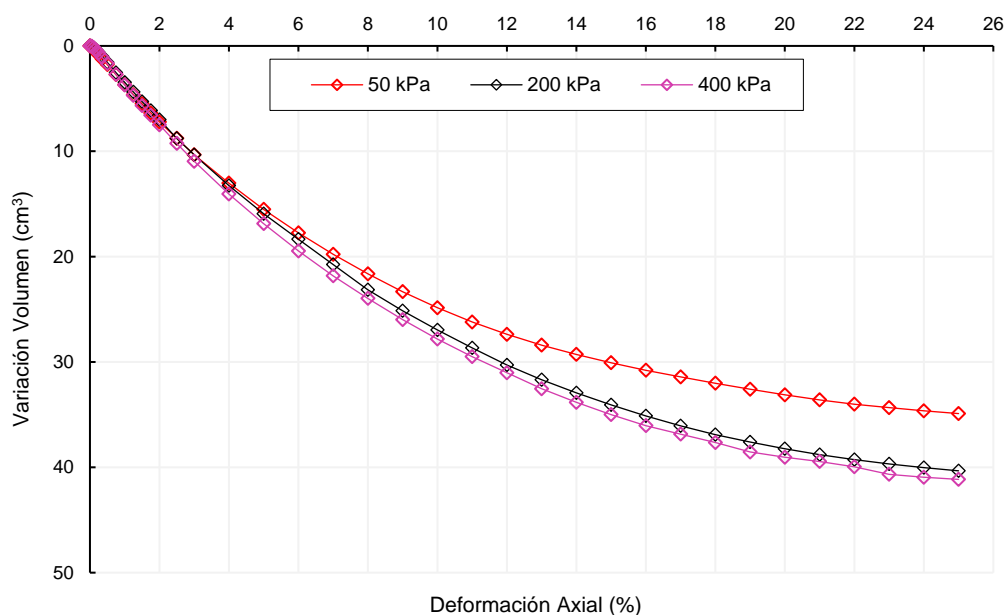


Figura 5.14 Ensayo triaxial CD: Variación volumétrica – Deformación axial de la muestra de relave M-3 hasta una deformación del 25 %.

5.1.3.3. Trayectoria de los esfuerzos efectivos

La siguiente gráfica muestra el desarrollo de los esfuerzos efectivos de la muestra de relave M-3 en condición drenado y no drenado para cada presión de confinamiento. Para la condición no drenada se tiene confinamientos de 50 kPa, 100 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 600 kPa y 800 kPa; mientras que para la condición drenada se tiene confinamientos de 50 kPa, 200 kPa y 400 kPa.

En la Figura 5.15 se observa que las trayectorias de esfuerzo se desarrollan hasta alcanzar un estado estable representada por una recta denominada línea de estado crítico. Esta recta pasa por el origen con una pendiente M_c , además, mediante ecuaciones algebraicas se obtiene el ángulo de fricción en el estado crítico.

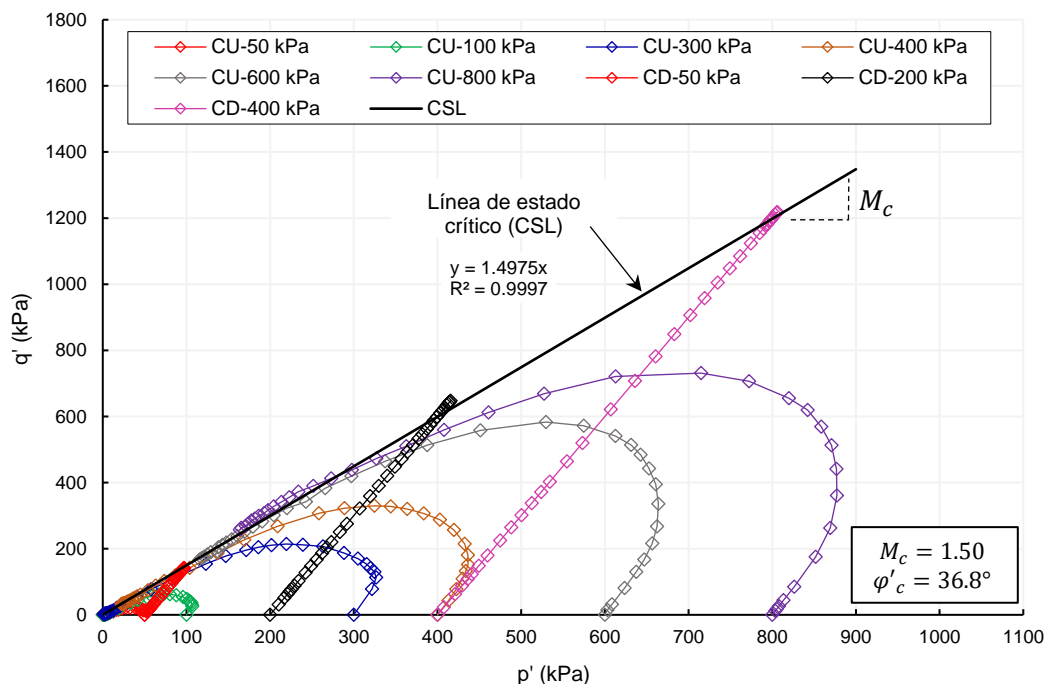


Figura 5.15 Trayectoria de esfuerzos efectivos para condiciones no drenadas y drenadas de la muestra de relave M-3.

Por otro lado, es importante mencionar que los valores del esfuerzo desviador plasmados en las figuras anteriores fueron calculados considerando dos aspectos: 1) el efecto del uso de la membrana y 2) la variación de altura del espécimen en el proceso de saturación. El primero considera la corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana y fue aplicado principalmente a los ensayos triaxiales no drenado porque la relación del esfuerzo desviador por el uso de membrana respecto al obtenido en los ensayos superaba el 5%, esto se debe a la condición inicial de densidades bajas al que fueron ensayadas las muestras de relave. Y el segundo, considera medir las variaciones de altura que sufre el espécimen en el proceso de saturación para calcular correctamente la altura del espécimen al final del proceso de consolidación, ya que este último se utiliza en los cálculos del esfuerzo desviador. La finalidad de estas dos consideraciones es obtener resultados precisos del esfuerzo promedio efectivo en el estado crítico.

En el Anexo B se presentan los reportes de las correcciones por efecto de la membrana para cada ensayo triaxial y en el Anexo C, se muestra las tablas resumen de las variaciones de altura en el proceso de saturación y consolidación de los especímenes para cada muestra de relave.

5.2. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE ESTADO CRÍTICO

En este ítem se muestra los resultados de la estimación de la curva de estado crítico de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3. Hay que recalcar que para estimar la curva es necesario calcular la relación de vacío en el estado crítico, para tal fin se congeló el espécimen al finalizar el ensayo triaxial y se usó las expresiones algebraicas descrita en el ítem 3.4.3.1. En el Anexo C se encuentra el reporte de los resultados de la relación de vacío crítico, de las dimensiones geométricas del espécimen en la etapa de reconstitución, saturación y consolidación, y el reporte de las gráficas de las curvas de estado crítico de las tres muestras de relave en estudio.

5.2.1. Curva de estado crítico de la muestra de relave M-1, M-2 y M-3

Los resultados de la relación de vacío en la etapa final de consolidación y en el estado crítico para cada uno de los ensayos triaxiales se muestran en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 que corresponde a las muestras M-1, M-2 y M-3 respectivamente. Estos resultados son graficados para estimar la curva de estado crítico (ver Figura 5.16, 5.17 y 5.18).

Tabla 5.1 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-1

N°	Tipo de ensayo triaxial	Etapa final de consolidación		Estado crítico	
		Presión de confinamiento (kPa)	$e_{fcons.}$	Esfuerzo efectivo promedio (kPa)	e_c
1	CU	50	1.052	29.06	1.052
2	CU	100	0.950	64.62	0.950
3	CU	200	0.890	168.62	0.890
4	CD	200	0.826	380.84	0.736
5	CD	400	0.733	776.05	0.633

Abreviaturas:

$e_{fcons.}$: Relación de vacío en la etapa final de consolidación

e_c : Relación de vacío en el estado crítico

Tabla 5.2 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-2

N°	Tipo de ensayo triaxial	Etapa final de consolidación		Estado crítico	
		Presión de confinamiento (kPa)	$e_{fcons.}$	Esfuerzo efectivo promedio (kPa)	e_c
1	CU	50	0.943	(ver Nota 1)	0.943
2	CU	100	0.851	(ver Nota 1)	0.851
3	CU	200	0.843	31.376	0.843
4	CU	300	0.794	63.446	0.794
5	CU	400	0.762	126.885	0.762
6	CD	400	0.819	810.962	0.673

Abreviaturas: $e_{fcons.}$: Relación de vacío en la etapa final de consolidación e_c : Relación de vacío en el estado crítico**Notas:**

1. El esfuerzo efectivo promedio de los ensayos triaxiales es prácticamente cero, por lo tanto, no se consideró en la estimación de la curva de estado.

Para condiciones no drenadas de confinamiento de 50 kPa y 100 kPa la muestra de relave M-2 sufre el fenómeno de la licuación estática como se observa en las Figura 5.6 y 5.10. Por ende, el esfuerzo efectivo promedio en estado crítico es cero, lo cual no se consideró para la estimación de curva de estado crítico. De la misma forma ocurre con la muestra de relave M-3 para las mismas condiciones de presión de confinamiento (ver Figura 5.11 y 5.15).

Tabla 5.3 Resultados de la relación de vacío en la etapa de consolidación y estado crítico para cada tipo de ensayo triaxial de la muestra de relave M-3

N°	Tipo de ensayo triaxial	Etapa final de consolidación		Estado crítico	
		Presión de confinamiento (kPa)	$e_{fcons.}$	Esfuerzo efectivo promedio (kPa)	e_c
1	CU	50	0.769	(ver Nota 1)	0.769
2	CU	100	0.735	(ver Nota 1)	0.735
3	CU	300	0.685	3.126	0.685
4	CU	400	0.683	16.707	0.683

5	CU	600	0.665	110.190	0.665
6	CU	800	0.641	158.016	0.641
7	CD	50	0.777	91.670	0.664
8	CD	200	0.722	415.635	0.592
9	CD	400	0.701	789.370	0.568

Abreviaturas:

$e_{fcons.}$: Relación de vacío en la etapa final de consolidación

e_c : Relación de vacío en el estado crítico

Nota:

1. El esfuerzo efectivo promedio de los ensayos triaxiales es prácticamente cero; por tanto, no se consideró en la estimación de la curva de estado.

A continuación, se muestra las curvas de estado crítico de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 (ver las Figura 5.16, 5.17 y 5.18). Los puntos rojos representan el estado inicial de la muestra, es decir, el estado inicial de corte o el estado final de consolidación, mientras que los puntos azules representan el estado final o estado crítico que alcanza la muestra de relave para cierta presión de confinamiento.

Como se observa en las Figura 5.16, 5.17 y 5.18 para los ensayos triaxiales en condiciones no drenadas no existe cambio volumétrico de la muestra en el proceso de corte, por ende, la relación de vacío se mantiene constante desde la etapa inicial hasta la etapa final. Sin embargo, para los ensayos triaxiales en condiciones drenadas se produce un cambio volumétrico de la muestra en el proceso de corte, generando una relación de vacío menor en estado final respecto al estado inicial.

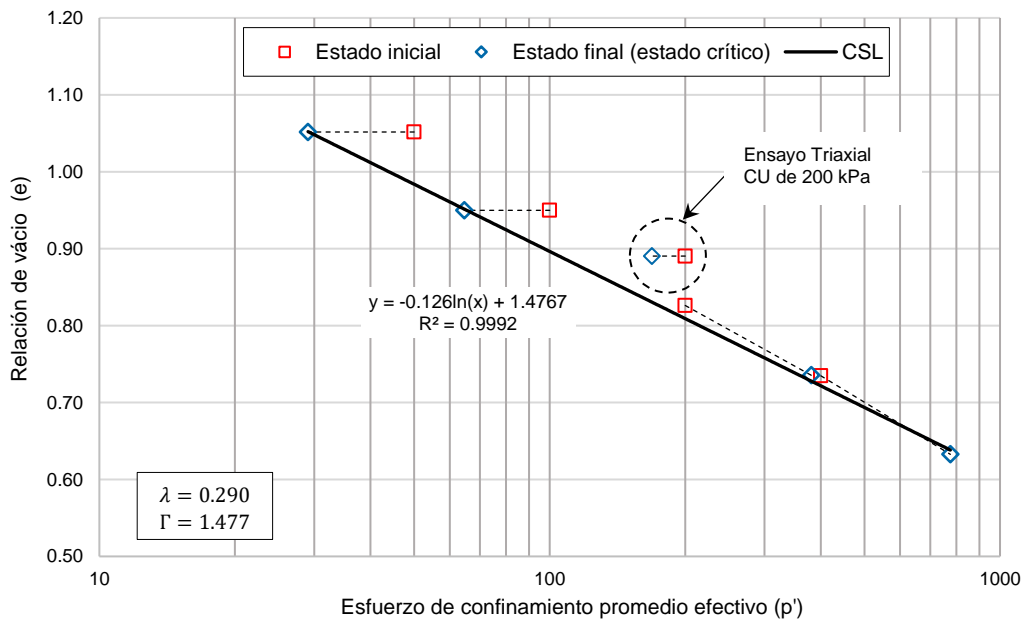


Figura 5.16 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-1.

En la Figura 5.16 se observa que la muestra de relave M-1 no logra alcanzar el estado crítico para el confinamiento de 200 kPa en condición no drenado; por lo tanto, no se consideró para el trazo de la línea de estado crítico.

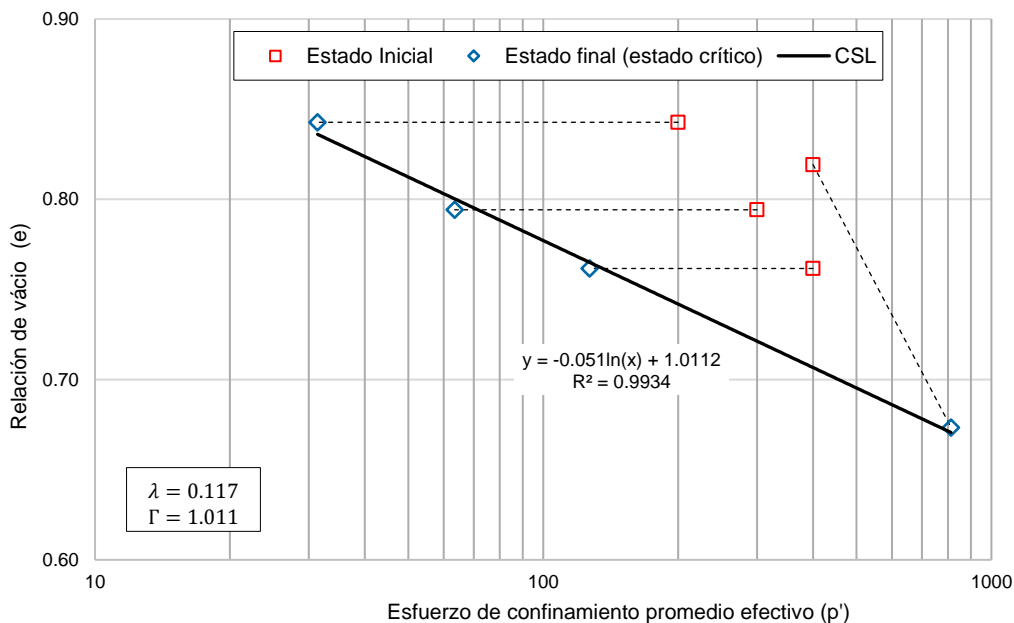


Figura 5.17 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-2.

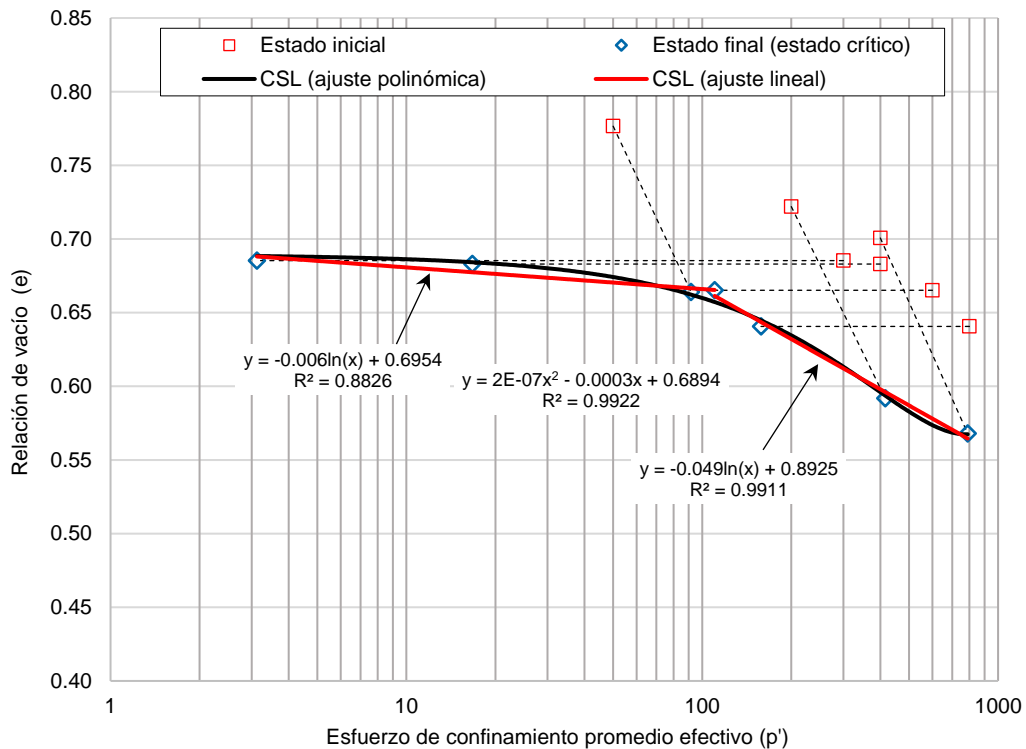


Figura 5.18 Curva de estado crítico de la muestra de relave M-3.

Convencionalmente, la curva de estado crítico en escala semi logarítmica es una recta como se muestra en las Figura 5.16 y 5.17 la cual es representada por la siguiente ecuación.

$$e_c = \Gamma - \lambda \ln(p'_c) \tag{5.1}$$

Donde λ y Γ son parámetros que definen a la línea de estado crítico, e_c es la relación de vacío crítico para cierto esfuerzo promedio efectivo (p'_c).

Sin embargo, para la muestra de relave M-3 la curva de estado crítico presenta un mejor ajuste por una curva (ver Figura 5.18), asimismo, se puede observar en la gráfica que se puede ajustar linealmente en dos tramos. Ambos ajustes son válidos y la elección dependerá del uso de la curva de estado crítico. Por ejemplo, en el marco teórico de los modelos constitutivos relacionado al estado crítico es recomendable usar el ajuste lineal, ya que la curva de estado crítico está definida por la ecuación 5.1.

Por otro lado, los parámetros λ , Γ y M_c son denominados parámetros en el estado crítico. En la Tabla 5.4 se muestra los valores de estos parámetros para cada una de las muestras de relave, asimismo, se muestra el ángulo de fricción crítico (ϕ'_c).

Tabla 5.4 Parámetros de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 en el estado crítico

Tipo de muestra	Parámetros en el estado crítico			Ángulo de fricción crítico	
	Γ	$\lambda_{10}^{(1)}$	M_c	φ'_c (°)	
M-1	1.477	0.290	1.45	35.8	
M-2	1.011	0.117	1.52	37.3	
Ajuste no lineal	0.689	0.113 ⁽²⁾	1.50	36.8	
M-3	Ajuste lineal	0.695	0.014	1.50	36.8
	Ajuste lineal	0.893	0.113	1.50	36.8

Nota:

(1) El parámetro λ se expresa en base 10 ($\lambda_{10} = 2.303 \lambda$) por tratarse de un tema experimental y no de un modelo constitutivo.

(2) Considerando la parte lineal de la curva en el rango de $100 \text{ kPa} < p' < 400 \text{ kPa}$.

Tener en cuenta que el proceso de congelamiento de las muestras es muy importante para estimar la curva de estado crítico, en esta investigación a modo de prueba se ploteó los resultados de algunos ensayos triaxiales, los cuales no fueron congelados para calcular la relación de vacío crítico. A continuación, se muestran tales resultados en las Figuras 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21 para las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 respectivamente. Además, se muestran algunos ensayos triaxiales repetidos (en las mismas condiciones de densidad y humedad) con la finalidad de corroborar los resultados y obtener un mejor ajuste de la CSL.

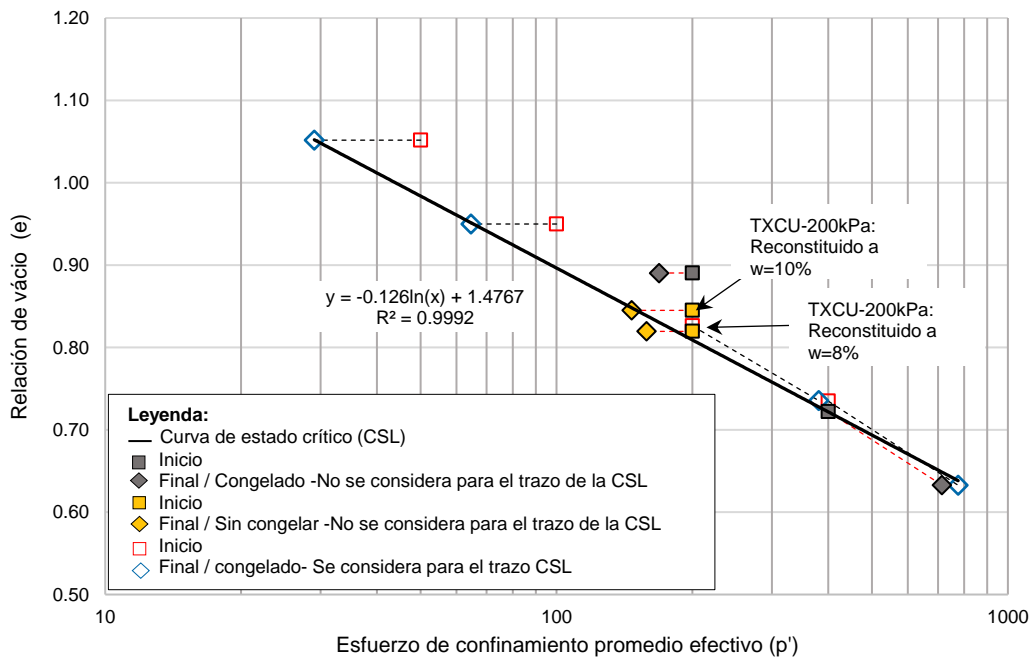


Figura 5.19 CSL de la muestra de relave M-1 con ensayos adicionales de especímenes no congelados. Los puntos de color plomo corresponden a los ensayos triaxiales repetidos a 5 % de contenido de humedad, pero no se está considerando en el ajuste de CSL. Los puntos de color amarillo corresponden a los ensayos triaxiales a 8 % y 10 % de contenido de humedad no congelados.

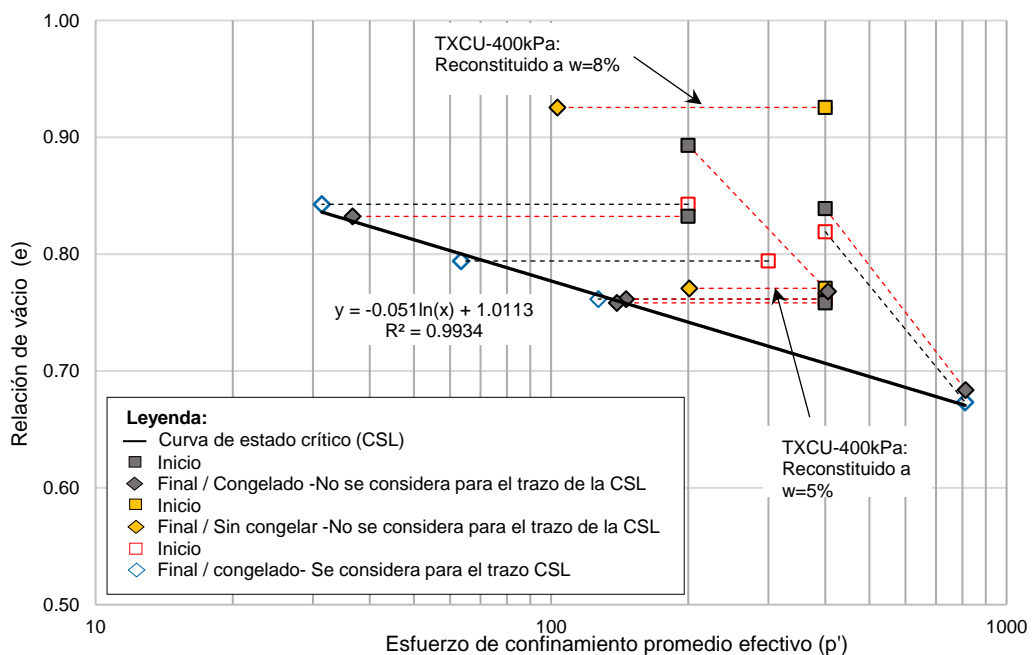


Figura 5.20 CSL de la muestra de relave M-2 con ensayos adicionales de especímenes no congelados. Los puntos de color plomo corresponden a los ensayos triaxiales repetidos a 5 % de contenido de humedad, pero no se está considerando en el ajuste de CSL. Los puntos de color amarillo corresponden a los ensayos triaxiales a 5 % y 8 % de contenido de humedad, estos no fueron congelados.

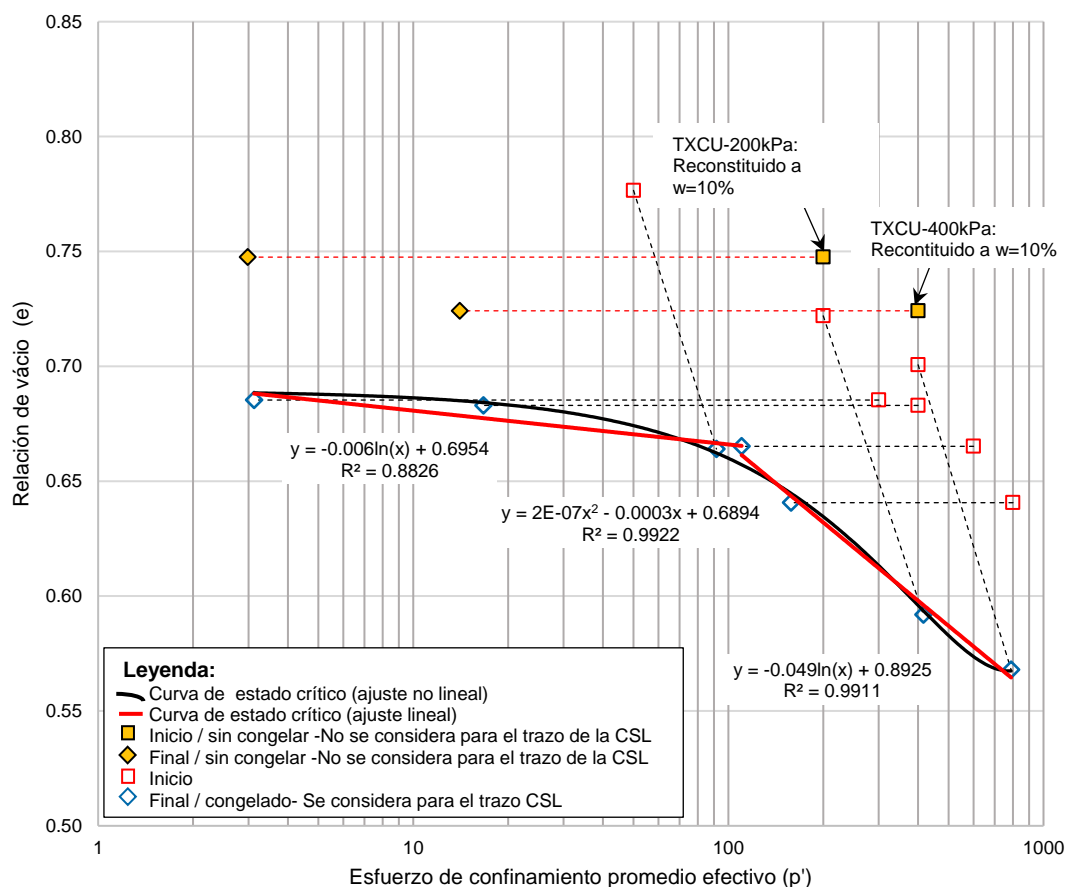


Figura 5.21 CSL de la muestra de relave M-3 con ensayos adicionales de especímenes no congelados. Los puntos de color amarillo corresponden a los ensayos triaxiales a 10 % de contenido de humedad, estos no fueron congelados.

5.2.2. Superficie de licuación por flujo (FLS)

Se trazó la superficie de licuación por flujo para las muestras de relave de granulometría gruesa M-2 y M-3 debido a que presentan un comportamiento de ablandamiento en su resistencia a partir de deformaciones pequeñas de 1 % como se muestra en las gráficas 5.6 y 5.11. Tener en cuenta que solo se considera los ensayos triaxiales en condiciones no drenados para el trazo de la FLS, ya que este representa el límite entre un estado estable e inestable de esfuerzos no drenados para desencadenar la posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación por flujo. En la Figura 5.22 y 5.23 se muestra la FLS para las muestras M-2 y M-3 respectivamente, además en la Tabla 5.5 se muestra la pendiente de la FLS para cada una de las muestras de relave.

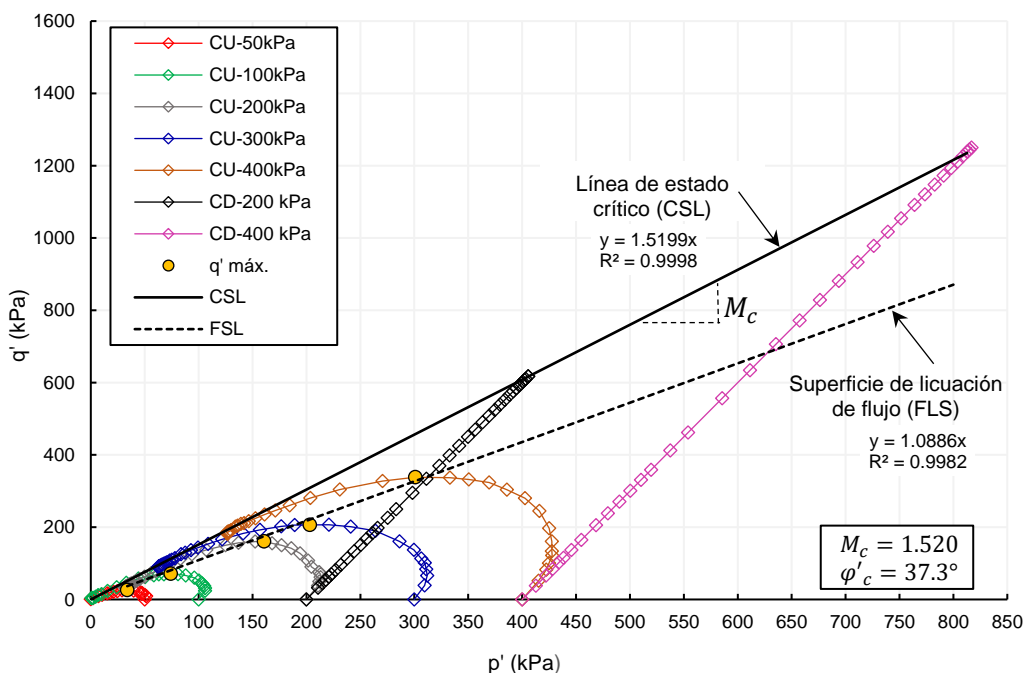


Figura 5.22 Trazo de la superficie de licuación de flujo para la muestra de relave grueso M-2.

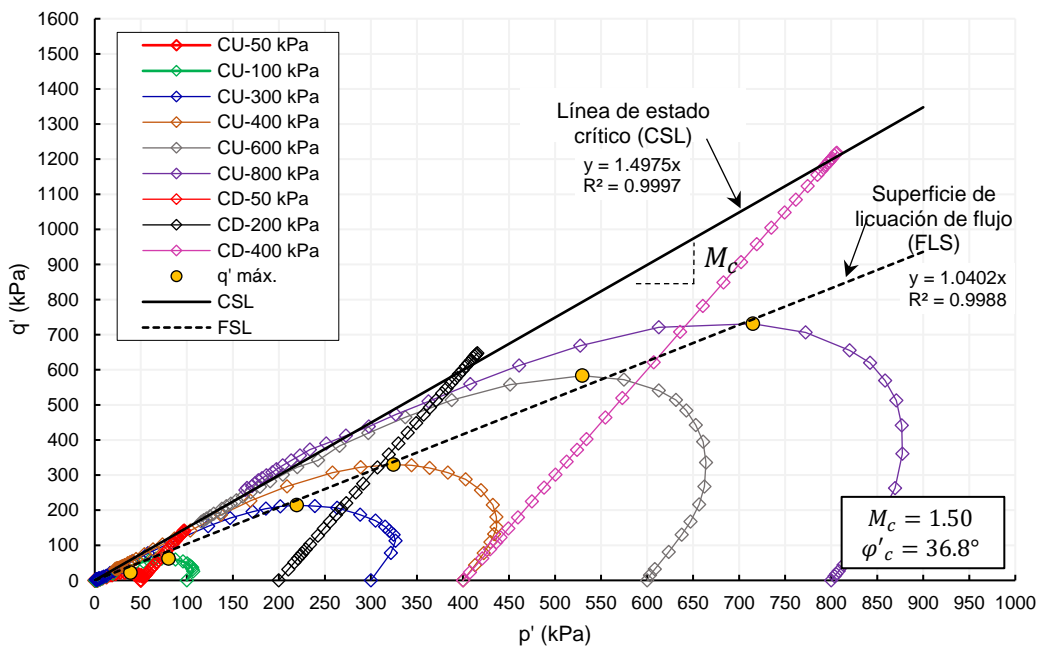


Figura 5.23 Trazo de la superficie de licuación de flujo para la muestra de relave grueso M-3.

En la Tabla 5.5 se muestra el resumen de los valores de la pendiente de la superficie de licuación de flujo (FSL) para las muestras de relaves M-2 y M-3.

Tabla 5.5 Resumen de los parámetros de la FLS de las muestras de relave grueso M-2 y M-3

Código	Muestra	pendiente de superficie de licuación por flujo
M-2	Relave grueso	1.089
M-3	Relave grueso	1.040

En ambas figuras se observa dos etapas del desarrollo de esfuerzos efectivos, en la primera etapa se presenta a pequeñas deformaciones una generación de exceso de presión de poro suficiente para mover la trayectoria de esfuerzo desde su posición inicial hasta la FLS generando inestabilidad en la resistencia no drenada, iniciándose así la segunda etapa, el cual implica el desarrollo de grandes deformaciones y disminución de los esfuerzos efectivos hasta alcanzar el estado estable debido a la generación adicional de la presión de poro impulsado por los esfuerzos cortantes estáticos.

La FLS nos permitirá evaluar las condiciones de inicio de la licuación por flujo de las muestras de relave M-2 y M-3 en su estado in situ, es decir, si la condición de esfuerzo cortante inicial de las muestras de relave en estudio se encuentra más lejos de la FLS mayor será la resistencia a la licuación, mientras si la condición de esfuerzo cortante inicial se encuentra muy cerca del FLS bastará un pequeño exceso de presión de poros para generar la licuación por flujo.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados de la presente tesis se resaltan las siguientes conclusiones:

- Se estimó la curva de estado crítico para tres muestras de relaves empleando el equipo triaxial estándar instrumentado, una de ellas de granulometría fina (M-1) y las dos restantes de granulometría gruesa (M-2 y M-3).
- La implementación del equipo triaxial estándar con el sensor de carga interna, modificación del pedestal y el uso del adquisidor de datos en tiempo real permitió estimar la curva de estado crítico de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 con mejor precisión.
- Se logró la reconstitución de las muestras de relave a densidades bajas, la muestra M-1 se reconstituyó a una densidad seca de 1.138 g/cm^3 y contenido de humedad de 5 %, la muestra M-2 a una densidad seca de 1.340 g/cm^3 y contenido de humedad de 5 % y la muestra M-3 se reconstituyó a una densidad seca de 1.472 g/cm^3 y contenido de humedad de 8 %; estas asignaciones de humedad para cada una de las muestras de relave permitieron alcanzar el estado crítico.
- Se realizó los ensayos triaxiales drenados y no drenados consolidados isotrópicamente hasta el 25% de deformación axial para alcanzar el estado crítico.
- El proceso de congelamiento de las muestras de relave, después de ser ensayadas por corte, permitió determinar con mejor precisión la relación de vacío crítico para las muestras M-1, M-2 y M-3 para estimar sus respectivas curvas de estado crítico, como se muestra en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.
- La muestra de relave M-1 de granulometría fina alcanzó el estado crítico a partir del 20 % de deformación axial en condición drenada y no drenada.
- La muestra de relave M-2 de granulometría gruesa alcanzó el estado crítico en condición no drenada a partir del 16 % de deformación axial y en condición drenada a partir del 22 % de deformación axial.
- La muestra de relave M-3 de granulometría gruesa alcanzó el estado crítico en condición no drenada a partir del 20 % de deformación axial y en condición drenada a partir del 22 % de deformación axial.

- Las velocidades aplicadas en los ensayos triaxiales no drenadas y drenadas de 0.250 mm/min y 0.125 mm/min respectivamente, permitieron que las muestras logren alcanzar el estado crítico.
- Las dimensiones de altura y diámetro de los especímenes reconstituidos de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 no superan la variación del 1 % respecto de las dimensiones teóricas asignadas para la reconstitución. Los valores de las variaciones se detallan en los Anexos C.1, C.2 y C.3.
- Para las muestras de relave M-1, M-2 y M-3 fue necesario aplicar la corrección al esfuerzo desviador por efecto del uso de la membrana en los ensayos triaxiales no drenado; mientras que para los ensayos triaxiales drenados no, excepto para la muestra M-3 a una presión de confinamiento baja de 50kPa (ver el Anexo B).
- Las muestras de relave M-2 y M-3 en condición no drenada y a presiones de confinamiento bajas del 50 kPa y 100 kPa presentaron pérdida de resistencia hasta alcanzar un valor nulo (licuación estática); por lo tanto, se descartó para la estimación de la curva de estado crítico.
- Todas las consideraciones que se tomaron en la instrumentación del equipo y en el proceso experimental sumaron a la precisión de la estimación de la curva de estado crítico, sin embargo, el proceso de congelamiento de las muestras de relaves presenta un efecto significativo en los resultados en comparación de las demás variantes, dado que al ensayar las muestras de relaves a densidades sueltas la variación de volumen en la etapa de saturación presenta un efecto significativo para calcular la relación de vacío crítico (Sladen y Handford, 1987). El argumento del efecto significativo de los resultados al congelar las muestras también fue comprobado por las últimas investigaciones de Reid et al,2021 y Viana da Fonseca et al,2021. En la presente investigación mostramos algunos resultados de los ensayos triaxiales que no fueron congelados para calcular la relación de vacío crítico y se observa que existe una variación considerable del valor de la relación de vacío, más aún para las muestras de granulometría gruesa M-2 y M-3. (ver Figuras 5.19, 5.20 y 5.21).
- Los parámetros críticos Γ y λ de la muestra de relave M-1 de granulometría fina son mayores que los parámetros de las muestras de relave M-2 y M-3 de granulometría gruesa, esto tiene relación con el comportamiento y estado

dilatativo-contractivo de las muestras de relaves, es decir, generalmente los materiales que son de granulometría gruesas son más contractivos (menos dilatativos) que las muestras de granulometría fina y, por ende, presentan menores valores de Γ y λ .

- Los parámetros en el estado crítico Γ , λ y M_c de las muestras de relave M-2 y M-3 presentan valores similares, sin embargo, presentan diferentes configuraciones de la curva de estado crítico, pese a tener la misma granulometría o clasificación SUCS. La CSL del relave M-2 tiene un ajuste lineal, mientras que la CSL de la M-3 tiene un ajuste no lineal. Estos resultados nos enseñan que cada relave o muestra presenta una curva de estado crítico único e independiente, es decir, en el caso de que presenten granulometría, resistencia y trayectorias de esfuerzo similares a otras muestras, estas necesitan ser ensayadas.
- Los valores de los parámetros en el estado crítico están dentro del rango de magnitud de acuerdo con la revisión bibliográfica.
- La importancia de esta investigación está asociada a la estimación de la condición del estado crítico de las muestras relave y su aplicación práctica, como es la simulación numérica asociados a la estimación de los modelos constitutivos y, además, a la estimación de la condición para la ocurrencia de la licuación (estas fueron mencionadas en la parte teórica).

RECOMENDACIONES

En base a los resultados y conclusiones del presente estudio, a continuación, se indican algunas recomendaciones para investigaciones posteriores que sean afines:

- Es importante mantener las condiciones de humedad inicial de la muestra de relave al cual va a ser ensayada, ya que una variación de este influye en el comportamiento esfuerzo-deformación de la muestra, alejándonos del objetivo. Por ende, se recomienda reposar la muestra por un día después de ser mezclada con el agua y se conserve en un recipiente cerrado a temperatura ambiente.
- Se recomienda no realizar ensayos triaxiales a presiones de confinamientos muy bajos como 50 kPa para evitar que ocurra licuación estática y no aporten en la estimación de la curva de estado crítico.
- Hay que recalcar que se debe aplicar deformaciones axiales mayores al 20 % en los ensayos triaxiales para lograr alcanzar el estado crítico.
- Es importa alcanzar un parámetro de Skempton $\beta \geq 0.95$ en el proceso de saturación, ya que para el cálculo de la relación de vacío crítico se considera como saturado.
- Se recomienda considerar la corrección del esfuerzo desviador por el efecto de la membrana para muestras ensayadas en condiciones sueltas o densidades bajas con la finalidad de obtener resultados más precisos del esfuerzo desviador y obtener resultados correctos del esfuerzo promedio efectivo para la estimación de la curva de estado crítico.
- Congelar las muestras de relaves a temperaturas mayores a -18°C y máximo por 24 horas para facilitar la extracción de la muestra congelada y evitar perder la masa de la muestra.
- Es importante el uso de las válvulas de drenaje en el proceso de desinstalación de la muestra ensaya para retener el agua interna de la muestra y obtener un contenido de humedad final más preciso.
- Se recomienda realizar pruebas iniciales con contenidos de humedad bajos (5 % a 10 %) a presiones de confinamientos de 200 kPa o 400 kPa (esto dependerá de la condición in situ de la muestra) para conocer el

comportamiento del material en estudio y elegir las condiciones iniciales para el cual se logra alcanzar el estado crítico.

- Se recomienda utilizar las normas ASTM D7181 y ASTM D4767 para calcular las velocidades de deformación para los ensayos triaxiales cuando las velocidades convencionales o recomendadas por la experiencia no permiten alcanzar el estado crítico a las muestras en estudio en las condiciones iniciales al que fueron elegidas.
- La importancia de seguir investigando sobre los residuos mineros es que según las evaluaciones de Morgenstern (2018) uno de los factores que contribuyen a la falla de las presas de relave es la ingeniería que abarca la comprensión inadecuada de la respuesta mecánica de los relaves mineros, caracterización inadecuada de sitio, etc. Por lo tanto, se recomienda que mediante el proceso experimental desarrollado en esta tesis se continúe realizando más ensayos a diferentes tipos de relaves considerando como variables los parámetros de índice de material, tales como, contenido de finos, índice de plasticidad (que está relacionada con la mineralogía del material), límite líquido, etc. Asimismo, se debe considerar las propiedades de las partículas, así como, la distribución general del tamaño de las partículas, redondez y la mineralogía, con la finalidad de conocer las variaciones de los parámetros (Γ y λ) que definen a la curva de estado crítico, y así obtener una mejor caracterización y comprensión del comportamiento mecánico de los relaves en el Perú, pues actualmente hay poca información sobre estos materiales.
- Es importante determinar los parámetros en el estado críticos Γ , λ y M_c para ser utilizados en la calibración de modelos constitutivos basados en la teoría de estado crítico con la finalidad de prevenir el fenómeno de la licuación estática en las presas de relave.
- Por último, y no menos importante, se recomienda que se continúe con las investigaciones aplicadas del estado crítico a otros materiales susceptibles a la licuación y que forman parte de la cimentación en las estructuras geotécnicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asenjo, R. H. (2010). *Efectos del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en una arena de relaves* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103861>
- ASTM D854. (2014). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D4253. (2016). *Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D4254. (2016). *Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D4318. (2017). *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D4767. (2011). *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Soils*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D6913. (2017). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken.
- ASTM D7181. (2011). *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*. In Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken
- Been, K., Conlin, B. H., Crooks, J. H. A., Jefferies, M. G., Rogers, B. T., Shinde, S. B., & Williams-Fitzpatrick, S. (1987). Back analysis of the Nerlerk berm liquefaction slides: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(1), 170–179. <https://doi.org/10.1139/t87-020>
- Been, K., & Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2), 99–112.
- Been, K., Jefferies, M., & Hachey, J. (1991). The critical state of sands. *Géotechnique*, 41(3), 365–381.
- Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 257–276.
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review. *Proceedings of the Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5, 79–133.
- Castro, G. (1969). *Liquefaction of sands*. Harvard University.
- Castro, G., & Poulos, S. J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic

- mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103, 501–516.
- Civil and Environmental Engineerig. (n.d.). *Liquefaction & Lower San Fernando Dam*.
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une Application des Régles des Maximis et Minimis á Quelques Problèmes de Statique Relatifs á l'Architecture. *Memoires de Mathematique et de Physique, Présentés, à l'Academie Royale Des Sciences*, 3, 38.
- Das, B. M. (2013). Fundamentos de ingeniería geotecnica. In S. Cervantes Gonzales (Ed.), *Fundamentos de ingeniería geotecnica* (cuarta edi, p. 228).
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., & Mazerolle, F. (1996). Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, 46(3), 529–546.
- Fondazione Stava 1985. (2019). *The Fundão tailings dam failure, 2015*. <https://www.stava1985.it/the-fundao-tailings-dams-failure-2015/?lang=en>
- Grantz, A., Plafker, G., & Kachadoorian, R. (1964). Alaska's Good Friday earthquake, March 27, 1964. *Geological Survey*,. <https://pubs.usgs.gov/circ/1964/0491/report.pdf>
- ICOLD, & UNEP. (2001). Tailings Dams. Risk of Dangerous Occurrences. *Lessons Learnt from Practical Experience*, 121, 144.
- IGME. (1986). Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. *Instituto Geológico y Minero de España*, 182.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., & Yasuda, S. (1975). Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils and Foundations*, 15(1), 173–188.
- Jamasmie, C. (2020). *La respuesta de los mineros al desastre de la presa de Brasil sigue siendo débil*. <https://www.ocmal.org/la-respuesta-de-los-mineros-al-desastre-de-la-presa-de-brasil-sigue-siendo-debil/>
- Jefferies, M., & Been, K. (2006). *Soil Liquefaction, A Critical State Approach* (1ra edición).
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil Liquefaction, A Critical State Approach* (W. Powrie (ed.); 2a ed).
- José, A. (n.d.). *Introducción al estado crítico de suelos*.
- Junghans, M., & Helling, C. (1998). Historical mining, uranium tailings and waste disposal at one site: Can it be managed? A hydrogeological analysis. *Proceedings of the International Conference on Tailings and Mine Waste*, 117–126.
- Kramer, S. L. (1996). Licuación. In *Geotechnical Earthquake Engineering* (MEG WEIST, p. 358).

- Lade, P. V. (2016). *Triaxial testing of soils* (J. S. Wiley (ed.)).
- Lambe, W., & Whitman, R. (2004). *Mecanica de suelos*.
- Macedo, J., Bray, J., Olson, S., Bareither, C., and Arnold, C. (2020). TALENG mine tailings database. Tailings and mine waste 2020 conference, Keystone, Colorado.
- Marshall, J. (2018). *The Bullet*. Tailings Dam Spills at Mount Polley and Mariana. <https://socialistproject.ca/2018/11/tailings-dam-spills-at-mount-polley-and-mariana/>
- Minerals Council-South Africa. (n.d.). *We care and we remember Merriespruit, 22 de febrero de 1994*. <https://cutt.ly/tnmVeTi>
- Ministry of Energy and Mines (MINEM). (2021). *Positive balance of the mining sector in 2021, mining investment exceeded US\$5.2 billion and grew by 21.1% year-on-year, exceeding the planned target*. Mining statistical bulletin (ESTAMIN), 12–2021. <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2021/BEM12>
- Mohr, T. C. (1900). Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materiales? *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 44, 1524-1530, 1572-1577.
- Ohsaki, Y. (1966). Niigata earthquakes, 1964 building damage and soil condition. *Soil Found*, 6(2), 14–37. https://doi.org/10.3208/sandf1960.6.2_14
- Plewes, H., Davies, M., & Jefferies, M. (1992). CPT based screening procedure for evaluating liquefaction susceptibility. *Canadian Geotechnical Conf.*, 4, 1–9.
- Poulos, S. J. (1981). The steady state of deformation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(5), 553–562.
- Redlinger, C. G., Ferguson, K. A., & Berre, L. M. (2018). 80 aniversario del tobogán de construcción de la presa Fort Peck. *Conferencia Anual de ASDSO. Seattle: Asociado de Funcionarios Estatales de Seguridad de Represas*. <https://cutt.ly/inmJHZU>
- Reid, D.; Fourie, A.; Ayala, J.L.; Dickinson, S.; Ochoa-Cornejo, F.; Fanni, R.; Garfias, J.; Viana da Fonseca, A.; Ghafghazi, M.; et al (2021). Results of a critical state line testing round robin programme. *Géotechnique 2021*, 71, 616–630.
- Reinoso G., P., & Olalla M., C. (2017). Presas de residuos mineros: causas de fallo y propuestas para evitarlos. *Ingeniería Civil*, 186.
- Robertson, P. K. (2000). The Canadian liquefaction experiment: An overview. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 499–504.
- Robertson, P. K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied strength using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 6(136), 842–853.

- Rojas, R. A. (2016). *Implementación de ensayos de comprensión triaxial CIU y CID en laboratorio LEMCO para posterior análisis de resultados mediante la teoría del estado crítico*. [Universidad Técnica Federico Santa María]. <http://hdl.handle.net/11673/23588>
- Seed, H. B., & Wilson, S. W. (1967). The Turnagain Heights landslide, Anchorage, Alaska. *Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 93(SM4), 325–353.
- Shuttle, D., & Cunning, J. (2007). Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 1–19.
- Sladen, J. A., D'Hollander, R. D., Krahn, J., & Mitchell, D. E. (1985). Back analysis of the Nerlerk Berm liquefaction slides. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 579–588. <https://doi.org/10.1139/t85-077>
- Sladen, J. A., & Handford, G. (1987). A potential systematic error in laboratory testing of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(24), 462–466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t87-058>
- USEPA. (1994). Technical Report - Design and Evaluation of Tailings Dams, U.S. In *Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste*. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/%0Aspecial/mining/techdocs/tailings.pdf>
- Valerio, O. (2011). *Ensayos triaxiales para suelos*.
- Viana da Fonseca, A.;Cordeiro, D.; Molina-Gómez, F. (2021). Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. *Geotechnics 2021*, 1, 95-127.
- Vick, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams* (2a ed.). BiTech Publishers Ltd.
- World Information Service on Energy. (2020). *Cronología de fallas importantes de presas de relaves*. <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

Anexo A - Ensayos de laboratorio

**Anexo A.1 – Ensayos de caracterización
física de las muestras de relave M-1, M-2 y
M-3**

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM-D6913-04

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 22/12/2020

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	100.0
3/8"	9.525	100.0
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	100.0
N°20	0.850	99.1
N°40	0.425	98.7
N°60	0.250	98.0
N°100	0.150	96.7
N°140	0.106	72.2
N°200	0.075	6.1

Partículas >3" /%)	---
Grava (%)	0.0
Arena (%)	93.9
Limos y Arcillas (%)	6.1

D ₁₀	0.077
D ₃₀	0.085
D ₆₀	0.100
Cu	1.299
Cc	0.938

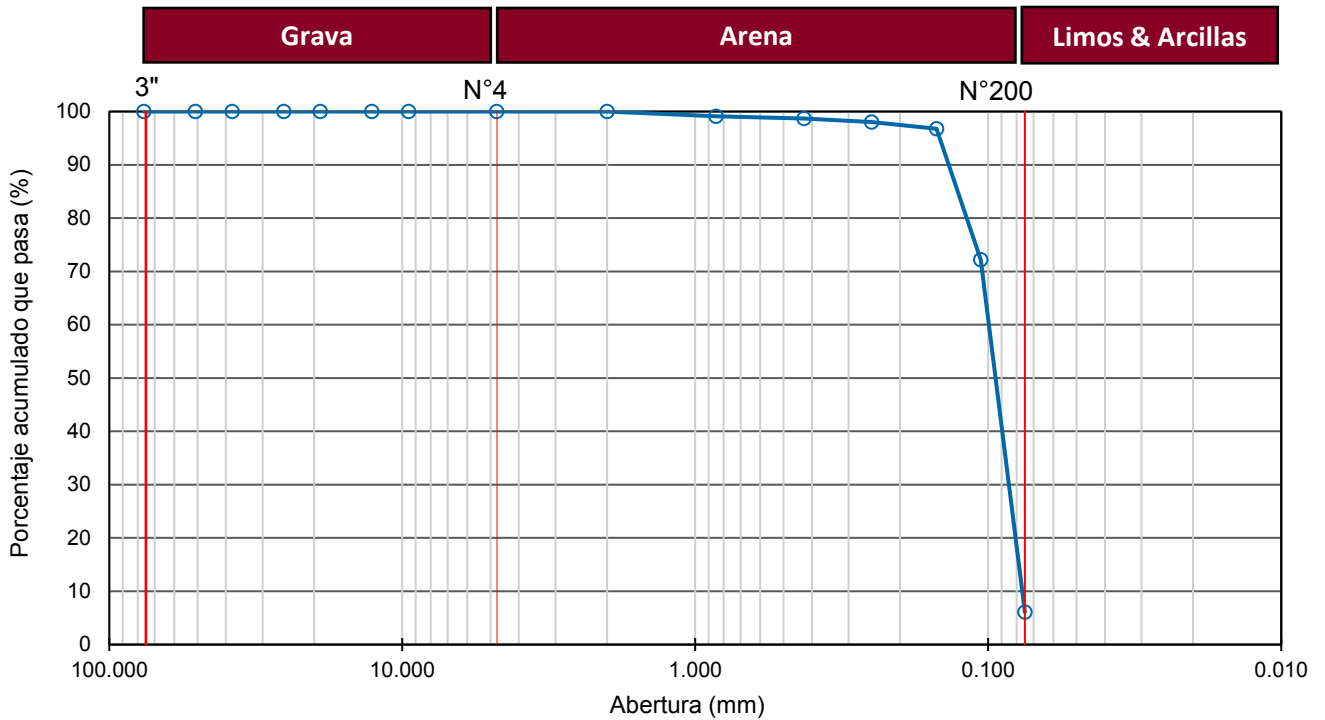
Límites de Atterberg	
LL(%)	21.2
LP(%)	12.7
IP(%)	8.5

Humedad (%)	Saturado
-------------	----------

SUCS	SP-SC
------	-------

Arena pobremente gradada con arcilla

CURVA GRANULOMÉTRICA



**LÍMITES DE ATTERBERG
ASTM-D4318**

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 22/12/2020

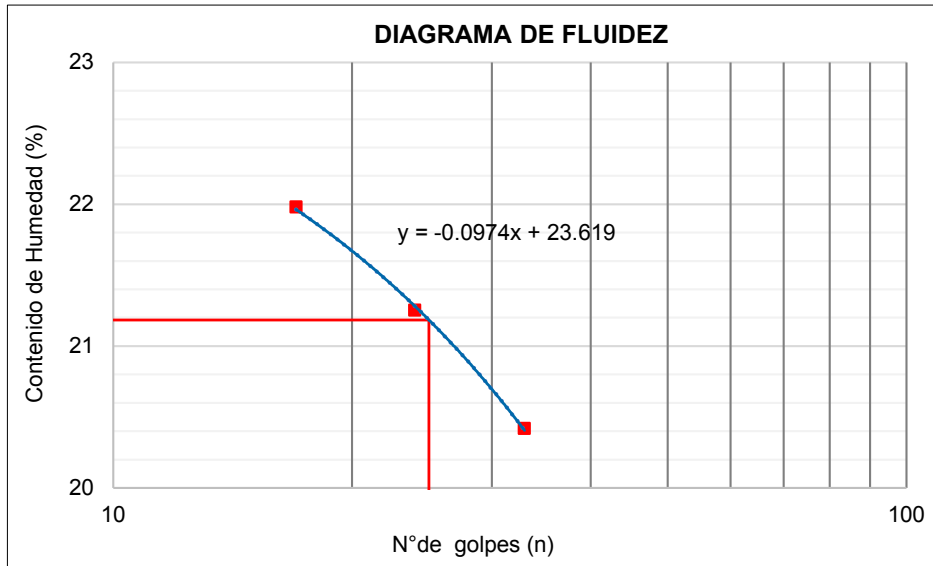
Límite Líquido (LL)			
Tara N°			
Peso de suelo húmedo + tara (g)	28.24	27.93	27.92
Peso de suelo seco +tara(g) (g)	25.8	25.52	25.5
Peso de tara (g)	13.85	14.18	14.49
Peso de agua (g)	2.44	2.41	2.42
Peso de suelo seco (g)	11.95	11.34	11.01
Contenido de humedad (%)	20.42	21.25	21.98
N° de golpes (N)	33	24	17
LL (%)	21.18		

Límite Plástico (LP)			
Tara N°			
Peso de suelo húmedo + tara (g)	25.69	24.49	
Peso de suelo seco +tara(g) (g)	24.40	23.35	
Peso de tara (g)	14.30	14.26	
Peso de agua (g)	1.29	1.14	
Peso de suelo seco (g)	10.10	9.09	
Contenido de humedad (%)	12.77	12.54	
LP (%)	12.66		

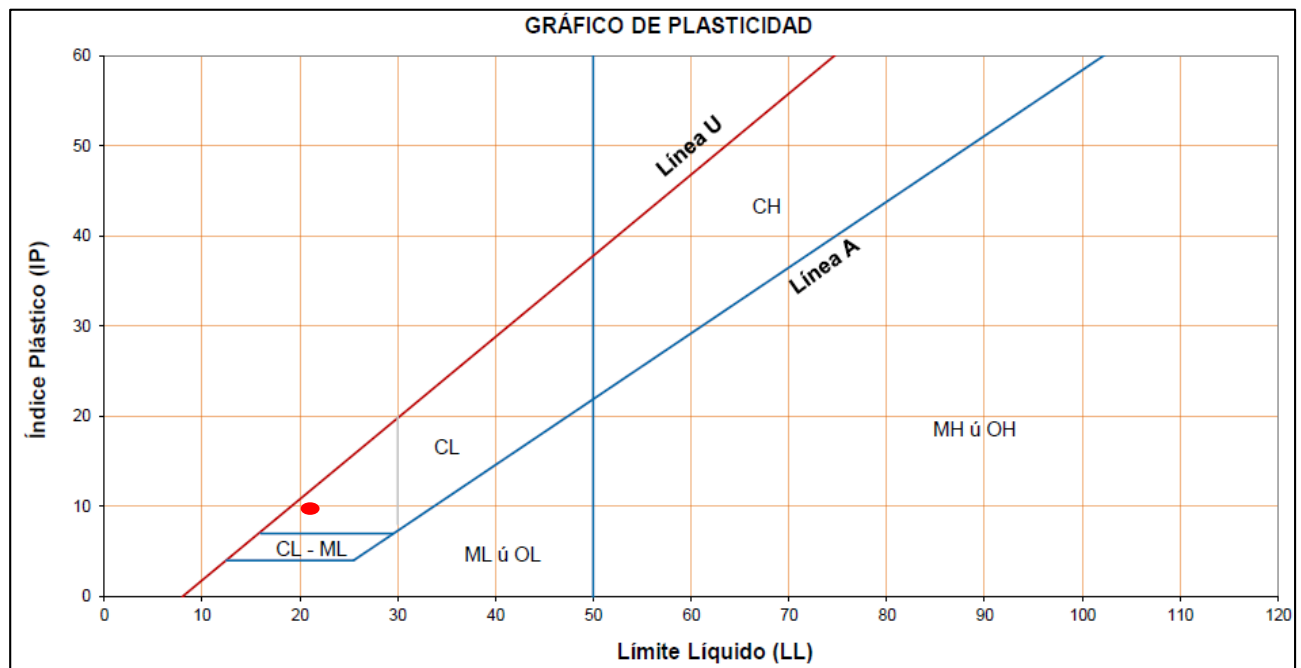
LÍMITES DE ATTERBERG ASTM-D4318

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 22/12/2020



Límites de Atterberg	
LL(%)	21
LP(%)	13
IP(%)	9



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM-D6913-04

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 19/01/2021

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	100.0
3/8"	9.525	100.0
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	100.0
N°20	0.850	99.6
N°40	0.425	97.7
N°60	0.250	64.6
N°100	0.150	19.1
N°140	0.106	8.2
N°200	0.075	1.9

Partículas >3" /%	---
Grava (%)	0.0
Arena (%)	98.1
Limos y Arcillas (%)	1.9

D ₁₀	0.114
D ₃₀	0.175
D ₆₀	0.250
Cu	2.203
Cc	1.079

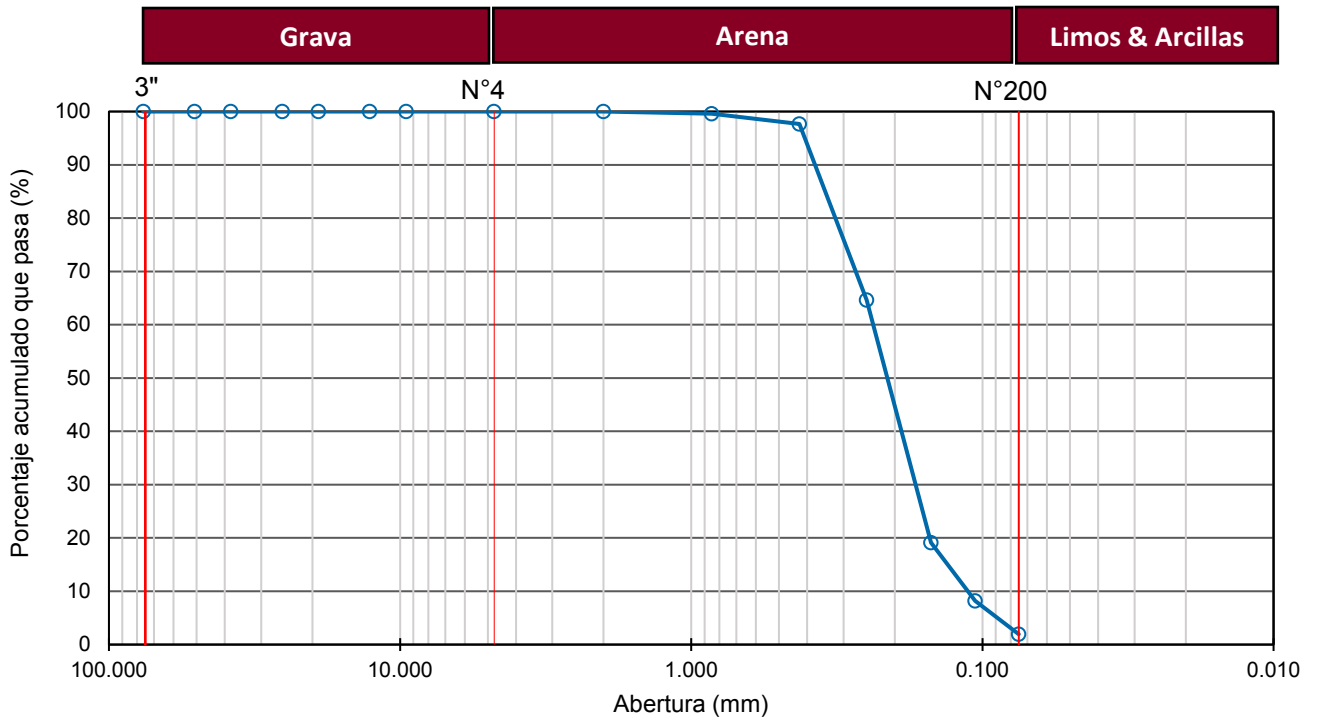
Límites de Atterberg	
LL(%)	N.P
LP(%)	N.P
IP(%)	N.P

Humedad (%)	Saturado
-------------	----------

SUCS	SP
------	----

Arena pobremente gradada

CURVA GRANULOMÉTRICA



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM-D6913-04

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 01/04/2021

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	100.0
3/8"	9.525	100.0
N°4	4.760	99.7
N°10	2.000	99.7
N°20	0.850	99.2
N°40	0.425	83.5
N°60	0.250	45.1
N°100	0.150	19.1
N°140	0.106	7.6
N°200	0.075	0.4

Partículas >3" /%	---
Grava (%)	0.3
Arena (%)	99.3
Limos y Arcillas (%)	0.4

D ₁₀	0.114
D ₃₀	0.175
D ₆₀	0.250
Cu	2.203
Cc	1.079

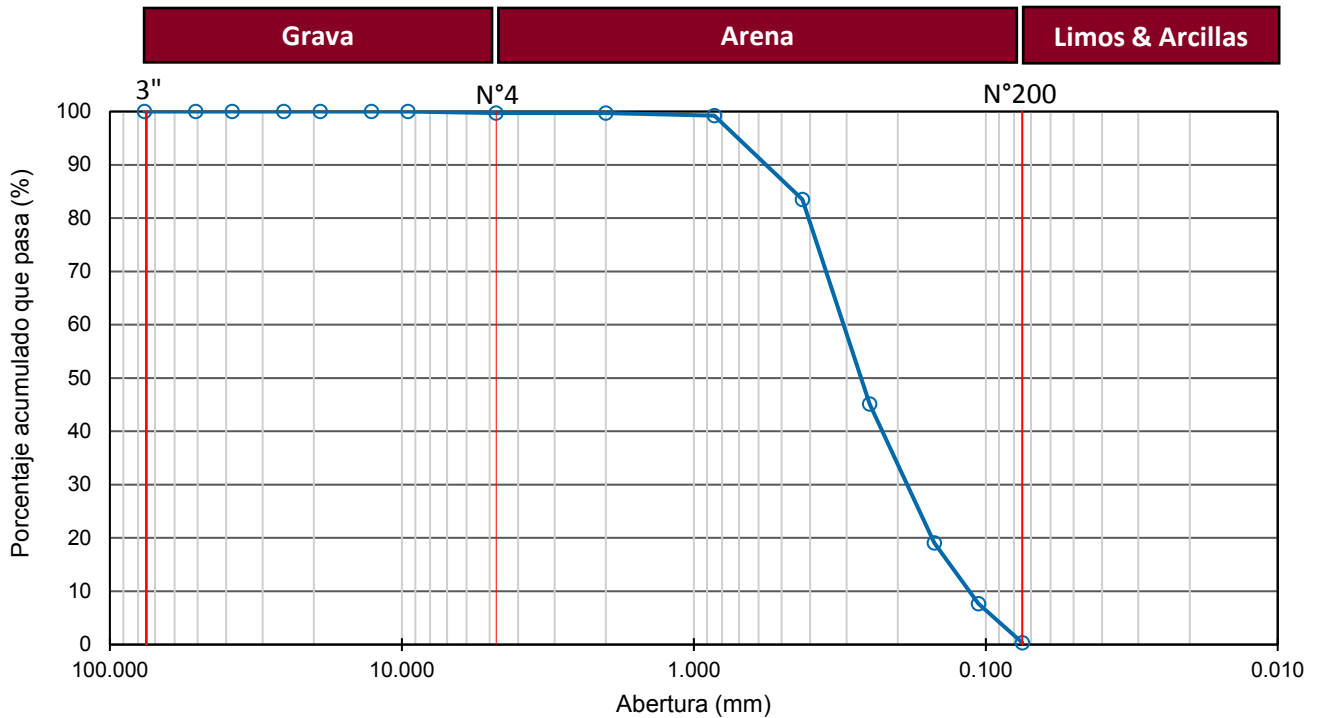
Límites de Atterberg	
LL(%)	N.P
LP(%)	N.P
IP(%)	N.P

Humedad (%)	Saturado
-------------	----------

SUCS	SP
------	----

Arena pobremente gradada

CURVA GRANULOMÉTRICA



Anexo A.2 - Ensayos de gravedad específica de sólidos de las muestras de relave M-1, M- 2 y M-3

**GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS
ASTM C-127 & D-854**

Muestra:	M-1	
Descripción:	Relave fino	Fecha: 22/12/2020
Elaborado por:	Diana Damian	

Material pasante de la malla N°4			
% Retenido en la malla N° 4	P1	0%	
1) N° de Prueba	42	46	
2) Peso de Fiola(g)	218.6	213.7	
3) Peso de muestra seca (g)	100	100	
4) Peso de muestra seca + Fiola (g)	318.6	313.7	
5) Peso de muestra seca +Fiola + Agua (g)	785.7	781.2	
6) Peso de Fiola +Peso de agua	715.5	711	
7) Gravedad Especifica de sólidos $(3)/[(3)+(6)-(5)]$	3.36	3.36	
8) Temperatura (°C)	22.3	22.2	
9) Corrección por temperatura (K)			
10) Gravedad especifica de sólidos corregido (7)*(9) Gs	3.36		

**GRAVEDAD ESPECIFICA DE SÓLIDOS
ASTM C-127 & D-854**

Muestra:	M-2	
Descripción:	Relave grueso	Fecha: 19/01/2021
Elaborado por:	Diana Damian	

Material pasante de la malla N°4			
% Retenido en la malla N° 4	P1	0%	
1) N° de Prueba	2	7	
2) Peso de Fiola(g)	139.9	140.4	
3) Peso de muestra seca (g)	100	100	
4) Peso de muestra seca + Fiola (g)	239.9	240.4	
5) Peso de muestra seca +Fiola + Agua (g)	703.2	703.5	
6) Peso de Fiola +Peso de agua	636.86	637.44	
7) Gravedad Específica de sólidos $(3)/[(3)+(6)-(5)]$	2.97	2.95	
8) Temperatura (°C)	26.3	25.7	
9) Corrección por temperatura (K)			
10) Gravedad especifica de sólidos corregido (7)*(9) Gs	2.96		

**GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS
ASTM C-127 & D-854**

Muestra:	M-3	
Descripción:	Relave grueso	Fecha: 01/04/2021
Elaborado por:	Diana Damian	

Material pasante de la malla N°4			
	P1	0%	
% Retenido en la malla N° 4			
1) N° de Prueba	33	42	
2) Peso de Fiola(g)	227.8	218.6	
3) Peso de muestra seca (g)	100	100	
4) Peso de muestra seca + Fiola (g)	327.8	318.6	
5) Peso de muestra seca +Fiola + Agua (g)	790.5	781.2	
6) Peso de Fiola +Peso de agua	724.77	715.37	
7) Gravedad Específica de sólidos $(3)/[(3)+(6)-(5)]$	2.92	2.93	
8) Temperatura (°C)	23.9	23.9	
9) Corrección por temperatura (K)			
10) Gravedad especifica de sólidos corregido (7)*(9) Gs		2.92	

**Anexo A.3 – Ensayo de densidad mínima y
máxima de las muestras de relave M-1, M-2 y
M-3**

**DENSIDAD MÍNIMA Y MÁXIMA
ASTM D4254 - ASTM D4253**

Muestra:	M-1	Fecha:	22/12/2020
Descripción:	Relave fino		
Elaborado por:	Diana Damian		

DENSIDAD MÍNIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5194	5200	5198	5201
2) Peso del molde (g)	4505	4505	4505	4505
3) Peso del suelo (g)	689	695	693	696
4) Diámetro del molde(cm)	7.18	7.18	7.18	7.18
5) Altura del molde (cm)	15.05	15.05	15.05	15.05
6) Volumen del molde (cm ³)	609.36	609.36	609.36	609.36
7) Densidad (g/cm ³)	1.131	1.141	1.137	1.142
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.138			

DENSIDAD MÁXIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5504	5495	5500	5502
2) Peso del molde (g)	4505	4505	4505	4505
3) Peso del suelo (g)	999	990	995	997
4) Diámetro del molde(cm)	7.18	7.18	7.18	7.18
5) Altura del molde (cm)	15.05	15.05	15.05	15.05
6) Volumen del molde (cm ³)	609.36	609.36	609.36	609.36
7) Densidad (g/cm ³)	1.639	1.625	1.633	1.636
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.633			

**DENSIDAD MÍNIMA Y MÁXIMA
ASTM D4254 - ASTM D4253**

Muestra:	M-2	Fecha:	19/01/2021
Descripción:	Relave grueso		
Elaborado por:	Diana Damian		

DENSIDAD MÍNIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5337	5339	5335	5335
2) Peso del molde (g)	4516	4516	4516	4516
3) Peso del suelo (g)	821	823	819	819
4) Diámetro del molde(cm)	7.21	7.21	7.21	7.21
5) Altura del molde (cm)	15	15	15	15
6) Volumen del molde (cm ³)	612.42	612.42	612.42	612.42
7) Densidad (g/cm ³)	1.341	1.344	1.337	1.337
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.340			

DENSIDAD MÁXIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5645	5641	5643	5647
2) Peso del molde (g)	4516	4516	4516	4516
3) Peso del suelo (g)	1129	1125	1127	1131
4) Diámetro del molde(cm)	7.21	7.21	7.21	7.21
5) Altura del molde (cm)	15	15	15	15
6) Volumen del molde (cm ³)	612.42	612.42	612.42	612.42
7) Densidad (g/cm ³)	1.843	1.837	1.840	1.847
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.842			

**DENSIDAD MÍNIMA Y MÁXIMA
ASTM D4254 - ASTM D4253**

Muestra:	M-3	Fecha:	01/04/2021
Descripción:	Relave grueso		
Elaborado por:	Diana Damian		

DENSIDAD MÍNIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5409	5413	5335	5335
2) Peso del molde (g)	4515	4515	4515	4515
3) Peso del suelo (g)	894	898	896	900
4) Diámetro del molde(cm)	7.18	7.18	7.18	7.18
5) Altura del molde (cm)	15.05	15.05	15.05	15.05
6) Volumen del molde (cm ³)	609.36	609.36	609.36	609.36
7) Densidad (g/cm ³)	1.467	1.474	1.470	1.477
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.472			

DENSIDAD MÁXIMA

N° de Prueba	1	2	3	4
1) Peso del molde + suelo (g)	5605	5606	5608	5612
2) Peso del molde (g)	4475	4475	4475	4475
3) Peso del suelo (g)	1130	1131	1133	1137
4) Diámetro del molde(cm)	7.18	7.18	7.18	7.18
5) Altura del molde (cm)	15.05	15.05	15.05	15.05
6) Volumen del molde (cm ³)	609.36	609.36	609.36	609.36
7) Densidad (g/cm ³)	1.854	1.856	1.859	1.866
Densidad seca promedio (g/cm³)	1.859			

Anexo A.4 – Ensayo Proctor estándar de las muestras de relave M-1, M-2 y M-3

**PROCTOR ETÁNDAR
ASTM-D698**

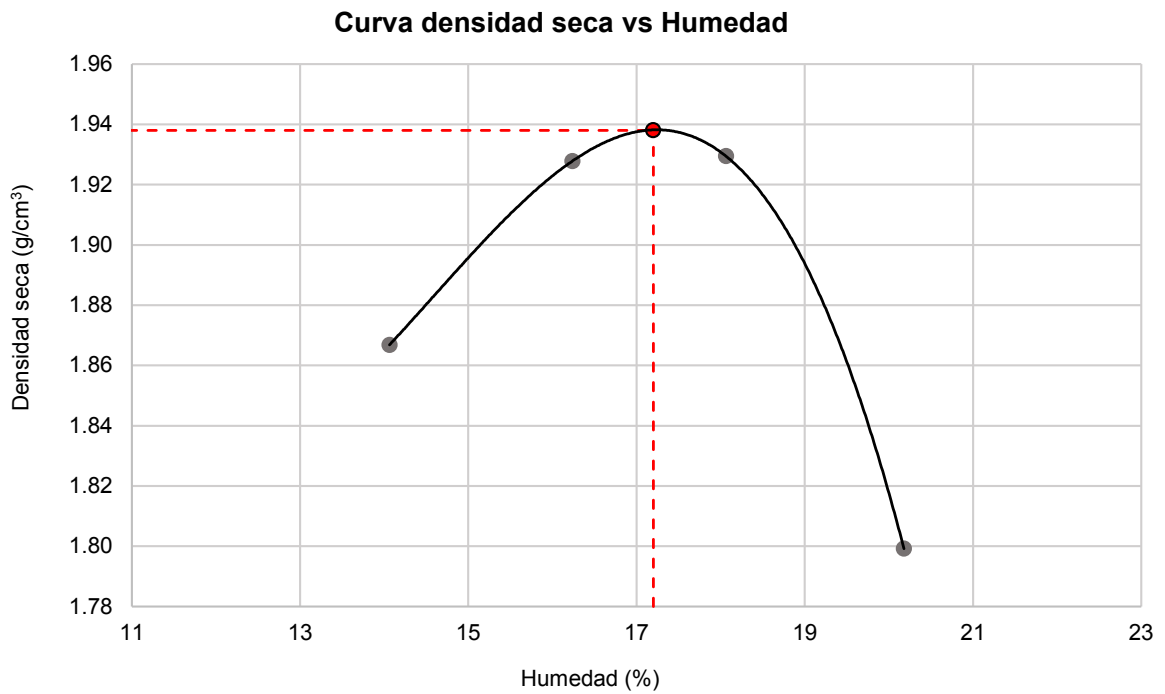
Muestra: M-1

Descripción: Relave fino

Fecha: 12/11/2021

Elaborado por: Diana Damian

Prueba N°	1	2	3	4
Densidad seca (g/cm ³)	1.867	1.928	1.929	1.799
Humedad (%)	14.06	16.24	18.06	20.18



Máxima densidad seca (g/cm ³)	1.938
Óptimo contenido de humedad (%)	17.2

**PROCTOR ETÁNDAR
ASTM-D698**

Muestra: M-2

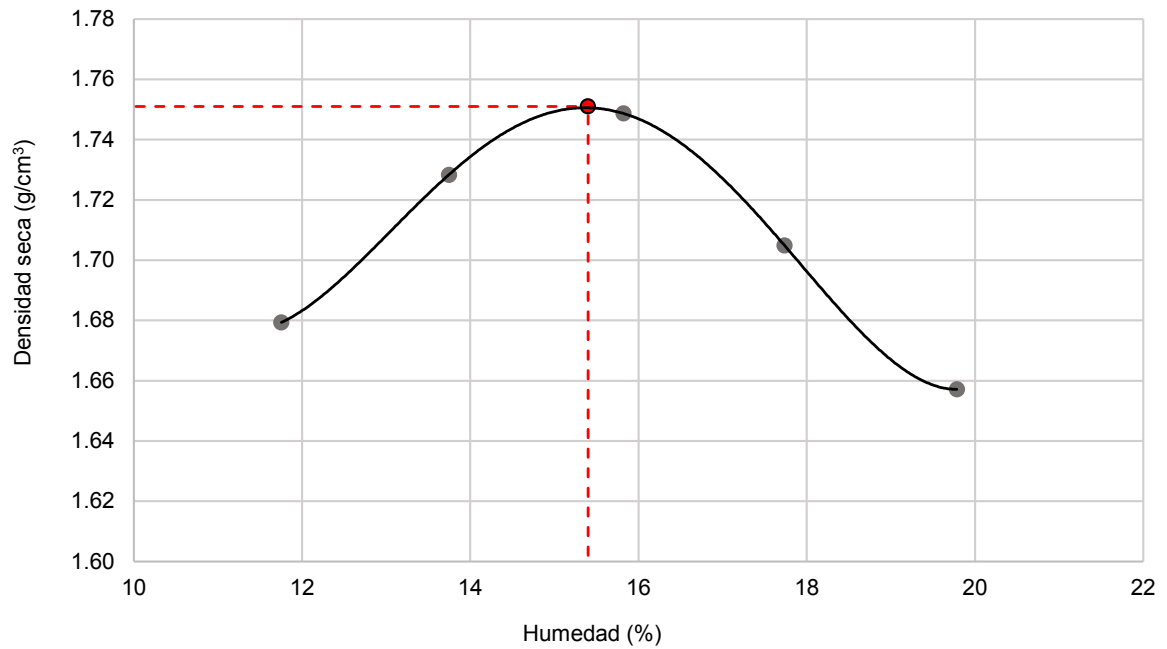
Descripción: Relave grueso

Fecha: 12/11/2021

Elaborado por: Diana Damian

Prueba N°	1	2	3	4	5
Densidad seca (g/cm ³)	1.679	1.728	1.749	1.705	1.657
Humedad (%)	11.75	13.74	15.82	17.73	19.78

Curva densidad seca vs Humedad



Máxima densidad seca (g/cm ³)	1.751
Óptimo contenido de humedad (%)	15.4

**PROCTOR ETÁNDAR
ASTM-D698**

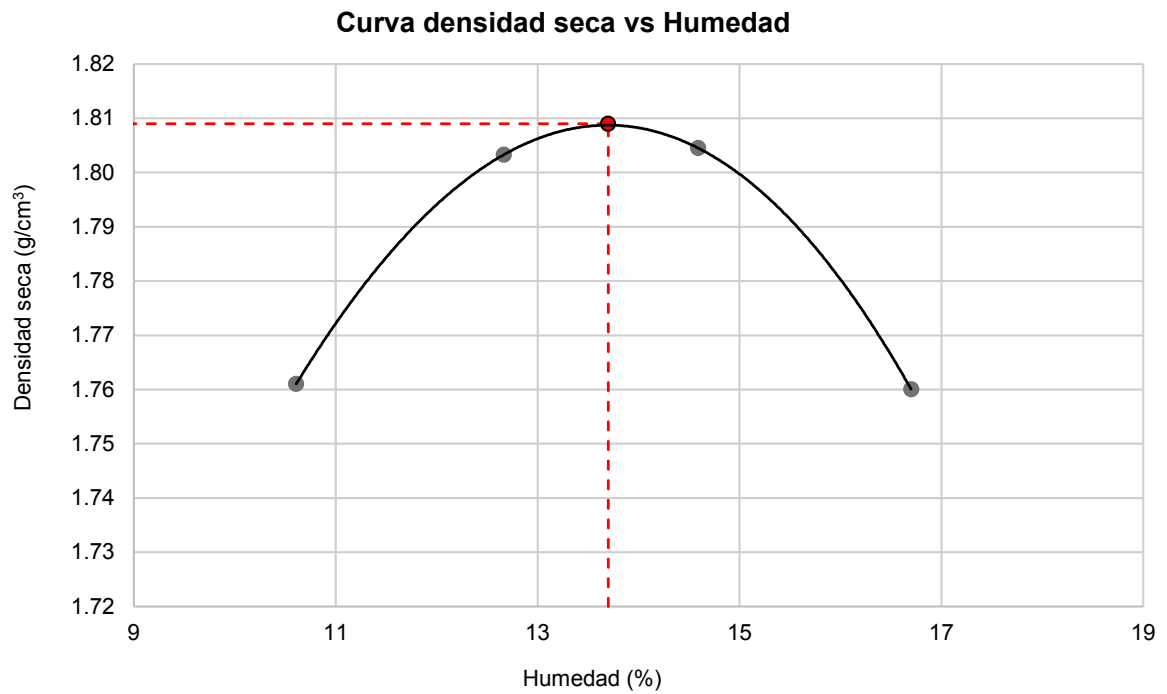
Muestra: M-3

Descripción: Relave grueso

Fecha: 12/11/2021

Elaborado por: Diana Damian

Prueba N°	1	2	3	4
Densidad seca (g/cm ³)	1.761	1.803	1.805	1.760
Humedad (%)	10.61	12.67	14.59	16.70



Máxima densidad seca (g/cm ³)	1.809
Óptimo contenido de humedad (%)	13.7

Anexo B - Reportes de los ensayos triaxiales

Anexo B.1 - Reportes de los ensayos triaxiales de la muestra de relave M-1

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-1

Descripción: Relave fino

Confinamiento: 50 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 14/12/2020

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		14.40	13.86
Diámetro (cm)		6.50	6.27
Relación de vacío (e)		1.29	1.05
Densidad seca (g/cm ³)		1.466	1.638

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.68	%
Presion de celda contra presión	251	kPa
Esf. Efect. inicial	50	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	50.0	0.0	50.02	0.0	0.00	1.00
0.05	19	0.90	56.5	19.4	55.60	19.4	0.35	1.40
0.10	26	1.80	58.7	25.9	56.86	25.9	0.46	1.54
0.15	29	2.80	59.7	29.1	56.93	29.1	0.51	1.62
0.20	29	3.90	59.7	29.1	55.83	29.1	0.52	1.63
0.25	32	5.10	60.8	32.3	55.70	32.3	0.58	1.72
0.35	36	7.20	61.9	35.5	54.67	35.5	0.65	1.83
0.50	35	9.90	61.8	35.5	51.95	35.5	0.68	1.88
0.75	39	13.40	62.9	38.6	49.49	38.6	0.78	2.05
1.00	39	15.90	62.9	38.5	46.96	38.5	0.82	2.13
1.25	38	17.70	62.8	38.4	45.13	38.4	0.85	2.19
1.50	38	19.10	62.8	38.3	43.69	38.3	0.88	2.24
1.75	38	20.20	62.8	38.2	42.56	38.2	0.90	2.28
2.00	38	21.30	62.7	38.1	41.43	38.1	0.92	2.33
2.50	38	22.80	62.7	37.9	39.86	37.9	0.95	2.39
3.00	36	23.90	61.9	35.6	37.98	35.6	0.94	2.36
4.00	34	25.50	61.5	34.5	36.02	34.5	0.96	2.41
5.00	36	26.50	62.2	36.5	35.67	36.5	1.02	2.55
6.00	35	27.20	61.8	35.3	34.60	35.3	1.02	2.55
7.00	37	27.50	62.4	37.2	34.92	37.2	1.07	2.65
8.00	36	28.00	62.0	36.0	34.03	36.0	1.06	2.64
9.00	35	28.00	61.6	34.9	33.64	34.9	1.04	2.58
10.00	34	28.50	61.3	33.7	32.75	33.7	1.03	2.57
11.00	35	28.30	61.8	35.4	33.53	35.4	1.06	2.63
12.00	34	28.80	61.4	34.2	32.63	34.2	1.05	2.61
13.00	33	28.80	61.0	33.0	32.22	33.0	1.02	2.56
14.00	32	29.20	60.6	31.8	31.42	31.8	1.01	2.53
15.00	31	29.20	60.2	30.6	31.02	30.6	0.99	2.47
16.00	32	29.50	60.7	32.1	31.23	32.1	1.03	2.57
17.00	31	29.70	60.3	30.9	30.62	30.9	1.01	2.52
18.00	32	29.70	60.8	32.3	31.10	32.3	1.04	2.59
19.00	31	29.70	60.4	31.1	30.67	31.1	1.01	2.53
20.00	30	29.80	60.0	29.8	30.15	29.8	0.99	2.47
21.00	31	29.90	60.4	31.1	30.48	31.1	1.02	2.54
22.00	30	29.90	60.0	29.8	30.05	29.8	0.99	2.48
23.00	28	30.10	59.5	28.5	29.42	28.5	0.97	2.43
24.00	30	29.90	59.9	29.7	30.01	29.7	0.99	2.47
25.00	28	30.40	59.5	28.3	29.06	28.3	0.97	2.44

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino **Confinamiento:** 100 kPa
Elaborado por: Diana Damian **Fecha:** 21/12/2020

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		14.39	13.47
Diámetro (cm)		6.48	6.20
Relación de vacío (e)		1.28	0.95
Densidad seca (g/cm ³)		1.476	1.723

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.83	%
Presion de celda contra presión	301	kPa
Esf. Efect. inicial	201	kPa
	100	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1 / σ'_3
0.00	0	0.00	100	0	99.97	0	0.00	1.00
0.05	20	1.00	107	20	105.60	20	0.19	1.20
0.10	30	1.70	110	30	108.21	30	0.28	1.30
0.15	43	2.80	114	43	111.52	43	0.39	1.44
0.20	53	4.20	118	53	113.42	53	0.47	1.55
0.25	60	6.70	120	60	113.11	60	0.53	1.64
0.35	69	11.10	123	69	111.99	69	0.62	1.78
0.50	82	16.60	127	82	110.86	82	0.74	1.99
0.75	89	23.40	130	89	106.18	89	0.84	2.16
1.00	92	28.50	131	92	102.10	92	0.90	2.29
1.25	95	32.80	132	95	98.81	95	0.96	2.41
1.50	95	36.60	132	95	94.93	95	1.00	2.49
1.75	94	39.80	131	94	91.65	94	1.03	2.57
2.00	97	42.50	132	97	89.96	97	1.08	2.70
2.50	97	46.60	132	97	85.69	97	1.13	2.82
3.00	96	49.60	132	96	82.52	96	1.17	2.91
4.00	99	53.50	133	99	79.35	99	1.24	3.12
5.00	101	55.60	134	101	77.96	101	1.29	3.27
6.00	103	57.10	134	103	77.15	103	1.33	3.40
7.00	102	57.80	134	102	76.08	102	1.34	3.41
8.00	98	58.50	133	98	74.11	98	1.32	3.36
9.00	99	58.80	133	99	74.19	99	1.34	3.41
10.00	97	59.20	132	97	73.17	97	1.33	3.38
11.00	98	59.30	133	98	73.42	98	1.34	3.42
12.00	99	59.50	133	99	73.56	99	1.35	3.45
13.00	97	59.90	132	97	72.51	97	1.34	3.43
14.00	95	59.90	132	95	71.86	95	1.33	3.38
15.00	96	60.10	132	96	71.95	96	1.34	3.41
16.00	94	60.00	131	94	71.39	94	1.32	3.36
17.00	95	60.30	132	95	71.34	95	1.33	3.39
18.00	93	60.50	131	93	70.47	93	1.32	3.36
19.00	91	61.10	130	91	69.20	91	1.31	3.34
20.00	89	61.30	130	89	68.33	89	1.30	3.30
21.00	87	61.80	129	87	67.15	87	1.29	3.28
22.00	85	61.90	128	85	66.38	85	1.28	3.23
23.00	85	62.60	128	85	65.86	85	1.30	3.29
24.00	83	63.00	128	83	64.78	83	1.29	3.26
25.00	84	63.30	128	84	64.62	84	1.30	3.29

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-1

Descripción: Relave fino

Confinamiento: 200 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 05/01/2021

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		14.80	13.80
Diámetro (cm)		6.33	6.03
Relación de vacío (e)		1.23	0.89
Densidad seca (g/cm ³)		1.504	1.777

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	98.24	%
Presion de celda contra presión	401	kPa
Esf. Efect. inicial	200	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0.000	0	200	0	200.02	0	0.00	1.00
0.05	11	4	204	11	199.22	11	0.05	1.05
0.10	24	9	208	24	199.48	24	0.12	1.13
0.15	45	11	215	45	203.77	45	0.22	1.24
0.20	66	13	222	66	209.16	66	0.32	1.36
0.25	91	14	230	91	216.00	91	0.42	1.49
0.35	126	16	242	126	225.71	126	0.56	1.68
0.50	164	19	255	164	235.83	164	0.69	1.90
0.75	198	26	266	198	239.78	198	0.83	2.14
1.00	212	31	271	212	239.34	212	0.88	2.25
1.25	221	36	274	221	237.52	221	0.93	2.35
1.50	224	40	275	224	234.78	224	0.96	2.40
1.75	227	44	276	227	231.44	227	0.98	2.46
2.00	227	50	276	227	225.35	227	1.01	2.51
2.50	229	60	276	229	216.30	229	1.06	2.63
3.00	234	67	278	234	211.08	234	1.11	2.76
4.00	235	76	278	235	202.89	235	1.16	2.89
5.00	240	81	280	240	199.29	240	1.20	3.01
6.00	244	83	281	244	197.95	244	1.23	3.09
7.00	244	85	281	244	196.37	244	1.24	3.13
8.00	245	86	282	245	195.97	245	1.25	3.14
9.00	242	87	281	242	194.08	242	1.25	3.14
10.00	236	88	279	236	190.84	236	1.24	3.11
11.00	234	90	278	234	188.06	234	1.24	3.12
12.00	231	91	277	231	185.79	231	1.24	3.13
13.00	232	92	277	232	185.23	232	1.25	3.14
14.00	226	92	275	226	182.94	226	1.24	3.10
15.00	209	94	270	209	175.75	209	1.19	2.97
16.00	206	95	269	206	173.34	206	1.19	2.97
17.00	205	96	268	205	172.30	205	1.19	2.98
18.00	205	97	268	205	171.53	205	1.19	2.99
19.00	204	97	268	204	171.04	204	1.19	2.99
20.00	204	97	268	204	170.53	204	1.19	2.99
21.00	203	97	268	203	170.29	203	1.19	2.98
22.00	202	98	267	202	169.94	202	1.19	2.97
23.00	201	97	267	201	169.85	201	1.19	2.96
24.00	200	98	267	200	169.35	200	1.18	2.96
25.00	200	98	267	200	168.62	200	1.18	2.95

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino **Confinamiento:** 400 kPa
Elaborado por: Diana Damian **Fecha:** 30/05/2021

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		14.66	13.25
Diámetro (cm)		6.16	5.89
Relación de vacío (e)		1.10	0.73
Densidad seca (g/cm ³)		1.601	1.938

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.01	%
Presión de celda contra presión	601	kPa
Esf. Efect. inicial	400	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	400	0	400.03	0	0.00	1.00
0.05	29	0	410	29	409.41	29	0.07	1.07
0.10	44	1	415	44	413.89	44	0.11	1.11
0.15	99	2	433	99	430.70	99	0.23	1.25
0.20	150	4	450	150	445.97	150	0.34	1.38
0.25	194	6	465	194	458.78	194	0.42	1.49
0.35	267	10	489	267	478.99	267	0.56	1.68
0.50	339	16	513	339	497.59	339	0.68	1.88
0.75	419	25	540	419	514.31	419	0.81	2.12
1.00	469	35	556	469	521.61	469	0.90	2.28
1.25	500	44	567	500	522.98	500	0.96	2.40
1.50	524	53	575	524	522.19	524	1.00	2.51
1.75	544	61	581	544	520.56	544	1.05	2.60
2.00	557	69	586	557	516.79	557	1.08	2.68
2.50	579	84	593	579	509.09	579	1.14	2.83
3.00	598	98	599	598	501.21	598	1.19	2.98
4.00	616	123	605	616	482.58	616	1.28	3.22
5.00	627	143	609	627	466.45	627	1.34	3.44
6.00	635	158	612	635	453.34	635	1.40	3.62
7.00	638	170	613	638	443.11	638	1.44	3.77
8.00	641	178	614	641	435.39	641	1.47	3.89
9.00	641	184	614	641	429.40	641	1.49	3.97
10.00	641	189	614	641	424.85	641	1.51	4.03
11.00	640	192	613	640	421.45	640	1.52	4.07
12.00	639	194	613	639	419.01	639	1.53	4.10
13.00	635	196	612	635	415.75	635	1.53	4.11
14.00	625	198	608	625	410.27	625	1.52	4.09
15.00	611	200	604	611	403.57	611	1.51	4.06
16.00	592	204	597	592	393.06	592	1.51	4.02
17.00	576	209	592	576	383.17	576	1.50	4.01
18.00	569	212	590	569	377.36	569	1.51	4.03
19.00	562	214	587	562	373.14	562	1.51	4.02
20.00	552	216	584	552	367.86	552	1.50	4.00
21.00	545	218	582	545	363.36	545	1.50	4.00
22.00	532	223	577	532	354.75	532	1.50	4.00
23.00	528	225	576	528	351.32	528	1.50	4.01
24.00	521	226	574	521	347.43	521	1.50	4.00
25.00	517	228	572	517	344.460	517	1.50	4.01

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino **Confinamiento:** 200 kPa
Elaborado por: Diana Damian **Fecha:** 18/01/2021

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	14.70	13.57
Diámetro (cm)	6.25	5.97
Relación de vacío (e)	1.16	0.83
Densidad seca (g/cm ³)	1.556	1.840

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.31	%
Presion de celda contra presión	401	kPa
Esf. Efect. inicial	200	kPa

Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	200.02	0.0	0.00	1.00
0.05	20	0.04	206.55	19.6	0.09	1.10
0.10	32	0.06	210.59	31.7	0.15	1.16
0.15	40	0.09	213.32	39.9	0.19	1.20
0.20	53	0.12	217.58	52.7	0.24	1.26
0.25	65	0.15	221.73	65.1	0.29	1.33
0.35	91	0.21	230.48	91.4	0.40	1.46
0.50	123	0.37	241.11	123.3	0.51	1.62
0.75	158	0.70	252.75	158.2	0.63	1.79
1.00	181	1.10	260.22	180.6	0.69	1.90
1.25	196	1.51	265.21	195.6	0.74	1.98
1.50	209	1.93	269.70	209.1	0.78	2.05
1.75	220	2.34	273.37	220.0	0.80	2.10
2.00	233	2.87	277.63	232.8	0.84	2.16
2.50	251	3.68	283.72	251.1	0.89	2.26
3.00	267	4.54	289.08	267.2	0.92	2.34
4.00	302	6.09	300.59	301.7	1.00	2.51
5.00	332	7.54	310.65	331.9	1.07	2.66
6.00	362	8.94	320.54	361.6	1.13	2.81
7.00	385	10.16	328.40	385.2	1.17	2.93
8.00	409	11.26	336.31	408.9	1.22	3.04
9.00	431	12.27	343.58	430.7	1.25	3.15
10.00	452	13.20	350.79	452.3	1.29	3.26
11.00	468	13.99	356.02	468.0	1.31	3.34
12.00	492	15.01	364.07	492.2	1.35	3.46
13.00	504	15.52	367.93	503.8	1.37	3.52
14.00	515	16.00	371.77	515.3	1.39	3.58
15.00	523	16.45	374.21	522.6	1.40	3.61
16.00	531	16.83	376.94	530.8	1.41	3.65
17.00	538	17.17	379.23	537.6	1.42	3.69
18.00	541	17.46	380.28	540.8	1.42	3.70
19.00	546	17.74	381.86	545.5	1.43	3.73
20.00	546	18.00	382.04	546.1	1.43	3.73
21.00	546	18.24	382.05	546.1	1.43	3.73
22.00	548	18.36	382.63	547.8	1.43	3.74
23.00	549	18.50	383.06	549.1	1.43	3.75
24.00	543	18.71	380.97	542.9	1.42	3.71
25.00	542	18.89	380.84	542.5	1.42	3.71

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino **Confinamiento:** 400 kPa
Elaborado por: Diana Damian **Fecha:** 22/08/2021

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,138 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		14.43	13.19
Diámetro (cm)		6.45	5.91
Relación de vacío (e)		1.26	0.74
Densidad seca (g/cm ³)		1.485	1.937

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	98.23	%
Presion de celda contra presión	601	kPa
Esf. Efect. inicial	400	kPa

Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	400.03	0.0	0.00	1.00
0.05	62	0.02	420.72	62.0	0.15	1.16
0.10	120	0.07	440.17	120.4	0.27	1.30
0.15	164	0.13	454.74	164.1	0.36	1.41
0.20	204	0.21	468.10	204.2	0.44	1.51
0.25	237	0.30	479.01	236.9	0.49	1.59
0.35	291	0.48	497.19	291.5	0.59	1.73
0.50	346	0.74	515.32	345.9	0.67	1.86
0.75	404	1.22	534.57	403.6	0.76	2.01
1.00	447	1.68	548.94	446.7	0.81	2.12
1.25	482	2.14	560.84	482.4	0.86	2.21
1.50	511	2.60	570.30	510.8	0.90	2.28
1.75	535	3.06	578.53	535.5	0.93	2.34
2.00	564	3.59	587.98	563.8	0.96	2.41
2.50	609	4.47	603.10	609.2	1.01	2.52
3.00	651	5.30	616.91	650.6	1.05	2.63
4.00	725	6.90	641.85	725.4	1.13	2.81
5.00	792	8.40	664.02	792.0	1.19	2.98
6.00	861	9.84	687.01	860.9	1.25	3.15
7.00	921	11.10	707.17	921.4	1.30	3.30
8.00	977	12.25	725.74	977.1	1.35	3.44
9.00	1028	13.36	742.77	1028.2	1.38	3.57
10.00	1074	14.31	758.19	1074.5	1.42	3.69
11.00	1113	15.15	770.90	1112.6	1.44	3.78
12.00	1143	15.90	780.97	1142.8	1.46	3.86
13.00	1169	16.59	789.60	1168.7	1.48	3.92
14.00	1187	17.17	795.67	1186.9	1.49	3.97
15.00	1201	17.67	800.34	1200.9	1.50	4.00
16.00	1201	18.14	800.47	1201.3	1.50	4.00
17.00	1195	18.55	798.32	1194.8	1.50	3.99
18.00	1185	18.97	795.05	1185.0	1.49	3.96
19.00	1163	19.43	787.63	1162.8	1.48	3.91
20.00	1150	19.76	783.21	1149.5	1.47	3.87
21.00	1146	20.19	781.96	1145.8	1.47	3.86
22.00	1148	20.55	782.55	1147.6	1.47	3.87
23.00	1145	20.67	781.76	1145.2	1.46	3.86
24.00	1137	20.91	779.03	1137.0	1.46	3.84
25.00	1128	20.97	776.05	1128.0	1.45	3.82

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

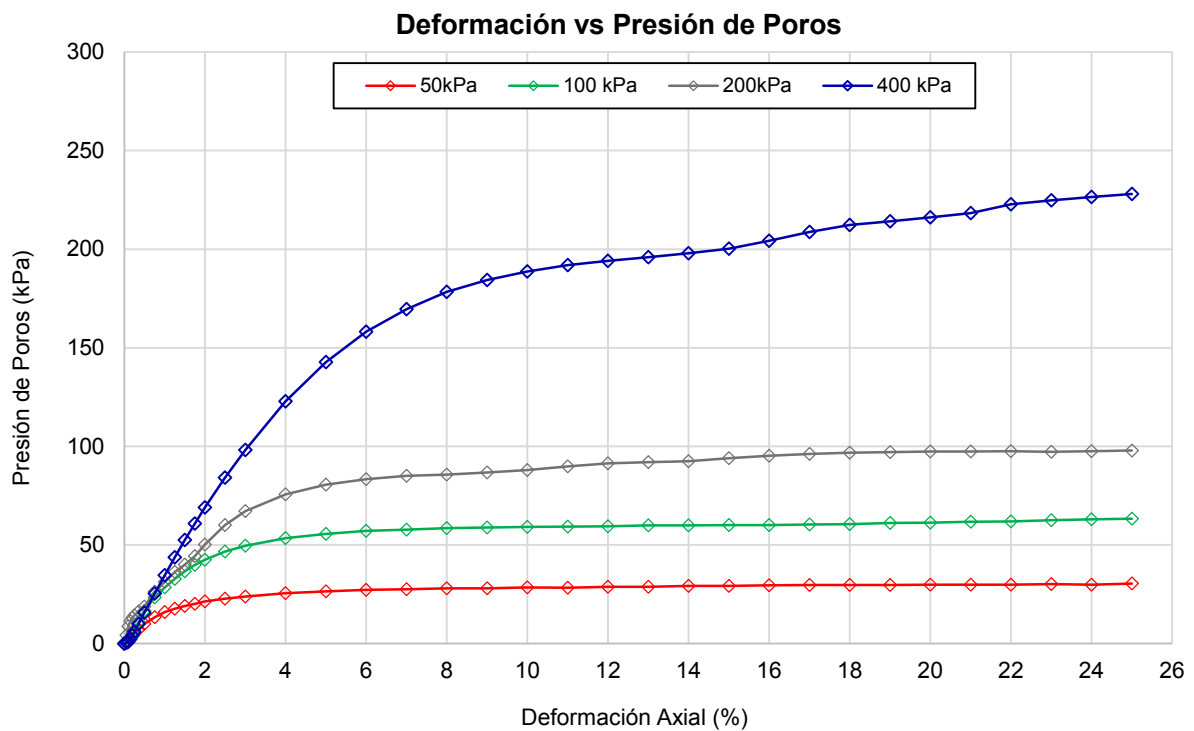
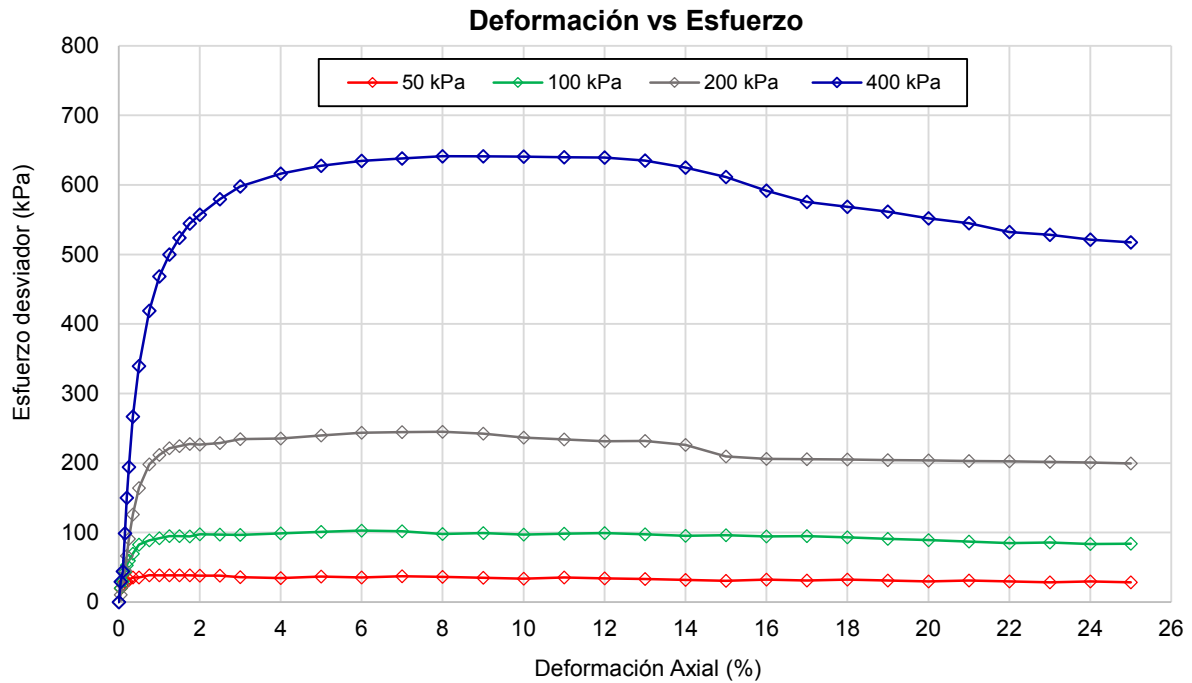
ASTM-D4767

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 14/12/2020

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

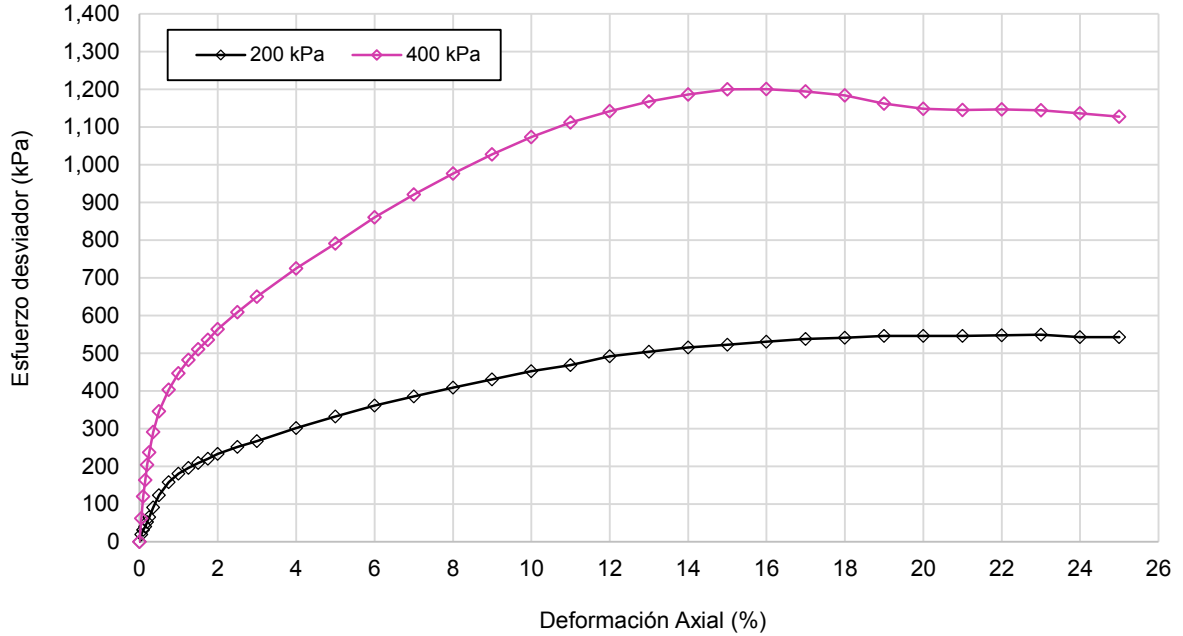
Muestra: M-1
Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 18/01/2021

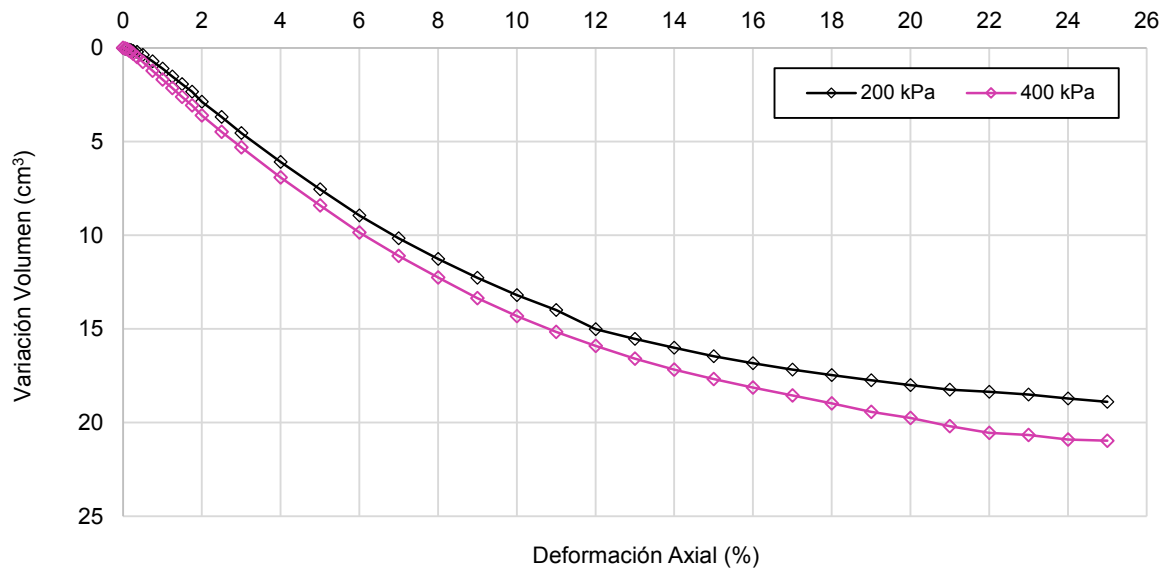
Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Deformación vs Esfuerzo



Deformación vs Volumen



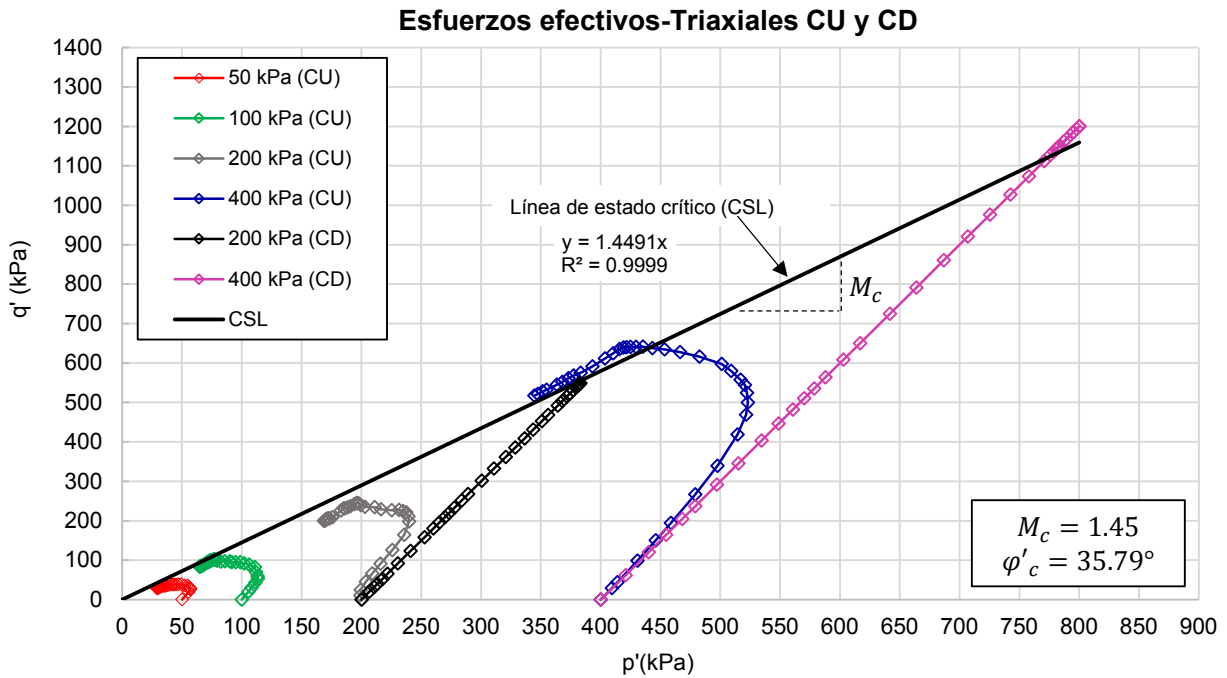
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

Muestra: M-1
Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 14/12/2020

Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

Muestra:	M-1	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave fino	Fecha:	14/12/2020

Clasificación SUCS:

SP-SC

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

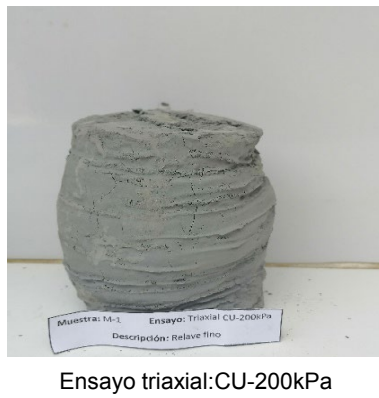
Fotografía individual de los especímenes triaxiales CU



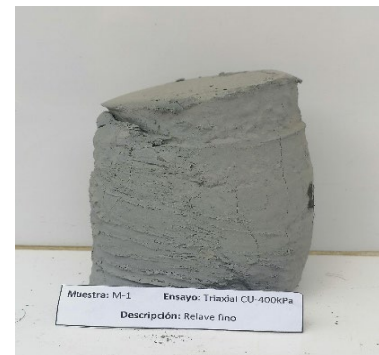
Ensayo triaxial:CU-50kPa



Ensayo triaxial:CU-100kPa

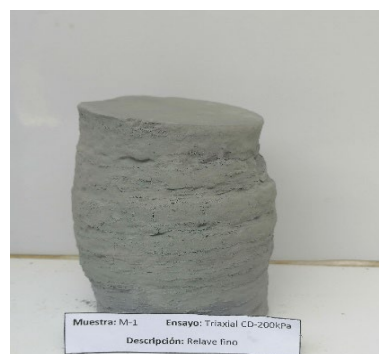


Ensayo triaxial:CU-200kPa

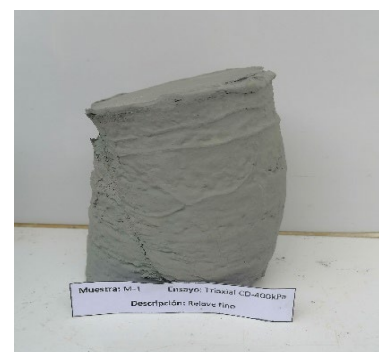


Ensayo triaxial:CU-400kPa

Fotografía individual de los especímenes triaxiales CD



Ensayo triaxial:CD-200kPa



Ensayo triaxial:CD-400kPa

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

Muestra:	M-1	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave fino	Fecha:	14/12/2020

Clasificación SUCS:

SP-SC

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³ y humedad de 5 %

Fotografía grupal de los especímenes triaxiales CU y CD



Especímenes ensayados en condiciones drenados y no drenados
de la muestra de relave fino M-1

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-1	Confinamiento:	50kPa
Descripción:	Relave fino	Fecha:	14/12/2020
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	62.672

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	19.440	0.036	0.2	19.440
03	0.10	25.907	0.071	0.3	25.907
04	0.15	29.131	0.107	0.4	29.131
05	0.20	29.116	0.143	0.5	29.116
06	0.25	32.335	0.179	0.6	32.335
07	0.35	35.533	0.250	0.7	35.533
08	0.50	35.480	0.357	1.0	35.480
09	0.75	38.608	0.536	1.4	38.608
10	1.00	38.511	0.715	1.9	38.511
11	1.25	38.413	0.894	2.3	38.413
12	1.50	38.316	1.072	2.8	38.316
13	1.75	38.219	1.251	3.3	38.219
14	2.00	38.122	1.430	3.8	38.122
15	2.50	37.927	1.787	4.7	37.927
16	3.00	37.733	2.144	5.7	35.588
17	4.00	37.344	2.859	7.7	34.484
18	5.00	40.034	3.574	8.9	36.460
19	6.00	39.613	4.289	10.8	35.324
20	7.00	42.206	5.004	11.9	37.202
21	8.00	41.752	5.719	13.7	36.034
22	9.00	41.298	6.433	15.6	34.865
23	10.00	40.845	7.148	17.5	33.696
24	11.00	43.276	7.863	18.2	35.413
25	12.00	42.790	8.578	20.0	34.212
26	13.00	42.303	9.293	22.0	33.010
27	14.00	41.817	10.008	23.9	31.809
28	15.00	41.331	10.722	25.9	30.608
29	16.00	43.568	11.437	26.3	32.130
30	17.00	43.049	12.152	28.2	30.897
31	18.00	45.188	12.867	28.5	32.321
32	19.00	44.637	13.582	30.4	31.055
33	20.00	44.086	14.297	32.4	29.790
34	21.00	46.096	15.011	32.6	31.084
35	22.00	45.512	15.726	34.6	29.786
36	23.00	44.929	16.441	36.6	28.488
37	24.00	46.809	17.156	36.7	29.653
38	25.00	46.193	17.871	38.7	28.322

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-1	Confinamiento:	100kPa
Descripción:	Relave fino	Fecha:	21/12/2020
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		61.979

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	19.877	0.036	0.2	19.877
03	0.10	29.801	0.072	0.2	29.801
04	0.15	43.024	0.108	0.3	43.024
05	0.20	52.926	0.145	0.3	52.926
06	0.25	59.512	0.181	0.3	59.512
07	0.35	69.362	0.253	0.4	69.362
08	0.50	82.449	0.361	0.4	82.449
09	0.75	88.821	0.542	0.6	88.821
10	1.00	91.879	0.723	0.8	91.879
11	1.25	94.920	0.904	1.0	94.920
12	1.50	94.680	1.084	1.1	94.680
13	1.75	94.439	1.265	1.3	94.439
14	2.00	97.447	1.446	1.5	97.447
15	2.50	96.950	1.807	1.9	96.950
16	3.00	96.453	2.168	2.2	96.453
17	4.00	98.641	2.891	2.9	98.641
18	5.00	100.762	3.614	3.6	100.762
19	6.00	102.817	4.337	4.2	102.817
20	7.00	101.723	5.060	5.0	101.723
21	8.00	103.679	5.783	5.6	97.896
22	9.00	105.568	6.505	6.2	99.062
23	10.00	104.408	7.228	6.9	97.180
24	11.00	106.198	7.951	7.5	98.247
25	12.00	107.921	8.674	8.0	99.247
26	13.00	106.695	9.397	8.8	97.298
27	14.00	105.469	10.120	9.6	95.349
28	15.00	107.059	10.842	10.1	96.217
29	16.00	105.800	11.565	10.9	94.235
30	17.00	107.291	12.288	11.5	95.003
31	18.00	105.999	13.011	12.3	92.988
32	19.00	104.706	13.734	13.1	90.972
33	20.00	103.413	14.457	14.0	88.957
34	21.00	102.121	15.179	14.9	86.941
35	22.00	100.828	15.902	15.8	84.926
36	23.00	102.088	16.625	16.3	85.463
37	24.00	100.762	17.348	17.2	83.414
38	25.00	101.922	18.071	17.7	83.851

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-1	Confinamiento:	200kPa
Descripción:	Relave fino	Fecha:	05/01/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		60.286

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	10.505	0.037	0.4	10.505
03	0.10	24.498	0.074	0.3	24.498
04	0.15	45.474	0.111	0.2	45.474
05	0.20	66.429	0.149	0.2	66.429
06	0.25	90.858	0.186	0.2	90.858
07	0.35	125.677	0.260	0.2	125.677
08	0.50	163.831	0.372	0.2	163.831
09	0.75	198.190	0.557	0.3	198.190
10	1.00	211.563	0.743	0.4	211.563
11	1.25	221.408	0.929	0.4	221.408
12	1.50	224.298	1.115	0.5	224.298
13	1.75	227.171	1.300	0.6	227.171
14	2.00	226.593	1.486	0.7	226.593
15	2.50	228.852	1.858	0.8	228.852
16	3.00	234.475	2.229	1.0	234.475
17	4.00	235.421	2.972	1.3	235.421
18	5.00	239.625	3.716	1.6	239.625
19	6.00	243.689	4.459	1.8	243.689
20	7.00	244.354	5.202	2.1	244.354
21	8.00	244.950	5.945	2.4	244.950
22	9.00	242.287	6.688	2.8	242.287
23	10.00	236.472	7.431	3.1	236.472
24	11.00	233.844	8.174	3.5	233.844
25	12.00	231.217	8.917	3.9	231.217
26	13.00	231.637	9.661	4.2	231.637
27	14.00	225.962	10.404	4.6	225.962
28	15.00	220.357	11.147	5.1	209.210
29	16.00	217.764	11.890	5.5	205.874
30	17.00	218.080	12.633	5.8	205.446
31	18.00	218.325	13.376	6.1	204.949
32	19.00	218.500	14.119	6.5	204.381
33	20.00	218.605	14.862	6.8	203.743
34	21.00	218.640	15.606	7.1	203.034
35	22.00	218.605	16.349	7.5	202.256
36	23.00	218.500	17.092	7.8	201.408
37	24.00	218.325	17.835	8.2	200.490
38	25.00	218.080	18.578	8.5	199.501

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-1	Confinamiento:	400 kPa
Descripción:	Relave fino	Fecha:	30/05/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		58.912

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	29.335	0.038	0.1	29.335
03	0.10	43.980	0.076	0.2	43.980
04	0.15	98.905	0.114	0.1	98.905
05	0.20	150.114	0.152	0.1	150.114
06	0.25	193.952	0.190	0.1	193.952
07	0.35	266.874	0.266	0.1	266.874
08	0.50	339.479	0.380	0.1	339.479
09	0.75	418.731	0.570	0.1	418.731
10	1.00	468.523	0.760	0.2	468.523
11	1.25	499.945	0.951	0.2	499.945
12	1.50	523.975	1.141	0.2	523.975
13	1.75	544.272	1.331	0.2	544.272
14	2.00	557.268	1.521	0.3	557.268
15	2.50	579.463	1.901	0.3	579.463
16	3.00	597.843	2.281	0.4	597.843
17	4.00	616.333	3.042	0.5	616.333
18	5.00	627.339	3.802	0.6	627.339
19	6.00	634.530	4.563	0.7	634.530
20	7.00	638.015	5.323	0.8	638.015
21	8.00	641.280	6.084	0.9	641.280
22	9.00	640.987	6.844	1.1	640.987
23	10.00	640.546	7.605	1.2	640.546
24	11.00	639.959	8.365	1.3	639.959
25	12.00	639.226	9.125	1.4	639.226
26	13.00	635.153	9.886	1.6	635.153
27	14.00	624.698	10.646	1.7	624.698
28	15.00	611.197	11.407	1.9	611.197
29	16.00	591.680	12.167	2.1	591.680
30	17.00	575.501	12.928	2.2	575.501
31	18.00	568.567	13.688	2.4	568.567
32	19.00	561.634	14.449	2.6	561.634
33	20.00	551.765	15.209	2.8	551.765
34	21.00	544.868	15.970	2.9	544.868
35	22.00	532.248	16.730	3.1	532.248
36	23.00	528.249	17.490	3.3	528.249
37	24.00	521.389	18.251	3.5	521.389
38	25.00	517.280	19.011	3.7	517.280

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-1		
Descripción:	Relave fino	Confinamiento:	200kPa
Elaborado por:	Diana Damian	Fecha:	18/01/2021

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	59.744

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	19.611	0.037	0.2	19.611
03	0.10	31.720	0.075	0.2	31.720
04	0.15	39.901	0.112	0.3	39.901
05	0.20	52.704	0.150	0.3	52.704
06	0.25	65.141	0.187	0.3	65.141
07	0.35	91.405	0.262	0.3	91.405
08	0.50	123.279	0.375	0.3	123.279
09	0.75	158.192	0.562	0.4	158.192
10	1.00	180.625	0.750	0.4	180.625
11	1.25	195.573	0.937	0.5	195.573
12	1.50	209.063	1.125	0.5	209.063
13	1.75	220.046	1.312	0.6	220.046
14	2.00	232.827	1.500	0.6	232.827
15	2.50	251.100	1.875	0.7	251.100
16	3.00	267.195	2.250	0.8	267.195
17	4.00	301.726	2.999	1.0	301.726
18	5.00	331.897	3.749	1.1	331.897
19	6.00	361.572	4.499	1.2	361.572
20	7.00	385.150	5.249	1.4	385.150
21	8.00	408.866	5.999	1.5	408.866
22	9.00	430.688	6.749	1.6	430.688
23	10.00	452.306	7.499	1.7	452.306
24	11.00	468.023	8.249	1.8	468.023
25	12.00	492.152	8.998	1.8	492.152
26	13.00	503.751	9.748	1.9	503.751
27	14.00	515.268	10.498	2.0	515.268
28	15.00	522.581	11.248	2.2	522.581
29	16.00	530.767	11.998	2.3	530.767
30	17.00	537.643	12.748	2.4	537.643
31	18.00	540.792	13.498	2.5	540.792
32	19.00	545.516	14.247	2.6	545.516
33	20.00	546.061	14.997	2.7	546.061
34	21.00	546.106	15.747	2.9	546.106
35	22.00	547.845	16.497	3.0	547.845
36	23.00	549.121	17.247	3.1	549.121
37	24.00	542.864	17.997	3.3	542.864
38	25.00	542.473	18.747	3.5	542.473

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-1	Confinamiento:	400kPa
Descripción:	Relave fino	Fecha:	22/08/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		59.051

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	62.045	0.038	0.1	62.045
03	0.10	120.396	0.076	0.1	120.396
04	0.15	164.125	0.114	0.1	164.125
05	0.20	204.187	0.152	0.1	204.187
06	0.25	236.942	0.190	0.1	236.942
07	0.35	291.470	0.266	0.1	291.470
08	0.50	345.857	0.379	0.1	345.857
09	0.75	403.619	0.569	0.1	403.619
10	1.00	446.706	0.759	0.2	446.706
11	1.25	482.425	0.948	0.2	482.425
12	1.50	510.798	1.138	0.2	510.798
13	1.75	535.477	1.328	0.2	535.477
14	2.00	563.830	1.517	0.3	563.830
15	2.50	609.190	1.897	0.3	609.190
16	3.00	650.622	2.276	0.3	650.622
17	4.00	725.447	3.035	0.4	725.447
18	5.00	791.962	3.793	0.5	791.962
19	6.00	860.945	4.552	0.5	860.945
20	7.00	921.408	5.311	0.6	921.408
21	8.00	977.109	6.069	0.6	977.109
22	9.00	1028.222	6.828	0.7	1028.222
23	10.00	1074.468	7.587	0.7	1074.468
24	11.00	1112.586	8.345	0.8	1112.586
25	12.00	1142.803	9.104	0.8	1142.803
26	13.00	1168.706	9.863	0.8	1168.706
27	14.00	1186.903	10.621	0.9	1186.903
28	15.00	1200.917	11.380	0.9	1200.917
29	16.00	1201.312	12.139	1.0	1201.312
30	17.00	1194.848	12.897	1.1	1194.848
31	18.00	1185.045	13.656	1.2	1185.045
32	19.00	1162.792	14.415	1.2	1162.792
33	20.00	1149.540	15.173	1.3	1149.540
34	21.00	1145.782	15.932	1.4	1145.782
35	22.00	1147.561	16.691	1.5	1147.561
36	23.00	1145.173	17.449	1.5	1145.173
37	24.00	1137.000	18.208	1.6	1137.000
38	25.00	1128.042	18.967	1.7	1128.042

Anexo B.2 - Reportes de los ensayos triaxiales de la muestra de relave M-2

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 50 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 30/03/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	15.21
Diámetro (cm)		6.76	6.73
Relación de vacío (e)		0.99	0.94
Densidad seca (g/cm ³)		1.486	1.523

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.63	%
Presión de celda contra presión	251	kPa
Esf. Efect. inicial	50	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	50	0	49.95	0	0.00	1.00
0.05	9	2	53	9	51.25	9	0.18	1.19
0.10	12	4	54	12	50.17	12	0.25	1.27
0.15	15	8	55	15	47.31	15	0.32	1.36
0.20	18	8	56	18	47.64	18	0.37	1.42
0.25	19	10	56	19	46.30	19	0.42	1.49
0.35	22	14	57	22	43.53	22	0.51	1.61
0.50	24	18	58	24	39.66	24	0.61	1.77
0.75	26	25	59	26	33.80	26	0.77	2.03
1.00	25	29	58	25	28.90	25	0.87	2.22
1.25	23	33	58	23	24.63	23	0.94	2.36
1.50	21	36	57	21	21.07	21	1.00	2.50
1.75	19	38	56	19	17.91	19	1.05	2.61
2.00	17	40	55	17	15.26	17	1.08	2.69
2.50	13	44	54	13	10.56	13	1.19	2.98
3.00	9	46	53	9	7.14	9	1.30	3.29
4.00	3	49	51	3	2.03	3	1.59	4.40
5.00	1	50	50	1	0.02	1	40.93	-2.24
6.00	1	51	50	1	-0.68	1	-1.16	0.16
7.00	1	51	50	1	-0.87	1	-0.60	0.50
8.00	-1	52	50	-1	-2.01	-1	0.39	1.44
9.00	-1	52	50	-1	-2.30	-1	0.33	1.37
10.00	-1	52	50	-1	-2.38	-1	0.42	1.49
11.00	-1	52	50	-1	-2.70	-1	0.28	1.31
12.00	-1	53	50	-1	-2.88	-1	0.34	1.39
13.00	-1	53	50	-1	-2.97	-1	0.33	1.37
14.00	-1	53	50	-1	-3.09	-1	0.23	1.25
15.00	-1	53	50	-1	-3.17	-1	0.30	1.34
16.00	-1	53	50	-1	-3.38	-1	0.21	1.23
17.00	-1	53	50	-1	-3.48	-1	0.20	1.22
18.00	-1	53	50	-1	-3.38	-1	0.20	1.22
19.00	-1	53	50	-1	-3.55	-1	0.26	1.28
20.00	-1	53	50	-1	-3.55	-1	0.25	1.28
21.00	-1	53	50	-1	-3.64	-1	0.24	1.27
22.00	-1	53	50	-1	-3.74	-1	0.23	1.25
23.00	-1	53	50	-1	-3.54	-1	0.24	1.27
24.00	-1	54	50	-1	-3.83	-1	0.22	1.24
25.00	-1	54	50	-1	-3.83	-1	0.22	1.24

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 100 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 08/04/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	15.12
Diámetro (cm)		6.65	6.59
Relación de vacío (e)		0.93	0.85
Densidad seca (g/cm ³)		1.538	1.599

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.96	%
Presion de celda contra presión	301	kPa
Esf. Efect. inicial	201	kPa
	100	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	100	0	99.97	0	0.00	1.00
0.05	24	2	108	24	105.89	24	0.22	1.24
0.10	31	5	110	31	105.92	31	0.30	1.33
0.15	37	7	112	37	105.17	37	0.35	1.40
0.20	41	10	114	41	104.03	41	0.40	1.46
0.25	45	12	115	45	102.89	45	0.44	1.52
0.35	52	17	117	52	100.32	52	0.52	1.63
0.50	60	24	120	60	96.01	60	0.63	1.79
0.75	66	34	122	66	88.00	66	0.75	2.01
1.00	70	43	123	70	80.80	70	0.87	2.22
1.25	71	50	124	71	74.13	71	0.96	2.41
1.50	69	55	123	69	67.79	69	1.02	2.55
1.75	69	60	123	69	63.03	69	1.10	2.73
2.00	67	64	122	67	58.40	67	1.14	2.84
2.50	62	70	121	62	50.36	62	1.23	3.09
3.00	58	75	119	58	44.22	58	1.31	3.31
4.00	46	82	115	46	32.97	46	1.39	3.60
5.00	33	87	111	33	24.02	33	1.39	3.60
6.00	23	92	108	23	15.59	23	1.49	3.94
7.00	14	95	105	14	9.89	14	1.46	3.85
8.00	12	97	104	12	6.74	12	1.72	5.04
9.00	7	98	102	7	4.46	7	1.67	4.79
10.00	4	99	101	4	2.18	4	1.94	6.46
11.00	4	100	101	4	1.19	4	3.07	-138.94
12.00	3	101	101	3	0.59	3	5.66	-5.38
13.00	2	101	101	2	-0.53	2	-3.37	-0.59
14.00	2	102	101	2	-0.94	2	-1.88	-0.16
15.00	1	102	100	1	-1.33	1	-1.13	0.18
16.00	1	102	100	1	-1.82	1	-0.68	0.45
17.00	0	102	100	0	-2.24	0	-0.11	0.90
18.00	0	103	100	0	-2.55	0	-0.09	0.91
19.00	0	103	100	0	-2.75	0	-0.09	0.92
20.00	0	103	100	0	-2.85	0	-0.08	0.92
21.00	0	103	100	0	-3.05	0	-0.08	0.93
22.00	0	103	100	0	-3.15	0	-0.07	0.93
23.00	0	103	100	0	-3.35	0	-0.07	0.93
24.00	0	104	100	0	-3.45	0	-0.06	0.94
25.00	0	104	100	0	-3.55	0	-0.06	0.94

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 200 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 04/06/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	14.98
Diámetro (cm)		6.70	6.61
Relación de vacío (e)		0.96	0.84
Densidad seca (g/cm ³)		1.514	1.606

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.03	%
Presión de celda contra presión	401	kPa
Esf. Efect. inicial	200	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	200	0	199.95	0	0.00	1.00
0.05	38	2	213	38	210.69	38	0.18	1.19
0.10	50	5	216	50	211.87	50	0.23	1.25
0.15	61	7	220	61	213.05	61	0.29	1.32
0.20	70	10	223	70	213.05	70	0.33	1.37
0.25	76	13	225	76	211.78	76	0.36	1.41
0.35	90	25	230	90	204.70	90	0.44	1.52
0.50	107	34	236	107	201.56	107	0.53	1.65
0.75	127	48	242	127	194.13	127	0.66	1.84
1.00	142	61	247	142	185.94	142	0.76	2.02
1.25	150	73	250	150	176.90	150	0.85	2.18
1.50	155	84	252	155	168.19	155	0.92	2.33
1.75	161	93	253	161	160.67	161	1.00	2.50
2.00	160	101	253	160	152.44	160	1.05	2.62
2.50	157	115	252	157	136.91	157	1.14	2.85
3.00	150	125	250	150	124.96	150	1.20	3.00
4.00	137	139	246	137	107.11	137	1.28	3.24
5.00	125	148	242	125	93.84	125	1.33	3.39
6.00	112	154	237	112	83.14	112	1.35	3.46
7.00	100	159	233	100	74.12	100	1.35	3.47
8.00	89	163	229	89	66.46	89	1.33	3.40
9.00	79	166	226	79	60.34	79	1.31	3.32
10.00	72	168	224	72	55.75	72	1.29	3.27
11.00	63	171	221	63	49.64	63	1.26	3.18
12.00	56	173	219	56	45.44	56	1.23	3.10
13.00	52	175	217	52	42.62	52	1.22	3.06
14.00	48	176	216	48	40.32	48	1.20	2.99
15.00	44	177	215	44	38.15	44	1.16	2.90
16.00	43	177	214	43	37.01	43	1.16	2.90
17.00	42	178	214	42	36.17	42	1.15	2.88
18.00	40	178	213	40	35.23	40	1.15	2.86
19.00	39	178	213	39	34.59	39	1.13	2.82
20.00	38	179	213	38	33.85	38	1.12	2.78
21.00	36	179	212	36	33.21	36	1.10	2.73
22.00	35	179	212	35	32.47	35	1.08	2.69
23.00	34	179	211	34	31.93	34	1.06	2.64
24.00	35	180	212	35	32.03	35	1.08	2.70
25.00	33	180	211	33	31.38	33	1.06	2.65

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 300 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 29/06/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	14.94
Diámetro (cm)		6.68	6.53
Relación de vacío (e)		0.94	0.79
Densidad seca (g/cm ³)		1.523	1.650

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.04	%
Presión de celda contra presión	501	kPa
Esf. Efect. inicial	201	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	300	0	299.99	0	0.00	1.00
0.05	39	3	313	39	309.54	39	0.13	1.13
0.10	66	10	322	66	311.99	66	0.21	1.23
0.15	84	17	328	84	311.05	84	0.27	1.30
0.20	101	24	334	101	309.81	101	0.33	1.37
0.25	113	31	338	113	306.47	113	0.37	1.42
0.35	137	46	346	137	299.67	137	0.46	1.54
0.50	161	67	354	161	286.34	161	0.56	1.69
0.75	190	99	363	190	264.09	190	0.72	1.95
1.00	201	126	367	201	240.98	201	0.84	2.16
1.25	207	148	369	207	220.78	207	0.94	2.36
1.50	206	166	369	206	203.10	206	1.01	2.53
1.75	206	180	369	206	189.03	206	1.09	2.71
2.00	202	191	367	202	176.58	202	1.14	2.85
2.50	192	207	364	192	156.82	192	1.23	3.08
3.00	183	220	361	183	141.19	183	1.29	3.28
4.00	166	234	355	166	121.78	166	1.37	3.51
5.00	153	242	351	153	108.71	153	1.41	3.66
6.00	143	248	348	143	99.37	143	1.44	3.78
7.00	136	253	345	136	92.90	136	1.47	3.87
8.00	129	256	343	129	87.48	129	1.48	3.91
9.00	125	258	342	125	83.61	125	1.50	3.99
10.00	114	260	338	114	77.96	114	1.47	3.86
11.00	110	262	336	110	75.00	110	1.46	3.85
12.00	108	263	336	108	73.13	108	1.47	3.88
13.00	103	264	334	103	70.70	103	1.46	3.83
14.00	101	264	334	101	69.34	101	1.46	3.83
15.00	99	265	333	99	67.98	99	1.46	3.83
16.00	97	266	332	97	66.33	97	1.46	3.85
17.00	95	266	332	95	65.27	95	1.46	3.83
18.00	93	267	331	93	64.01	93	1.45	3.82
19.00	91	267	330	91	63.15	91	1.44	3.78
20.00	92	267	330	92	63.09	92	1.45	3.81
21.00	90	267	330	90	62.73	90	1.43	3.72
22.00	90	267	330	90	62.64	90	1.43	3.75
23.00	90	267	330	90	62.83	90	1.43	3.75
24.00	90	267	330	90	63.10	90	1.43	3.74
25.00	90	267	330	90	63.45	90	1.43	3.72

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 400 kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 27/06/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	14.93
Diámetro (cm)		6.65	6.47
Relación de vacío (e)		0.93	0.76
Densidad seca (g/cm ³)		1.534	1.680

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.86	%
Presión de celda contra presión	601	kPa
Esf. Efect. inicial	201	kPa
	400	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	400	0	399.96	0	0.00	1.00
0.05	52	2	417	52	415.30	52	0.12	1.13
0.10	82	5	427	82	422.43	82	0.19	1.21
0.15	100	9	433	100	424.89	100	0.24	1.26
0.20	121	13	440	121	427.86	121	0.28	1.31
0.25	134	17	444	134	427.59	134	0.31	1.35
0.35	161	26	454	161	427.54	161	0.38	1.43
0.50	197	41	466	197	425.07	197	0.46	1.55
0.75	245	66	482	245	416.02	245	0.59	1.73
1.00	280	91	493	280	402.66	280	0.70	1.91
1.25	304	115	501	304	385.84	304	0.79	2.07
1.50	324	139	508	324	369.38	324	0.88	2.24
1.75	332	160	511	332	350.60	332	0.95	2.38
2.00	337	179	512	337	333.00	337	1.01	2.53
2.50	338	212	513	338	300.92	338	1.12	2.80
3.00	328	239	509	328	270.49	328	1.21	3.03
4.00	304	270	501	304	230.95	304	1.32	3.34
5.00	280	290	493	280	203.65	280	1.38	3.55
6.00	260	302	487	260	184.44	260	1.41	3.67
7.00	246	311	482	246	171.14	246	1.44	3.76
8.00	235	317	478	235	161.16	235	1.46	3.84
9.00	224	322	475	224	152.64	224	1.47	3.88
10.00	216	326	472	216	146.39	216	1.48	3.91
11.00	211	328	470	211	142.09	211	1.49	3.95
12.00	209	330	470	209	139.20	209	1.50	4.00
13.00	204	332	468	204	136.02	204	1.50	4.00
14.00	202	333	467	202	134.14	202	1.50	4.01
15.00	191	334	464	191	129.96	191	1.47	3.89
16.00	188	334	463	188	128.54	188	1.47	3.86
17.00	188	335	463	188	127.76	188	1.47	3.88
18.00	187	335	462	187	127.26	187	1.47	3.89
19.00	187	335	462	187	126.94	187	1.47	3.88
20.00	186	335	462	186	126.79	186	1.47	3.86
21.00	185	335	462	185	126.93	185	1.46	3.83
22.00	184	335	461	184	126.65	184	1.45	3.82
23.00	183	334	461	183	126.75	183	1.45	3.79
24.00	182	334	461	182	126.53	182	1.44	3.77
25.00	181	334	460	181	126.89	181	1.43	3.73

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-2

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 200kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 19/03/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.38	15.08
Diámetro (cm)	6.78	6.67
Relación de vacío (e)	1.00	0.89
Densidad seca (g/cm ³)	1.483	1.564

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.37	%
Presion de celda	401	kPa
contra presión	201	kPa
Esf. Efect. inicial	200	kPa

Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0.00	0.00	199.95	0.0	0.00	1.00
0.05	32.30	0.09	210.71	32.3	0.15	0.00
0.10	44.87	0.25	214.90	44.9	0.21	0.00
0.15	54.29	0.45	218.05	54.3	0.25	0.00
0.20	62.29	0.65	220.71	62.3	0.28	0.00
0.25	69.42	0.84	223.09	69.4	0.31	0.00
0.35	81.40	1.26	227.08	81.4	0.36	0.00
0.50	95.37	1.91	231.74	95.4	0.41	0.00
0.75	113.86	2.91	237.90	113.9	0.48	0.00
1.00	133.19	3.93	244.34	133.2	0.55	0.00
1.25	151.06	4.91	250.30	151.1	0.60	0.00
1.50	167.46	5.82	255.77	167.5	0.65	0.00
1.75	183.55	6.74	261.13	183.5	0.70	0.00
2.00	197.90	7.65	265.91	197.9	0.74	0.00
2.50	225.90	9.30	275.25	225.9	0.82	0.00
3.00	249.80	10.91	283.21	249.8	0.88	0.00
4.00	294.86	13.83	298.23	294.9	0.99	0.00
5.00	333.94	16.45	311.26	333.9	1.07	0.00
6.00	369.68	18.94	323.17	369.7	1.14	0.00
7.00	398.53	21.00	332.79	398.5	1.20	0.00
8.00	425.14	22.88	341.66	425.1	1.24	0.00
9.00	449.77	24.57	349.87	449.8	1.29	0.00
10.00	469.50	26.13	356.45	469.5	1.32	0.00
11.00	489.90	27.41	363.25	489.9	1.35	0.00
12.00	508.18	28.61	369.34	508.2	1.38	0.00
13.00	524.33	29.70	374.72	524.3	1.40	0.00
14.00	538.61	30.64	379.48	538.6	1.42	0.00
15.00	552.07	31.44	383.97	552.1	1.44	0.00
16.00	565.58	32.19	388.47	565.6	1.46	0.00
17.00	575.76	32.82	391.87	575.8	1.47	0.00
18.00	584.86	33.28	394.90	584.9	1.48	0.00
19.00	592.05	33.67	397.30	592.1	1.49	0.00
20.00	597.61	34.01	399.15	597.6	1.50	0.00
21.00	602.11	34.32	400.65	602.1	1.50	0.00
22.00	610.19	34.48	403.35	610.2	1.51	0.00
23.00	607.01	34.61	402.28	607.0	1.51	0.00
24.00	617.17	34.72	405.67	617.2	1.52	0.00
25.00	616.98	34.82	405.61	617.0	1.52	0.00

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso
Elaborado por: Diana Damian
Confinamiento: 400kPa
Fecha: 22/03/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura	(cm)	15.33	14.92
Diámetro	(cm)	6.83	6.58
Relación de vacío	(e)	1.02	0.82
Densidad seca	(g/cm ³)	1.465	1.627

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.68	%
Presión de celda	601	kPa
contra presión	201	kPa
Esf. Efect. inicial	400	kPa

Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0.00	0.00	400.102	0.0	0.00	1.00
0.05	37.68	0.05	412.663	37.7	0.09	0.00
0.10	65.63	0.13	421.978	65.6	0.16	0.00
0.15	84.15	0.26	428.151	84.1	0.20	0.00
0.20	101.78	0.40	434.028	101.8	0.23	0.00
0.25	114.41	0.57	438.238	114.4	0.26	0.00
0.35	136.13	0.92	445.478	136.1	0.31	0.00
0.50	163.71	1.51	454.672	163.7	0.36	0.00
0.75	204.44	2.47	468.248	204.4	0.44	0.00
1.00	237.21	3.47	479.172	237.2	0.50	0.00
1.25	269.36	4.48	489.890	269.4	0.55	0.00
1.50	299.41	5.47	499.907	299.4	0.60	0.00
1.75	329.40	6.41	509.903	329.4	0.65	0.00
2.00	357.29	7.33	519.199	357.3	0.69	0.00
2.50	410.53	9.10	536.946	410.5	0.76	0.00
3.00	459.75	10.82	553.354	459.8	0.83	0.00
4.00	554.11	14.18	584.807	554.1	0.95	0.00
5.00	631.19	17.06	610.498	631.2	1.03	0.00
6.00	703.06	19.67	634.456	703.1	1.11	0.00
7.00	768.64	22.08	656.315	768.6	1.17	0.00
8.00	825.05	24.29	675.118	825.0	1.22	0.00
9.00	877.17	26.31	692.491	877.2	1.27	0.00
10.00	929.10	28.22	709.804	929.1	1.31	0.00
11.00	973.96	29.83	724.755	974.0	1.34	0.00
12.00	1012.79	31.35	737.699	1012.8	1.37	0.00
13.00	1049.63	32.72	749.979	1049.6	1.40	0.00
14.00	1086.72	33.96	762.344	1086.7	1.43	0.00
15.00	1115.73	35.01	772.013	1115.7	1.45	0.00
16.00	1142.78	36.01	781.028	1142.8	1.46	0.00
17.00	1167.60	36.86	789.303	1167.6	1.48	0.00
18.00	1188.34	37.65	796.217	1188.3	1.49	0.00
19.00	1205.09	38.28	801.799	1205.1	1.50	0.00
20.00	1220.73	38.84	807.011	1220.7	1.51	0.00
21.00	1234.22	39.32	811.509	1234.2	1.52	0.00
22.00	1238.99	39.78	813.098	1239.0	1.52	0.00
23.00	1244.66	40.11	814.990	1244.7	1.53	0.00
24.00	1239.16	40.38	813.155	1239.2	1.52	0.00
25.00	1232.58	40.60	810.962	1232.6	1.52	0.00

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

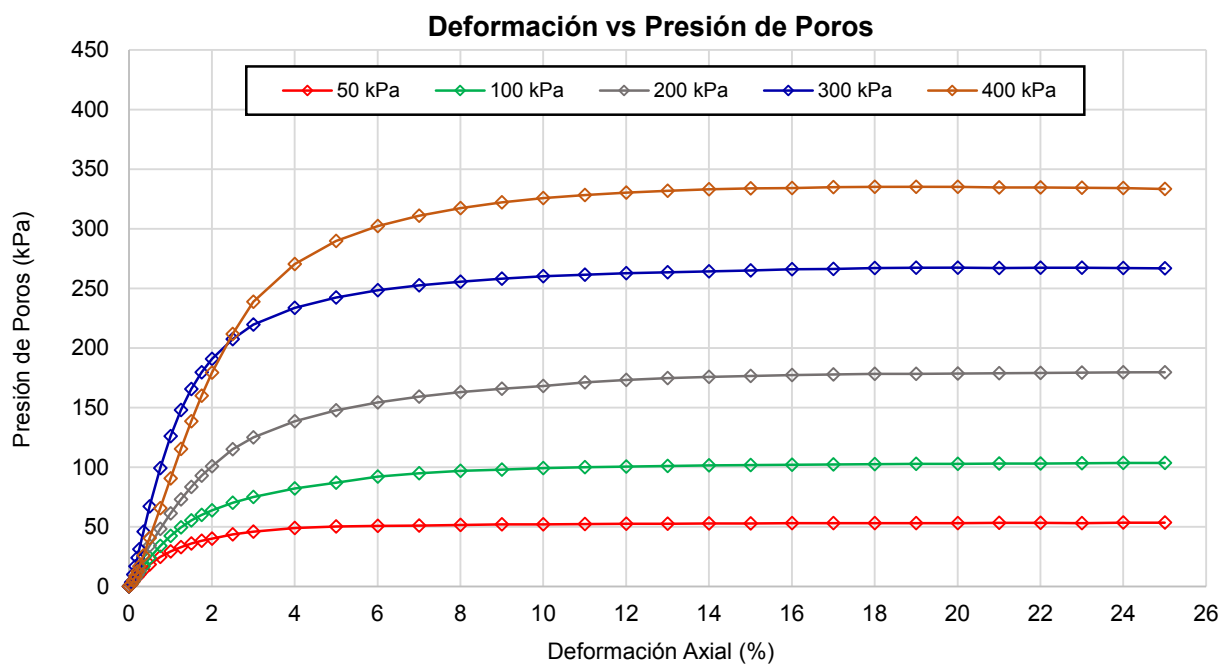
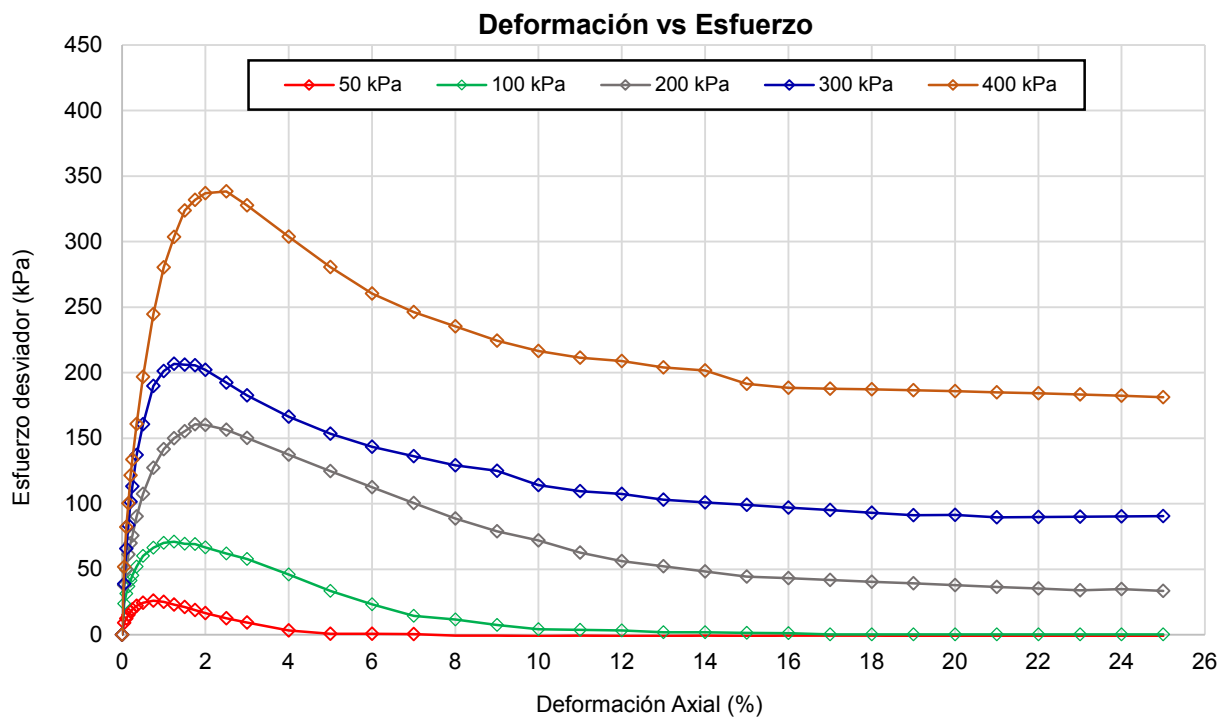
ASTM-D4767

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 26/06/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-Drenado (CD)

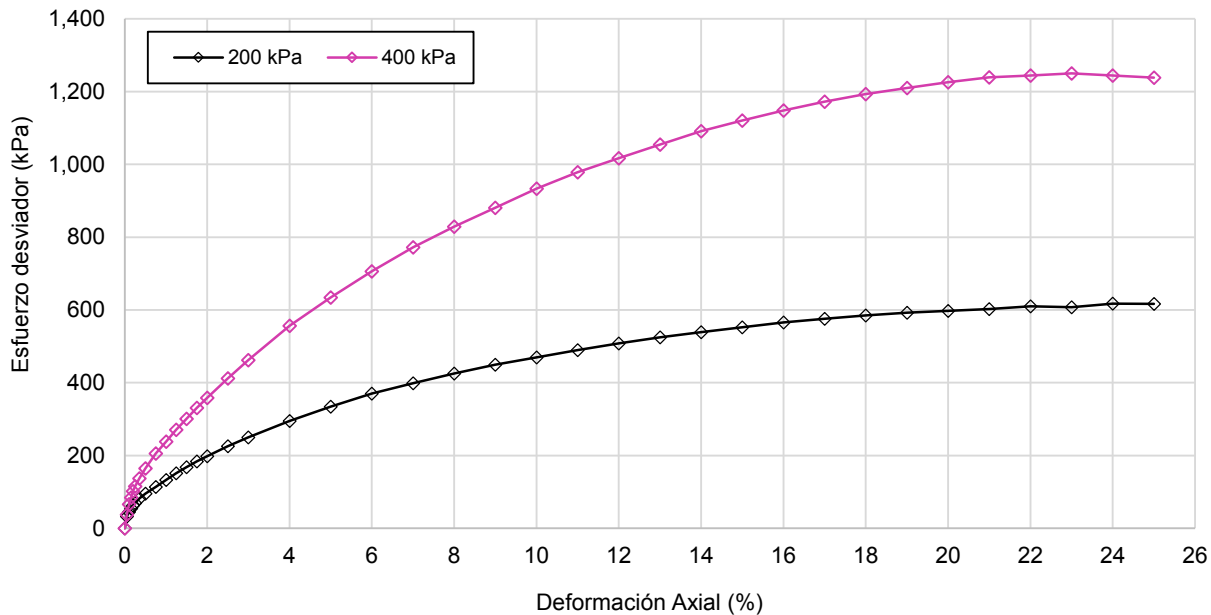
ASTM-D7181

Muestra:	M-2	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	19/03/2021

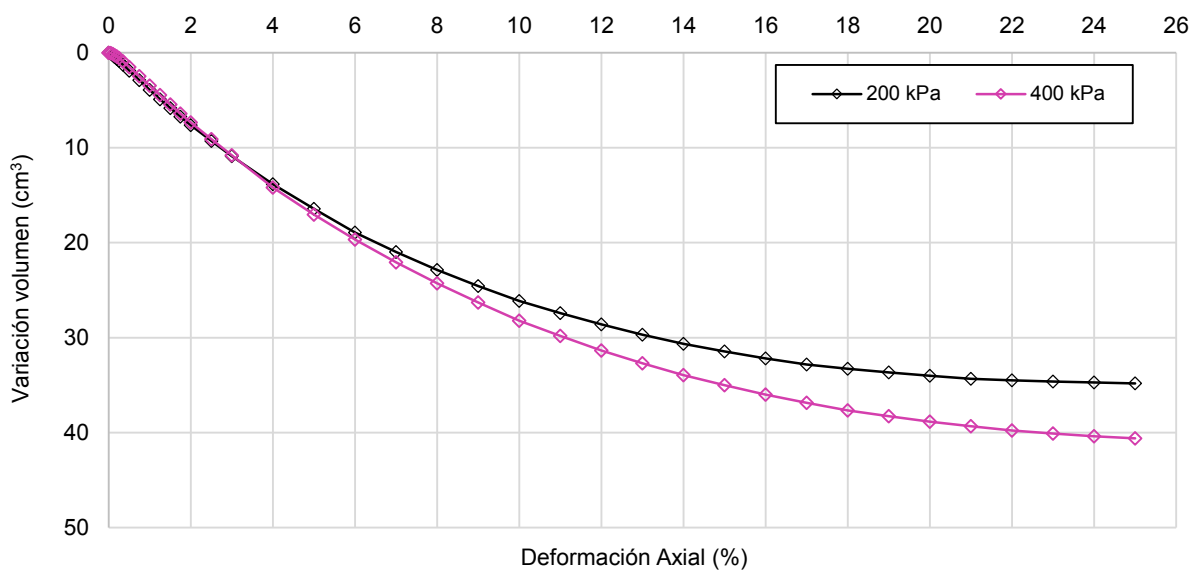
Clasificación SUCS:	SP
----------------------------	----

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Deformación vs Esfuerzo



Deformación vs Volumen



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)

ASTM-D4767 y ASTM-D7181

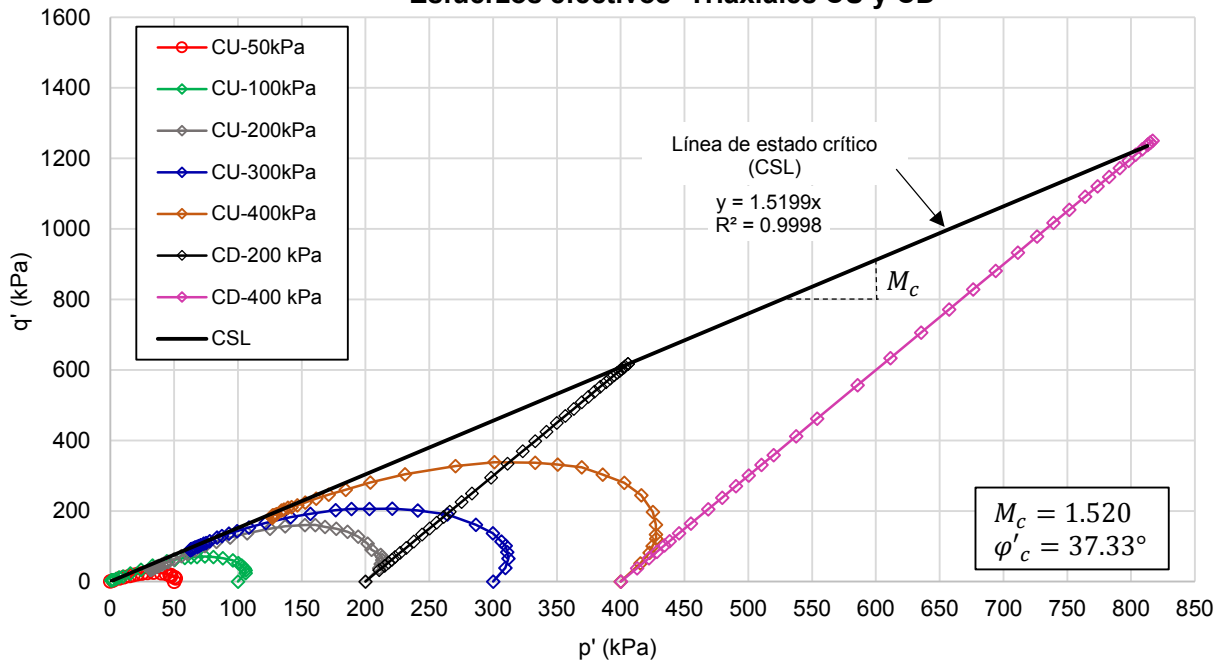
Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 26/06/2021

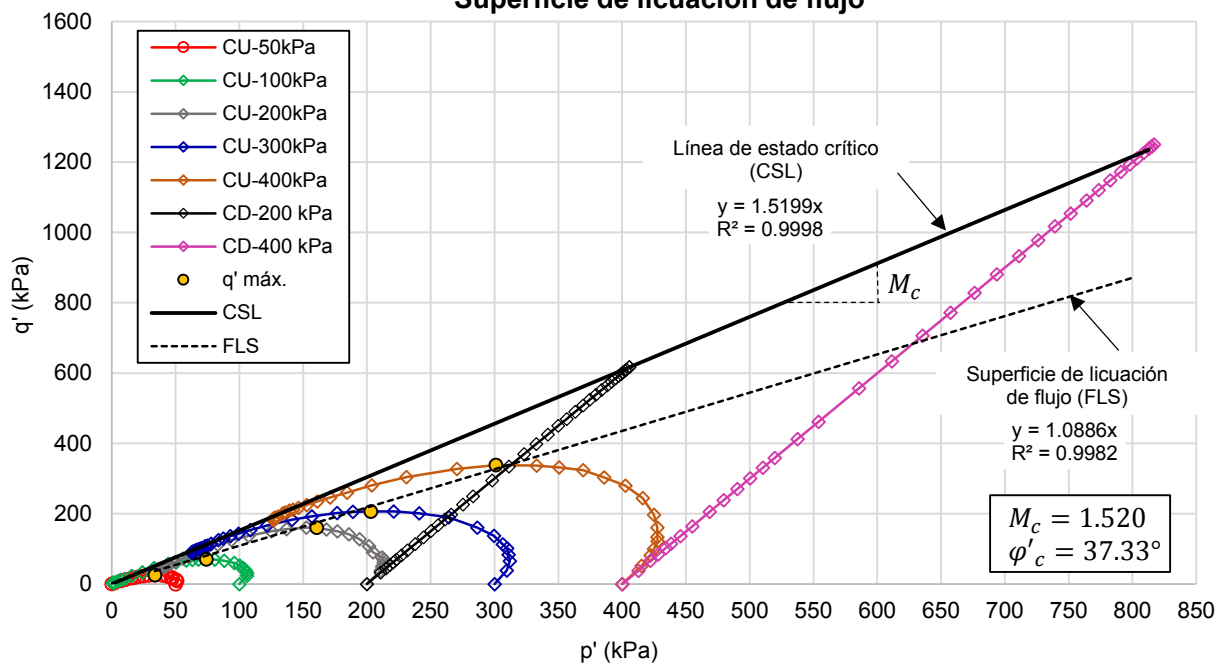
Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Esfuerzos efectivos -Triaxiales CU y CD



Superficie de licuación de flujo



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 26/06/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Fotografía individual de los especímenes triaxiales CU



Ensayo triaxial:CU-50kPa



Ensayo triaxial:CU-100kPa



Ensayo triaxial:CU-200kPa



Ensayo triaxial:CU-300kPa



Ensayo triaxial:CU-400kPa

Fotografía individual de los especímenes triaxiales CD



Ensayo triaxial:CD-200kPa



Ensayo triaxial:CD-400kPa

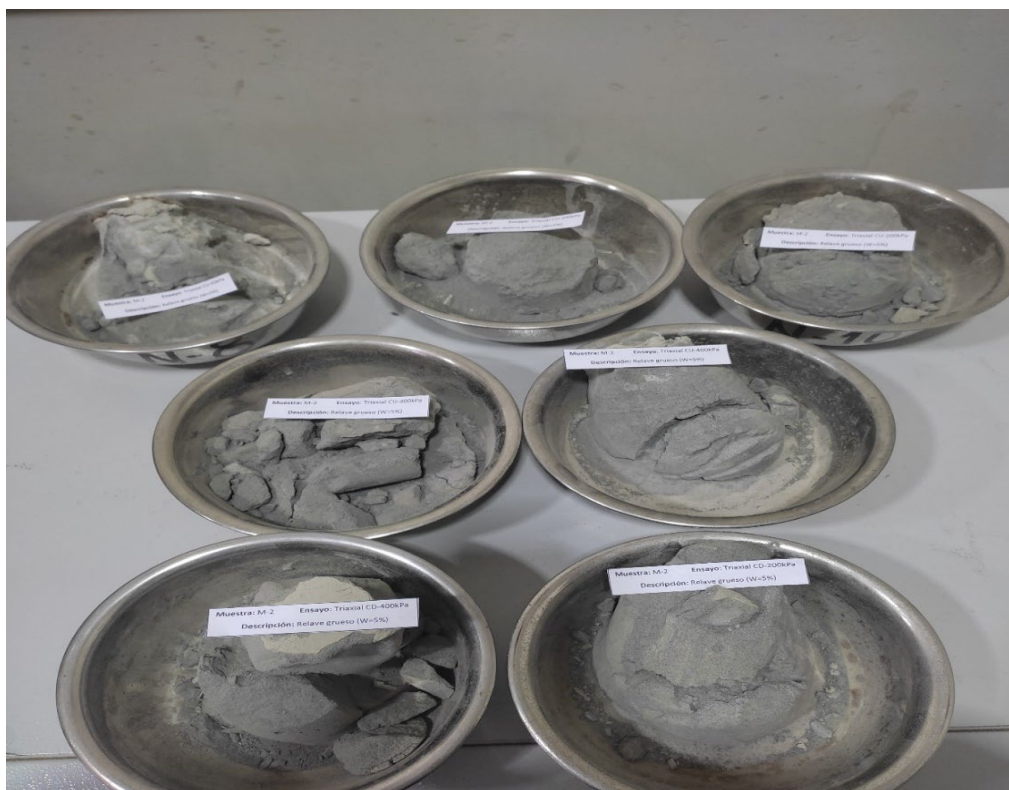
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

Muestra:	M-2	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	26/06/2021

Clasificación SUCS:	SP
----------------------------	-----------

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 %

Fotografía grupal de los especímenes triaxiales CU y CD



Especímenes ensayados en condiciones drenados y no drenados de la muestra de relave grueso M-2

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-2	Confinamiento:	50kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	30/03/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	67.298

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

1. La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

2. No se aplicó la corrección debido a que el esfuerzo desviador para el confinamiento de 50kPa es muy pequeña a grandes deformaciones llegando a tener valores de cero y negativos como se observa en tabla.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	8.992	0.033	0.4	8.992
03	0.10	12.357	0.067	0.5	12.357
04	0.15	15.158	0.100	0.7	15.158
05	0.20	17.676	0.133	0.8	17.676
06	0.25	19.349	0.166	0.9	19.349
07	0.35	22.132	0.233	1.1	22.132
08	0.50	24.336	0.333	1.4	24.336
09	0.75	25.949	0.499	1.9	25.949
10	1.00	25.049	0.666	2.7	25.049
11	1.25	23.042	0.832	3.6	23.042
12	1.50	21.045	0.999	4.7	21.045
13	1.75	18.782	1.165	6.2	17.617
14	2.00	16.530	1.331	8.1	15.199
15	2.50	12.609	1.664	13.2	10.944
16	3.00	9.272	1.997	21.5	7.275
17	4.00	3.239	2.663	82.2	0.576
18	5.00	0.801	3.328	415.4	-2.527
19	6.00	0.793	3.994	503.8	-3.201
20	7.00	0.523	4.660	891.2	-4.137
21	8.00	-0.776	5.326	-686.4	-0.776
22	9.00	-0.767	5.991	-780.6	-0.767
23	10.00	-1.012	6.657	-657.8	-1.012
24	11.00	-0.751	7.323	-975.6	-0.751
25	12.00	-0.990	7.988	-807.2	-0.990
26	13.00	-0.978	8.654	-884.6	-0.978
27	14.00	-0.725	9.320	-1284.9	-0.725
28	15.00	-0.956	9.985	-1044.7	-0.956
29	16.00	-0.708	10.651	-1503.4	-0.708
30	17.00	-0.700	11.317	-1616.7	-0.700
31	18.00	-0.692	11.983	-1732.6	-0.692
32	19.00	-0.911	12.648	-1388.6	-0.911
33	20.00	-0.900	13.314	-1480.0	-0.900
34	21.00	-0.888	13.980	-1573.6	-0.888
35	22.00	-0.877	14.645	-1669.7	-0.877
36	23.00	-0.866	15.311	-1768.3	-0.866
37	24.00	-0.855	15.977	-1869.4	-0.855
38	25.00	-0.843	16.642	-1973.3	-0.843

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-2	Confinamiento:	100kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	30/03/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	65.887

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

2. No se aplicó la corrección debido a que el esfuerzo desviador para el confinamiento de 100kPa es muy pequeña a grandes deformaciones llegando a tener valores de cero y negativos como se observa en tabla.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	23.745	0.034	0.1	23.745
03	0.10	31.351	0.068	0.2	31.351
04	0.15	36.900	0.102	0.3	36.900
05	0.20	41.272	0.136	0.3	41.272
06	0.25	45.347	0.170	0.4	45.347
07	0.35	52.024	0.238	0.5	52.024
08	0.50	60.117	0.340	0.6	60.117
09	0.75	66.370	0.510	0.8	66.370
10	1.00	69.978	0.680	1.0	69.978
11	1.25	70.959	0.850	1.2	70.959
12	1.50	69.335	1.020	1.5	69.335
13	1.75	69.159	1.190	1.7	69.159
14	2.00	66.684	1.360	2.0	66.684
15	2.50	62.054	1.700	2.7	62.054
16	3.00	57.753	2.040	3.5	57.753
17	4.00	45.895	2.720	5.9	43.175
18	5.00	33.436	3.400	10.2	30.036
19	6.00	23.159	4.080	17.6	19.079
20	7.00	14.457	4.760	32.9	9.697
21	8.00	11.603	5.440	46.9	6.163
22	9.00	7.473	6.120	81.9	1.354
23	10.00	4.223	6.800	161.0	-2.576
24	11.00	3.654	7.479	204.7	-3.825
25	12.00	3.355	8.159	243.2	-4.804
26	13.00	1.786	8.839	494.9	-7.053
27	14.00	1.766	9.519	539.1	-7.754
28	15.00	1.496	10.199	681.9	-8.703
29	16.00	1.232	10.879	883.2	-9.647
30	17.00	0.243	11.559	4748.3	-11.316
31	18.00	0.241	12.239	5089.0	-11.999
32	19.00	0.238	12.919	5438.0	-12.682
33	20.00	0.235	13.599	5795.8	-13.364
34	21.00	0.232	14.279	6162.6	-14.047
35	22.00	0.229	14.959	6538.8	-14.730
36	23.00	0.226	15.639	6924.8	-15.413
37	24.00	0.223	16.319	7321.0	-16.096
38	25.00	0.220	16.999	7727.7	-16.779

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-2	Confinamiento:	200kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	30/03/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	66.051

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	37.920	0.034	0.1	37.920
03	0.10	49.563	0.068	0.1	49.563
04	0.15	61.195	0.102	0.2	61.195
05	0.20	69.902	0.136	0.2	69.902
06	0.25	75.689	0.170	0.2	75.689
07	0.35	90.154	0.237	0.3	90.154
08	0.50	107.442	0.339	0.3	107.442
09	0.75	127.447	0.509	0.4	127.447
10	1.00	141.572	0.678	0.5	141.572
11	1.25	149.861	0.848	0.6	149.861
12	1.50	155.231	1.017	0.7	155.231
13	1.75	160.571	1.187	0.7	160.571
14	2.00	160.163	1.357	0.8	160.163
15	2.50	156.500	1.696	1.1	156.500
16	3.00	150.036	2.035	1.4	150.036
17	4.00	137.282	2.713	2.0	137.282
18	5.00	124.762	3.391	2.7	124.762
19	6.00	112.476	4.070	3.6	112.476
20	7.00	100.423	4.748	4.7	100.423
21	8.00	93.973	5.426	5.8	88.547
22	9.00	84.984	6.104	7.2	78.880
23	10.00	78.797	6.783	8.6	72.015
24	11.00	70.130	7.461	10.6	62.669
25	12.00	64.205	8.139	12.7	56.066
26	13.00	60.937	8.817	14.5	52.119
27	14.00	57.726	9.496	16.4	48.231
28	15.00	54.574	10.174	18.6	44.400
29	16.00	53.932	10.852	20.1	43.080
30	17.00	53.290	11.530	21.6	41.760
31	18.00	52.648	12.209	23.2	40.440
32	19.00	52.006	12.887	24.8	39.119
33	20.00	51.364	13.565	26.4	37.799
34	21.00	50.722	14.244	28.1	36.479
35	22.00	50.080	14.922	29.8	35.158
36	23.00	49.438	15.600	31.6	33.838
37	24.00	51.014	16.278	31.9	34.736
38	25.00	50.343	16.957	33.7	33.386

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-2	Confinamiento:	300kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	29/06/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		65.259

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	38.847	0.034	0.1	38.847
03	0.10	65.708	0.069	0.1	65.708
04	0.15	83.586	0.103	0.1	83.586
05	0.20	101.447	0.137	0.1	101.447
06	0.25	113.325	0.172	0.2	113.325
07	0.35	137.045	0.240	0.2	137.045
08	0.50	160.637	0.343	0.2	160.637
09	0.75	189.906	0.515	0.3	189.906
10	1.00	201.267	0.686	0.3	201.267
11	1.25	206.663	0.858	0.4	206.663
12	1.50	206.140	1.030	0.5	206.140
13	1.75	205.617	1.201	0.6	205.617
14	2.00	202.164	1.373	0.7	202.164
15	2.50	192.387	1.716	0.9	192.387
16	3.00	182.701	2.059	1.1	182.701
17	4.00	166.467	2.746	1.6	166.467
18	5.00	153.372	3.432	2.2	153.372
19	6.00	143.326	4.119	2.9	143.326
20	7.00	136.241	4.805	3.5	136.241
21	8.00	129.275	5.492	4.2	129.275
22	9.00	125.149	6.178	4.9	125.149
23	10.00	121.083	6.865	5.7	114.218
24	11.00	117.077	7.551	6.4	109.525
25	12.00	115.761	8.238	7.1	107.523
26	13.00	111.845	8.924	8.0	102.920
27	14.00	110.559	9.611	8.7	100.948
28	15.00	109.274	10.297	9.4	98.976
29	16.00	107.988	10.984	10.2	97.004
30	17.00	106.702	11.670	10.9	95.032
31	18.00	105.417	12.357	11.7	93.060
32	19.00	104.131	13.043	12.5	91.088
33	20.00	105.238	13.730	13.0	91.508
34	21.00	103.922	14.416	13.9	89.506
35	22.00	104.939	15.103	14.4	89.836
36	23.00	105.895	15.789	14.9	90.106
37	24.00	106.792	16.476	15.4	90.316
38	25.00	107.629	17.162	15.9	90.467

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-2	Confinamiento:	400kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	27/06/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)	64.682

Abreviaturas:

Def. : Deformación

Correcc. : Corrección

Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.00	0.000	0.0	0.000
02	0.05	51.71	0.035	0.1	51.711
03	0.10	82.09	0.069	0.1	82.088
04	0.15	100.28	0.104	0.1	100.279
05	0.20	121.49	0.139	0.1	121.490
06	0.25	133.57	0.173	0.1	133.572
07	0.35	160.73	0.242	0.2	160.732
08	0.50	196.83	0.346	0.2	196.828
09	0.75	244.66	0.519	0.2	244.661
10	1.00	280.20	0.693	0.2	280.200
11	1.25	303.53	0.866	0.3	303.535
12	1.50	323.75	1.039	0.3	323.750
13	1.75	331.90	1.212	0.4	331.898
14	2.00	337.02	1.385	0.4	337.019
15	2.50	338.27	1.732	0.5	338.267
16	3.00	327.68	2.078	0.6	327.676
17	4.00	303.85	2.770	0.9	303.846
18	5.00	280.44	3.463	1.2	280.443
19	6.00	260.33	4.156	1.6	260.327
20	7.00	246.24	4.848	2.0	246.236
21	8.00	235.19	5.541	2.4	235.189
22	9.00	224.32	6.234	2.8	224.324
23	10.00	216.38	6.926	3.2	216.381
24	11.00	211.27	7.619	3.6	211.268
25	12.00	208.89	8.311	4.0	208.894
26	13.00	203.87	9.004	4.4	203.873
27	14.00	201.53	9.697	4.8	201.530
28	15.00	201.77	10.389	5.1	191.384
29	16.00	199.40	11.082	5.6	188.317
30	17.00	199.55	11.775	5.9	187.777
31	18.00	199.64	12.467	6.2	187.176
32	19.00	199.67	13.160	6.6	186.513
33	20.00	199.64	13.852	6.9	185.790
34	21.00	199.55	14.545	7.3	185.006
35	22.00	199.40	15.238	7.6	184.162
36	23.00	199.19	15.930	8.0	183.256
37	24.00	198.91	16.623	8.4	182.289
38	25.00	198.58	17.315	8.7	181.262

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-2	Confinamiento:	200kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	19/03/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		66.730

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

1. La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	32.300	0.034	0.1	32.300
03	0.10	44.868	0.067	0.1	44.868
04	0.15	54.292	0.101	0.2	54.292
05	0.20	62.285	0.134	0.2	62.285
06	0.25	69.419	0.168	0.2	69.419
07	0.35	81.400	0.235	0.3	81.400
08	0.50	95.371	0.336	0.4	95.371
09	0.75	113.861	0.504	0.4	113.861
10	1.00	133.188	0.671	0.5	133.188
11	1.25	151.058	0.839	0.6	151.058
12	1.50	167.458	1.007	0.6	167.458
13	1.75	183.548	1.175	0.6	183.548
14	2.00	197.901	1.343	0.7	197.901
15	2.50	225.899	1.678	0.7	225.899
16	3.00	249.796	2.014	0.8	249.796
17	4.00	294.859	2.685	0.9	294.859
18	5.00	333.937	3.357	1.0	333.937
19	6.00	369.678	4.028	1.1	369.678
20	7.00	398.529	4.700	1.2	398.529
21	8.00	425.144	5.371	1.3	425.144
22	9.00	449.770	6.042	1.3	449.770
23	10.00	469.497	6.714	1.4	469.497
24	11.00	489.902	7.385	1.5	489.902
25	12.00	508.178	8.056	1.6	508.178
26	13.00	524.327	8.728	1.7	524.327
27	14.00	538.606	9.399	1.7	538.606
28	15.00	552.068	10.070	1.8	552.068
29	16.00	565.577	10.742	1.9	565.577
30	17.00	575.757	11.413	2.0	575.757
31	18.00	584.864	12.085	2.1	584.864
32	19.00	592.052	12.756	2.2	592.052
33	20.00	597.614	13.427	2.2	597.614
34	21.00	602.110	14.099	2.3	602.110
35	22.00	610.193	14.770	2.4	610.193
36	23.00	607.011	15.441	2.5	607.011
37	24.00	617.172	16.113	2.6	617.172
38	25.00	616.982	16.784	2.7	616.982

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-2	Confinamiento:	400kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	22/03/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		65.751

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

La corrección se aplica si el error del esfuerzo desviador debido a la resistencia de la membrana supera el 5%.

N°	Def. (%)	$\sigma_{desv.}$ (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	$\sigma_{desv.}$ Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	37.682	0.034	0.1	37.682
03	0.10	65.627	0.068	0.1	65.627
04	0.15	84.146	0.102	0.1	84.146
05	0.20	101.778	0.136	0.1	101.778
06	0.25	114.406	0.170	0.1	114.406
07	0.35	136.127	0.238	0.2	136.127
08	0.50	163.708	0.341	0.2	163.708
09	0.75	204.438	0.511	0.2	204.438
10	1.00	237.209	0.681	0.3	237.209
11	1.25	269.362	0.852	0.3	269.362
12	1.50	299.414	1.022	0.3	299.414
13	1.75	329.401	1.192	0.4	329.401
14	2.00	357.289	1.363	0.4	357.289
15	2.50	410.530	1.703	0.4	410.530
16	3.00	459.755	2.044	0.4	459.755
17	4.00	554.113	2.725	0.5	554.113
18	5.00	631.186	3.407	0.5	631.186
19	6.00	703.062	4.088	0.6	703.062
20	7.00	768.638	4.770	0.6	768.638
21	8.00	825.047	5.451	0.7	825.047
22	9.00	877.167	6.132	0.7	877.167
23	10.00	929.104	6.814	0.7	929.104
24	11.00	973.958	7.495	0.8	973.958
25	12.00	1012.791	8.176	0.8	1012.791
26	13.00	1049.629	8.858	0.8	1049.629
27	14.00	1086.725	9.539	0.9	1086.725
28	15.00	1115.733	10.220	0.9	1115.733
29	16.00	1142.778	10.902	1.0	1142.778
30	17.00	1167.602	11.583	1.0	1167.602
31	18.00	1188.343	12.264	1.0	1188.343
32	19.00	1205.090	12.946	1.1	1205.090
33	20.00	1220.727	13.627	1.1	1220.727
34	21.00	1234.221	14.309	1.2	1234.221
35	22.00	1238.987	14.990	1.2	1238.987
36	23.00	1244.662	15.671	1.3	1244.662
37	24.00	1239.157	16.353	1.3	1239.157
38	25.00	1232.578	17.034	1.4	1232.578

Anexo B.3 - Reportes de los ensayos triaxiales de la muestra de relave M-3

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	50 kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	03/05/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.45	15.18
Diámetro (cm)	6.83	6.78
Relación de vacío (e)	0.82	0.77
Densidad seca (g/cm³)	1.60	1.65

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.94	%
Presion de celda contra presión	251	kPa
Esf. Efect. inicial	50	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0.00	0.00	50.0	0.0	50.02	0.0	0.00	1.00
0.05	11.07	1.80	53.7	11.1	51.91	11.1	0.21	1.23
0.10	13.83	4.10	54.6	13.8	50.53	13.8	0.27	1.30
0.15	13.82	6.30	54.6	13.8	48.33	13.8	0.29	1.32
0.20	16.58	8.30	55.5	16.6	47.25	16.6	0.35	1.40
0.25	16.57	10.30	55.5	16.6	45.24	16.6	0.37	1.42
0.35	19.31	13.90	56.5	19.3	42.56	19.3	0.45	1.53
0.50	22.04	18.60	57.4	22.0	38.77	22.0	0.57	1.70
0.75	21.98	24.80	57.3	22.0	32.55	22.0	0.68	1.87
1.00	21.93	29.70	57.3	21.9	27.63	21.9	0.79	2.08
1.25	19.14	33.60	56.4	19.1	22.80	19.1	0.84	2.17
1.50	15.37	36.40	55.1	15.4	18.75	15.4	0.82	2.13
1.75	15.16	38.60	55.1	15.2	16.48	15.2	0.92	2.33
2.00	9.53	40.60	53.2	9.5	12.60	9.5	0.76	2.01
2.50	6.45	43.60	52.2	6.4	8.57	6.4	0.75	2.00
3.00	3.39	45.30	51.2	3.4	5.85	3.4	0.58	1.72
4.00	0.02	46.90	50.0	0.0	3.13	0.0	0.00	1.00
5.00	0.00	47.90	50.0	0.0	2.12	0.0	0.00	1.00
6.00	0.00	48.30	50.0	0.0	1.72	0.0	0.00	1.00
7.00	0.00	48.60	50.0	0.0	1.42	0.0	0.00	1.00
8.00	0.00	49.00	50.0	0.0	1.02	0.0	0.00	1.00
9.00	0.00	49.30	50.0	0.0	0.72	0.0	0.00	1.00
10.00	0.00	49.70	50.0	0.0	0.32	0.0	0.00	1.00
11.00	0.00	49.90	50.0	0.0	0.12	0.0	0.00	1.00
12.00	0.00	50.10	50.0	0.0	-0.08	0.0	0.00	1.00
13.00	0.00	50.20	50.0	0.0	-0.18	0.0	0.00	1.00
14.00	0.00	50.20	50.0	0.0	-0.18	0.0	0.00	1.00
15.00	0.00	50.40	50.0	0.0	-0.38	0.0	0.00	1.00
16.00	0.00	50.50	50.0	0.0	-0.48	0.0	0.00	1.00
17.00	0.00	50.60	50.0	0.0	-0.58	0.0	0.00	1.00
18.00	0.00	50.80	50.0	0.0	-0.78	0.0	0.00	1.00
19.00	0.00	50.90	50.0	0.0	-0.88	0.0	0.00	1.00
20.00	0.00	51.00	50.0	0.0	-0.98	0.0	0.00	1.00
21.00	0.00	51.10	50.0	0.0	-1.08	0.0	0.00	1.00
22.00	0.00	51.20	50.0	0.0	-1.18	0.0	0.00	1.00
23.00	0.00	51.40	50.0	0.0	-1.38	0.0	0.00	1.00
24.00	0.00	51.50	50.0	0.0	-1.48	0.0	0.00	1.00
25.00	0.00	51.60	50.0	0.0	-1.58	0.0	0.00	1.00

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso
Elaborado por: Diana Damian
Confinamiento: 100 kPa
Fecha: 28/04/2021

Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.45	15.31
Diámetro (cm)	6.80	6.69
Relación de vacío (e)	0.81	0.74
Densidad seca (g/cm³)	1.61	1.68

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.98	%
Presion de celda contra presión	301	kPa
Esf. Efect. inicial	201	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1 / σ'_3
0.00	0	0.00	100	0	99.97	0	0.00	1.00
0.05	26	1.60	109	26	106.90	26	0.24	1.26
0.10	31	4.10	110	31	106.29	31	0.29	1.33
0.15	37	6.50	112	37	105.78	37	0.35	1.40
0.20	40	8.90	113	40	104.32	40	0.38	1.44
0.25	43	11.10	114	43	103.06	43	0.41	1.48
0.35	48	15.60	116	48	100.44	48	0.48	1.57
0.50	54	22.10	118	54	95.80	54	0.56	1.69
0.75	59	32.00	120	59	87.74	59	0.68	1.87
1.00	62	40.40	121	62	80.23	62	0.77	2.04
1.25	62	47.80	121	62	72.77	62	0.85	2.18
1.50	62	54.20	121	62	66.32	62	0.93	2.35
1.75	56	59.80	119	56	58.81	56	0.95	2.39
2.00	53	64.80	118	53	52.83	53	1.00	2.51
2.50	44	72.80	115	44	41.97	44	1.06	2.63
3.00	36	78.90	112	36	33.03	36	1.09	2.70
4.00	19	86.70	106	19	19.65	19	0.97	2.44
5.00	11	91.10	104	11	12.48	11	0.87	2.22
6.00	5	93.70	102	5	8.06	5	0.66	1.85
7.00	3	94.90	101	3	5.96	3	0.44	1.52
8.00	3	96.20	101	3	4.65	3	0.56	1.69
9.00	0	97.10	100	0	2.87	0	0.00	1.00
10.00	0	97.60	100	0	2.37	0	0.00	1.00
11.00	0	98.10	100	0	1.87	0	0.00	1.00
12.00	0	98.20	100	0	1.77	0	0.00	1.00
13.00	0	98.70	100	0	1.27	0	0.00	1.00
14.00	0	98.80	100	0	1.17	0	0.00	1.00
15.00	0	99.00	100	0	0.97	0	0.00	1.00
16.00	0	99.40	100	0	0.57	0	0.00	1.00
17.00	0	99.70	100	0	0.27	0	0.00	1.00
18.00	0	100.20	100	0	-0.23	0	0.00	1.00
19.00	0	100.50	100	0	-0.53	0	0.00	1.00
20.00	0	100.70	100	0	-0.73	0	0.00	1.00
21.00	0	101.00	100	0	-1.03	0	0.00	1.00
22.00	0	101.10	100	0	-1.13	0	0.00	1.00
23.00	0	101.30	100	0	-1.33	0	0.00	1.00
24.00	0	101.40	100	0	-1.43	0	0.00	1.00
25.00	0	101.50	100	0	-1.53	0	0.00	1.00

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	300 kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	08/08/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Clasificación SUCS:	SP
----------------------------	-----------

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.45	15.01
Diámetro (cm)	6.82	6.66
Relación de vacío (e)	0.82	0.69
Densidad seca (g/cm ³)	1.60	1.73

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.55	%
Presion de celda	501	kPa
contra presión	201	kPa
Esf. Efect. inicial	300	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1 / σ'_3
0.00	0	0	300	0	299.99	0	0.00	1.00
0.05	52	6	317	52	311.61	52	0.17	1.18
0.10	77	13	326	77	313.01	77	0.25	1.27
0.15	95	21	332	95	311.03	95	0.30	1.34
0.20	112	29	337	112	308.64	112	0.36	1.41
0.25	123	37	341	123	304.24	123	0.40	1.47
0.35	140	53	347	140	293.82	140	0.48	1.57
0.50	160	75	353	160	278.02	160	0.58	1.71
0.75	182	108	361	182	252.68	182	0.72	1.95
1.00	193	134	364	193	230.22	193	0.84	2.17
1.25	196	155	365	196	210.50	196	0.93	2.35
1.50	195	171	365	195	193.74	195	1.01	2.52
1.75	192	185	364	192	179.13	192	1.07	2.67
2.00	186	196	362	186	165.99	186	1.12	2.78
2.50	171	213	357	171	143.61	171	1.19	2.97
3.00	156	226	352	156	125.68	156	1.24	3.12
4.00	124	246	341	124	95.24	124	1.30	3.30
5.00	93	261	331	93	70.10	93	1.32	3.37
6.00	67	272	322	67	50.78	67	1.33	3.39
7.00	45	280	315	45	35.02	45	1.30	3.28
8.00	32	285	311	32	25.26	32	1.26	3.16
9.00	24	288	308	24	19.53	24	1.20	3.01
10.00	18	291	306	18	15.32	18	1.18	2.95
11.00	15	292	305	15	12.80	15	1.20	2.99
12.00	13	294	304	13	10.70	13	1.18	2.95
13.00	10	294	303	10	8.92	10	1.12	2.79
14.00	10	295	303	10	8.28	10	1.19	2.98
15.00	10	296	303	10	7.64	10	1.28	3.22
16.00	7	296	302	7	6.30	7	1.15	2.86
17.00	7	296	302	7	6.07	7	1.18	2.94
18.00	7	297	302	7	5.65	7	1.25	3.15
19.00	7	297	302	7	5.32	7	1.31	3.33
20.00	7	297	302	7	4.99	7	1.38	3.56
21.00	7	298	302	7	4.76	7	1.43	3.73
22.00	7	298	302	7	4.53	7	1.48	3.93
23.00	7	298	302	7	4.20	7	1.58	4.33
24.00	7	298	302	7	3.97	7	1.65	4.66
25.00	4	298	301	4	3.13	4	1.38	3.55

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso **Confinamiento:** 400 kPa
Elaborado por: Diana Damian **Fecha:** 10/09/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	15.01
Diámetro (cm)		6.83	6.64
Relación de vacío (e)		0.82	0.68
Densidad seca (g/cm ³)		1.60	1.74

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.26	%
Presion de celda contra presión	601	kPa
Esf. Efect. inicial	400	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	400	0	400.03	0	0.00	1.00
0.05	43	1	414	43	413.11	43	0.10	1.11
0.10	78	3	426	78	422.49	78	0.18	1.20
0.15	109	7	436	109	429.91	109	0.25	1.28
0.20	132	10	444	132	433.84	132	0.30	1.34
0.25	152	14	451	152	436.51	152	0.35	1.39
0.35	181	24	460	181	436.32	181	0.41	1.48
0.50	215	39	472	215	432.47	215	0.50	1.59
0.75	257	66	486	257	419.66	257	0.61	1.77
1.00	288	93	496	288	402.89	288	0.71	1.94
1.25	307	119	502	307	383.57	307	0.80	2.09
1.50	320	143	507	320	363.83	320	0.88	2.24
1.75	328	165	509	328	344.09	328	0.95	2.40
2.00	330	185	510	330	324.55	330	1.02	2.54
2.50	322	219	508	322	288.82	322	1.12	2.78
3.00	307	244	502	307	258.22	307	1.19	2.97
4.00	268	281	489	268	208.80	268	1.28	3.24
5.00	227	307	476	227	169.02	227	1.34	3.43
6.00	187	325	462	187	137.11	187	1.36	3.49
7.00	142	343	447	142	103.88	142	1.36	3.50
8.00	119	353	440	119	86.62	119	1.37	3.54
9.00	96	361	432	96	71.54	96	1.34	3.43
10.00	81	366	427	81	61.02	81	1.33	3.39
11.00	67	371	422	67	51.51	67	1.30	3.29
12.00	53	375	418	53	42.29	53	1.25	3.13
13.00	46	377	415	46	38.46	46	1.20	3.01
14.00	43	379	414	43	35.30	43	1.20	3.01
15.00	39	381	413	39	32.46	39	1.19	2.99
16.00	33	382	411	33	28.74	33	1.14	2.83
17.00	29	384	410	29	26.14	29	1.11	2.77
18.00	26	385	409	26	23.87	26	1.07	2.67
19.00	22	386	407	22	21.92	22	1.01	2.52
20.00	21	386	407	21	20.95	21	1.00	2.51
21.00	20	387	407	20	19.98	20	1.00	2.50
22.00	19	387	406	19	19.21	19	0.98	2.46
23.00	18	388	406	18	18.44	18	0.96	2.41
24.00	17	388	406	17	17.78	17	0.94	2.36
25.00	16	389	405	16	16.71	16	0.93	2.35

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	600 kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	13/09/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Clasificación SUCS:	SP
----------------------------	-----------

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.45	14.93
Diámetro (cm)	6.85	6.64
Relación de vacío (e)	0.84	0.67
Densidad seca (g/cm ³)	1.59	1.75

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	96.68	%
Presion de celda contra presión	801	kPa
Esf. Efect. inicial	600	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	600	0	599.98	0	0.00	1.00
0.05	14	2	605	14	603.10	14	0.02	1.02
0.10	32	2	611	32	608.47	32	0.05	1.05
0.15	81	3	627	81	623.52	81	0.13	1.14
0.20	130	6	643	130	637.55	130	0.20	1.22
0.25	167	9	656	167	647.12	167	0.26	1.28
0.35	216	15	672	216	656.58	216	0.33	1.37
0.50	267	27	689	267	662.33	267	0.40	1.47
0.75	336	48	712	336	663.95	336	0.51	1.61
1.00	395	71	732	395	660.90	395	0.60	1.75
1.25	442	95	747	442	652.84	442	0.68	1.88
1.50	484	119	761	484	642.70	484	0.75	2.01
1.75	514	140	771	514	631.31	514	0.81	2.12
2.00	541	168	780	541	612.71	541	0.88	2.25
2.50	572	216	791	572	574.76	572	1.00	2.49
3.00	583	265	794	583	529.56	583	1.10	2.74
4.00	558	335	786	558	451.28	558	1.24	3.10
5.00	513	383	771	513	387.73	513	1.32	3.37
6.00	465	417	755	465	337.34	465	1.38	3.55
7.00	419	443	740	419	297.15	419	1.41	3.66
8.00	383	462	728	383	265.81	383	1.44	3.77
9.00	342	471	714	342	242.65	342	1.41	3.66
10.00	323	488	707	323	219.90	323	1.47	3.87
11.00	301	496	700	301	204.30	301	1.47	3.89
12.00	282	503	694	282	190.59	282	1.48	3.93
13.00	267	509	689	267	179.53	267	1.48	3.94
14.00	251	514	684	251	169.46	251	1.48	3.93
15.00	238	519	679	238	160.81	238	1.48	3.93
16.00	228	522	676	228	153.95	228	1.48	3.93
17.00	207	525	669	207	143.92	207	1.44	3.76
18.00	199	527	666	199	138.94	199	1.43	3.73
19.00	191	530	664	191	133.80	191	1.43	3.72
20.00	178	527	659	178	132.45	178	1.35	3.44
21.00	175	534	658	175	124.43	175	1.41	3.66
22.00	168	536	656	168	120.20	168	1.40	3.61
23.00	160	537	653	160	116.21	160	1.38	3.55
24.00	155	539	652	155	113.09	155	1.37	3.53
25.00	150	540	650	150	110.19	150	1.36	3.49

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	800 kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	23/10/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.46	14.92
Diámetro (cm)	6.81	6.59
Relación de vacío (e)	0.82	0.64
Densidad seca (g/cm ³)	1.61	1.78

Velocidad	0.025	(cm/min)
Parámetro B	95.82	%
Presion de celda contra presión	1001	kPa
Esf. Efect. inicial	800	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta \mu$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0	800	0	800.00	0	0.00	1.00
0.05	12	0	804	12	803.61	12	0.01	1.01
0.10	18	1	806	18	805.36	18	0.02	1.02
0.15	26	1	809	26	808.08	26	0.03	1.03
0.20	44	1	815	44	813.43	44	0.05	1.05
0.25	85	2	828	85	826.18	85	0.10	1.11
0.35	175	7	858	175	851.85	175	0.21	1.22
0.50	263	18	888	263	869.34	263	0.30	1.34
0.75	361	43	920	361	877.31	361	0.41	1.48
1.00	441	70	947	441	876.71	441	0.50	1.60
1.25	513	100	971	513	870.77	513	0.59	1.73
1.50	569	131	990	569	858.60	569	0.66	1.85
1.75	620	164	1007	620	842.30	620	0.74	1.97
2.00	655	199	1018	655	819.93	655	0.80	2.09
2.50	706	263	1035	706	772.23	706	0.91	2.32
3.00	731	329	1044	731	715.00	731	1.02	2.55
4.00	721	428	1040	721	612.75	721	1.18	2.93
5.00	669	496	1023	669	527.39	669	1.27	3.20
6.00	612	543	1004	612	461.00	612	1.33	3.38
7.00	559	579	986	559	407.88	559	1.37	3.52
8.00	510	607	970	510	362.58	510	1.41	3.65
9.00	472	631	957	472	326.96	472	1.44	3.79
10.00	438	648	946	438	297.65	438	1.47	3.89
11.00	412	665	937	412	272.87	412	1.51	4.05
12.00	390	678	930	390	251.50	390	1.55	4.20
13.00	373	690	924	373	233.77	373	1.59	4.40
14.00	356	696	919	356	222.94	356	1.60	4.41
15.00	342	700	914	342	213.44	342	1.60	4.43
16.00	328	705	909	328	204.22	328	1.60	4.45
17.00	316	708	905	316	197.38	316	1.60	4.44
18.00	308	710	903	308	193.01	308	1.59	4.41
19.00	299	713	900	299	186.37	299	1.61	4.46
20.00	291	715	897	291	181.78	291	1.60	4.43
21.00	271	717	890	271	173.03	271	1.56	4.27
22.00	262	718	887	262	169.28	262	1.55	4.19
23.00	253	719	884	253	165.66	253	1.53	4.11
24.00	247	722	882	247	160.03	247	1.54	4.17
25.00	240	722	880	240	158.016	240	1.52	4.09

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-3

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 50kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 30/10/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,472 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.46	15.21
Diámetro (cm)		6.82	6.79
Relación de vacío (e)		0.82	0.78
Densidad seca (g/cm ³)		1.603	1.644

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.96	%
Presion de celda contra presión	251	kPa
Esf. Efect. inicial	50	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	50.02	0.0	0.00	1.00
0.05	11	0.09	53.70	11.0	0.21	1.22
0.10	14	0.24	54.62	13.8	0.25	1.28
0.15	17	0.43	55.54	16.5	0.30	1.33
0.20	17	0.63	55.54	16.5	0.30	1.33
0.25	19	0.84	56.45	19.3	0.34	1.39
0.35	22	1.23	57.37	22.1	0.38	1.44
0.50	25	1.77	58.29	24.8	0.43	1.50
0.75	33	2.73	61.03	33.0	0.54	1.66
1.00	39	3.68	62.86	38.5	0.61	1.77
1.25	44	4.63	64.68	44.0	0.68	1.88
1.50	49	5.50	66.50	49.4	0.74	1.99
1.75	52	6.36	67.40	52.1	0.77	2.04
2.00	58	7.22	69.21	57.6	0.83	2.15
2.50	66	8.77	71.90	65.6	0.91	2.31
3.00	71	10.33	73.67	70.9	0.96	2.42
4.00	81	13.03	77.16	81.4	1.06	2.63
5.00	89	15.52	79.70	89.0	1.12	2.78
6.00	97	17.74	82.19	96.5	1.17	2.93
7.00	104	19.78	84.63	103.8	1.23	3.08
8.00	108	21.64	86.14	108.4	1.26	3.17
9.00	107	23.33	85.63	106.8	1.25	3.14
10.00	110	24.85	86.84	110.5	1.27	3.21
11.00	114	26.21	88.01	114.0	1.29	3.28
12.00	115	27.38	88.27	114.8	1.30	3.29
13.00	118	28.40	89.36	118.0	1.32	3.36
14.00	119	29.28	89.56	118.6	1.32	3.37
15.00	119	30.08	89.73	119.1	1.33	3.38
16.00	122	30.79	90.70	122.0	1.35	3.44
17.00	122	31.42	90.82	122.4	1.35	3.45
18.00	123	32.02	90.92	122.7	1.35	3.45
19.00	125	32.59	91.78	125.3	1.36	3.50
20.00	125	33.12	91.82	125.4	1.37	3.51
21.00	125	33.60	91.84	125.5	1.37	3.51
22.00	125	34.01	91.84	125.4	1.37	3.51
23.00	125	34.33	91.80	125.3	1.37	3.51
24.00	125	34.64	91.75	125.2	1.36	3.50
25.00	125	34.90	91.67	124.94	1.36	3.50

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-3

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 200kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 18/05/2021

Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,472 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación		Inicio	Final
Altura (cm)		15.45	15.16
Diámetro (cm)		6.84	6.70
Relación de vacío (e)		0.83	0.72
Densidad seca (g/cm ³)		1.593	1.696

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.00	%
Presion de celda	401	kPa
contra presión	201	kPa
Esf. Efect. inicial	200	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	199.88	0.0	0.00	1.00
0.05	31	0.04	210.29	31.2	0.15	1.16
0.10	51	0.15	216.90	51.1	0.24	1.26
0.15	62	0.30	220.68	62.4	0.28	1.31
0.20	71	0.47	223.51	70.9	0.32	1.35
0.25	77	0.63	225.40	76.6	0.34	1.38
0.35	88	1.00	229.17	87.9	0.38	1.44
0.50	102	1.56	233.88	102.0	0.44	1.51
0.75	127	2.53	242.35	127.4	0.53	1.64
1.00	147	3.46	248.92	147.1	0.59	1.74
1.25	167	4.38	255.48	166.8	0.65	1.83
1.50	186	5.28	262.02	186.4	0.71	1.93
1.75	203	6.14	267.61	203.2	0.76	2.02
2.00	220	7.00	273.18	219.9	0.81	2.10
2.50	250	8.78	283.38	250.5	0.88	2.25
3.00	275	10.34	291.62	275.2	0.94	2.38
4.00	321	13.27	307.03	321.4	1.05	2.61
5.00	359	15.93	319.43	358.7	1.12	2.79
6.00	390	18.34	329.78	389.7	1.18	2.95
7.00	420	20.74	339.99	420.3	1.24	3.10
8.00	448	23.15	349.15	447.8	1.28	3.24
9.00	472	25.15	357.14	471.8	1.32	3.36
10.00	493	26.97	364.05	492.5	1.35	3.46
11.00	513	28.67	370.78	512.7	1.38	3.57
12.00	532	30.30	377.35	532.4	1.41	3.66
13.00	546	31.69	381.95	546.2	1.43	3.73
14.00	562	32.94	387.24	562.1	1.45	3.81
15.00	575	34.08	391.50	574.9	1.47	3.88
16.00	587	35.12	395.60	587.2	1.48	3.94
17.00	599	36.06	399.53	599.0	1.50	4.00
18.00	610	36.90	403.29	610.2	1.51	4.05
19.00	619	37.60	406.05	618.5	1.52	4.09
20.00	626	38.24	408.65	626.3	1.53	4.13
21.00	634	38.80	411.12	633.7	1.54	4.17
22.00	638	39.28	412.63	638.3	1.55	4.19
23.00	642	39.68	414.01	642.4	1.55	4.21
24.00	644	40.02	414.49	643.8	1.55	4.22
25.00	647	40.33	415.63	647.26	1.56	4.24

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra: M-3

Descripción: Relave grueso

Confinamiento: 400kPa

Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 14/08/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,472 g/cm³ y humedad de 8 %

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	15.45	15.03
Diámetro (cm)	6.89	6.68
Relación de vacío (e)	0.86	0.70
Densidad seca (g/cm ³)	1.573	1.717

Velocidad	0.0125	(cm/min)
Parámetro B	95.26	%
Presion de celda contra presión	601	kPa
Esf. Efect. inicial	400	kPa

Deformación (%)	σ_{desv} (kPa)	$\Delta vol.$ (cm ³)	p' (kPa)	q' (kPa)	q'/p'	σ'_1/σ'_3
0.00	0	0.00	400.03	0.0	0.00	1.00
0.05	23	0.04	407.63	22.8	0.06	1.22
0.10	63	0.17	420.92	62.7	0.15	1.28
0.15	88	0.33	429.46	88.3	0.21	1.33
0.20	108	0.51	436.10	108.2	0.25	1.33
0.25	122	0.69	440.83	122.4	0.28	1.39
0.35	148	1.07	449.36	148.0	0.33	1.44
0.50	179	1.68	459.77	179.2	0.39	1.50
0.75	225	2.70	474.90	224.6	0.47	1.66
1.00	264	3.71	488.12	264.3	0.54	1.77
1.25	301	4.70	500.37	301.0	0.60	1.88
1.50	338	5.67	512.60	337.7	0.66	1.99
1.75	371	6.59	523.85	371.5	0.71	2.04
2.00	402	7.49	534.14	402.3	0.75	2.15
2.50	464	9.26	554.65	463.9	0.84	2.31
3.00	519	10.95	573.19	519.5	0.91	2.42
4.00	621	14.06	607.11	621.2	1.02	2.63
5.00	708	16.87	635.91	707.6	1.11	2.78
6.00	782	19.46	660.58	781.6	1.18	2.93
7.00	849	21.83	682.98	848.8	1.24	3.08
8.00	906	23.97	702.19	906.5	1.29	3.17
9.00	957	25.98	719.20	957.5	1.33	3.14
10.00	1005	27.83	734.91	1004.6	1.37	3.21
11.00	1048	29.50	749.31	1047.8	1.40	3.28
12.00	1085	31.03	761.56	1084.6	1.42	3.29
13.00	1123	32.54	774.40	1123.1	1.45	3.36
14.00	1155	33.83	785.03	1155.0	1.47	3.37
15.00	1183	35.00	794.43	1183.2	1.49	3.38
16.00	1200	36.05	799.96	1199.8	1.50	3.44
17.00	1216	36.85	805.25	1215.7	1.51	3.45
18.00	1218	37.65	806.06	1218.1	1.51	3.45
19.00	1210	38.55	803.50	1210.4	1.51	3.50
20.00	1203	39.05	801.06	1203.1	1.50	3.51
21.00	1194	39.45	798.16	1194.4	1.50	3.51
22.00	1193	39.95	797.69	1193.0	1.50	3.51
23.00	1189	40.67	796.50	1189.4	1.49	3.51
24.00	1180	40.95	793.22	1179.6	1.49	3.50
25.00	1168	41.15	789.37	1168.01	1.48	3.50

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso

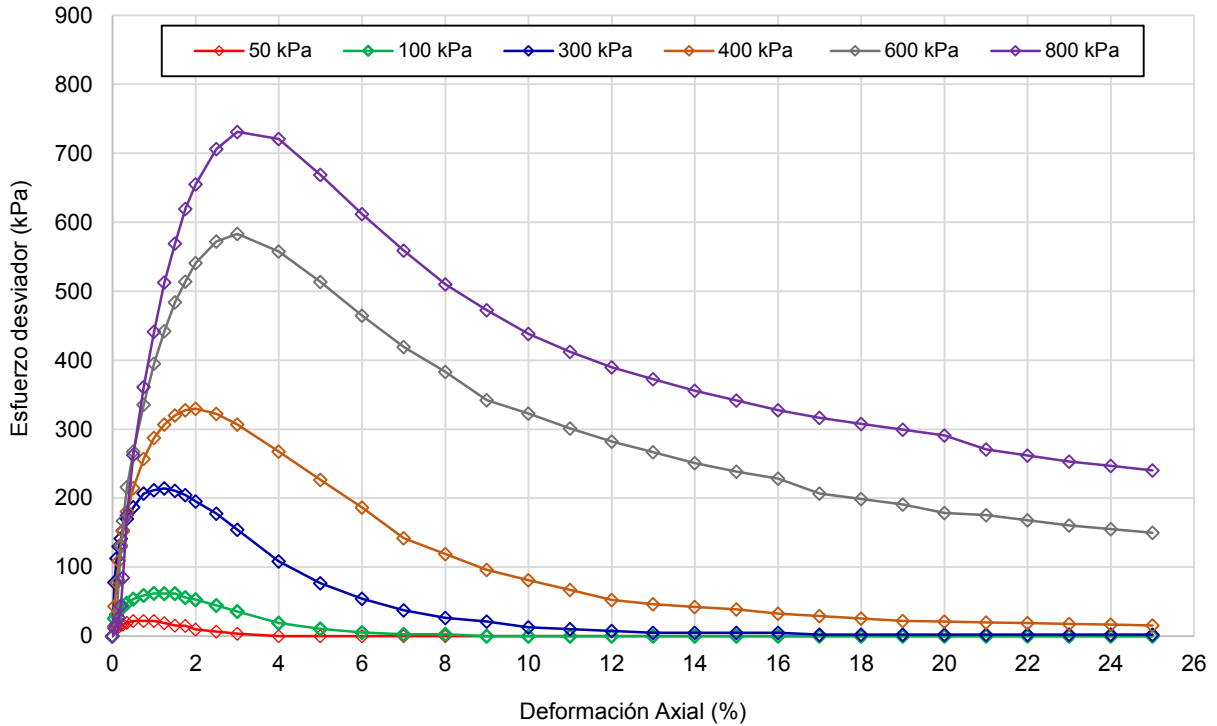
Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 03/05/2021

Clasificación SUCS:

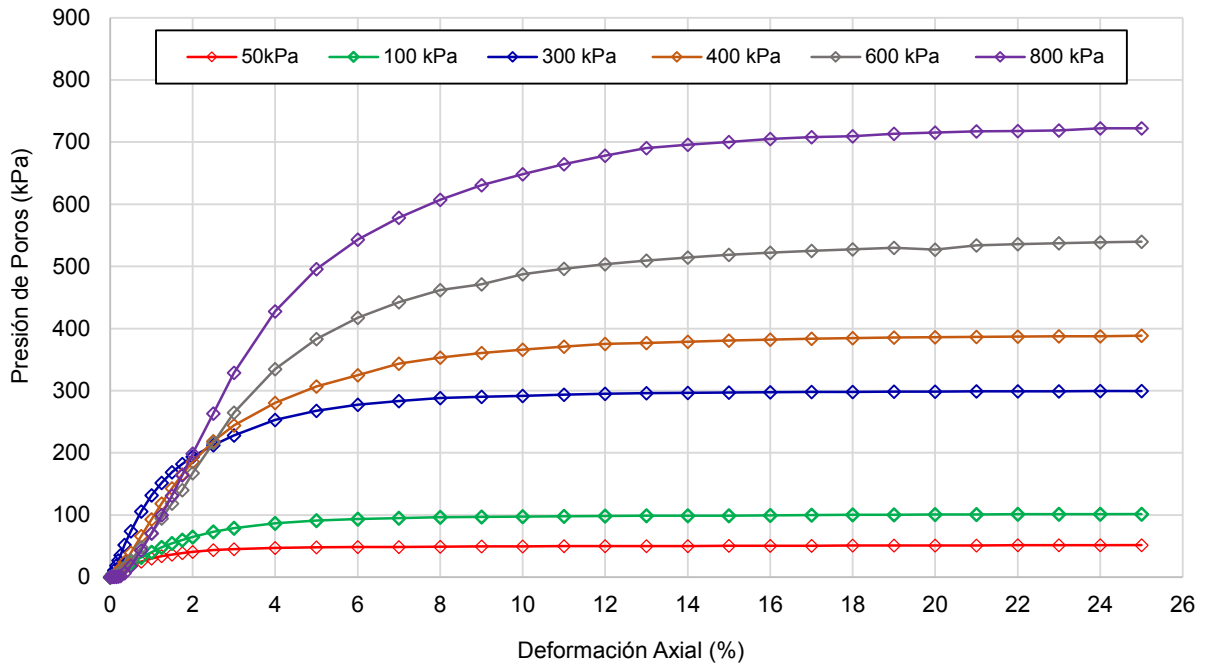
SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Deformación vs Esfuerzo



Deformación vs Presión de Poros



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-Drenado (CD)

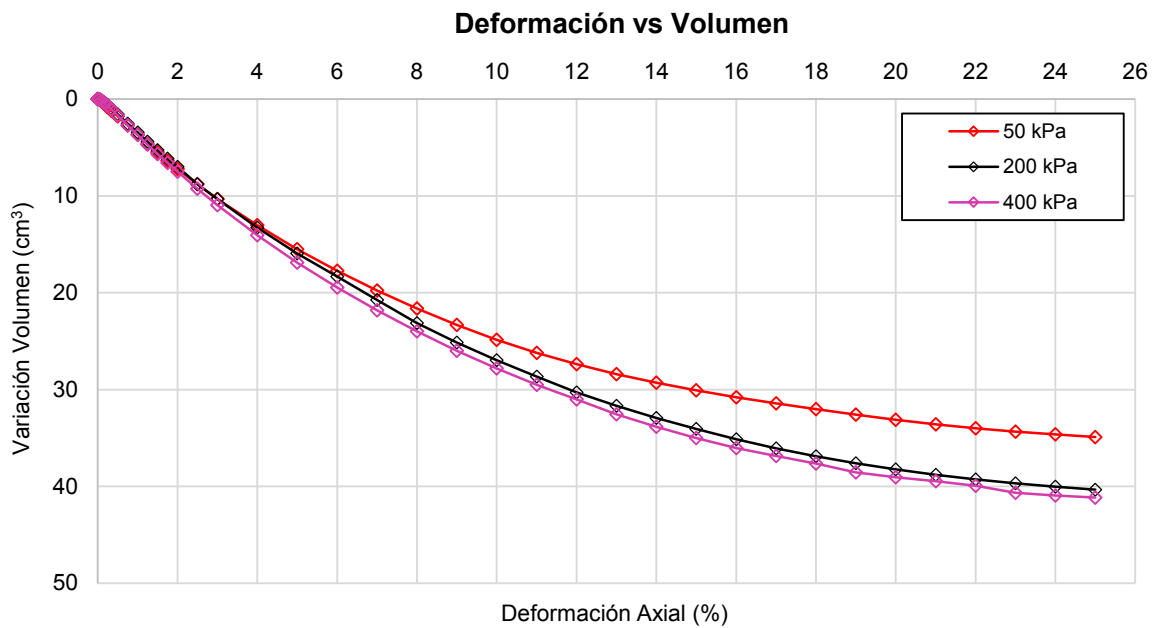
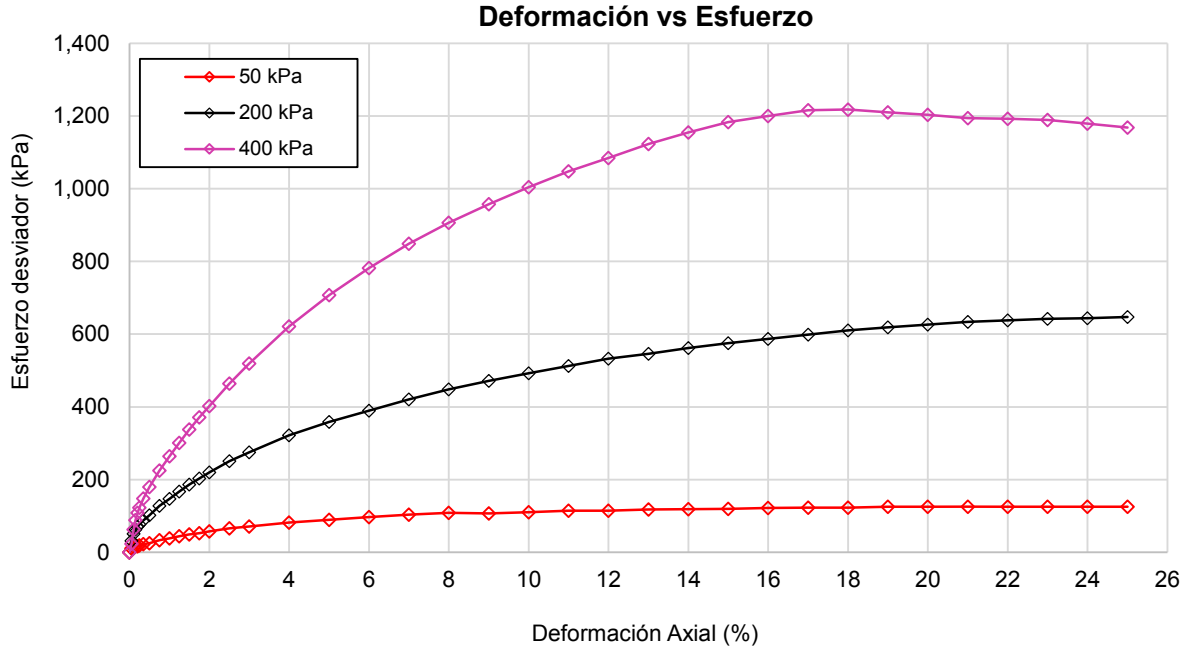
ASTM-D7181

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso
Elaborado por: Diana Damian

Fecha: 18/05/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1,472 g/cm³ y humedad de 8 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)

ASTM-D4767 y ASTM-D7181

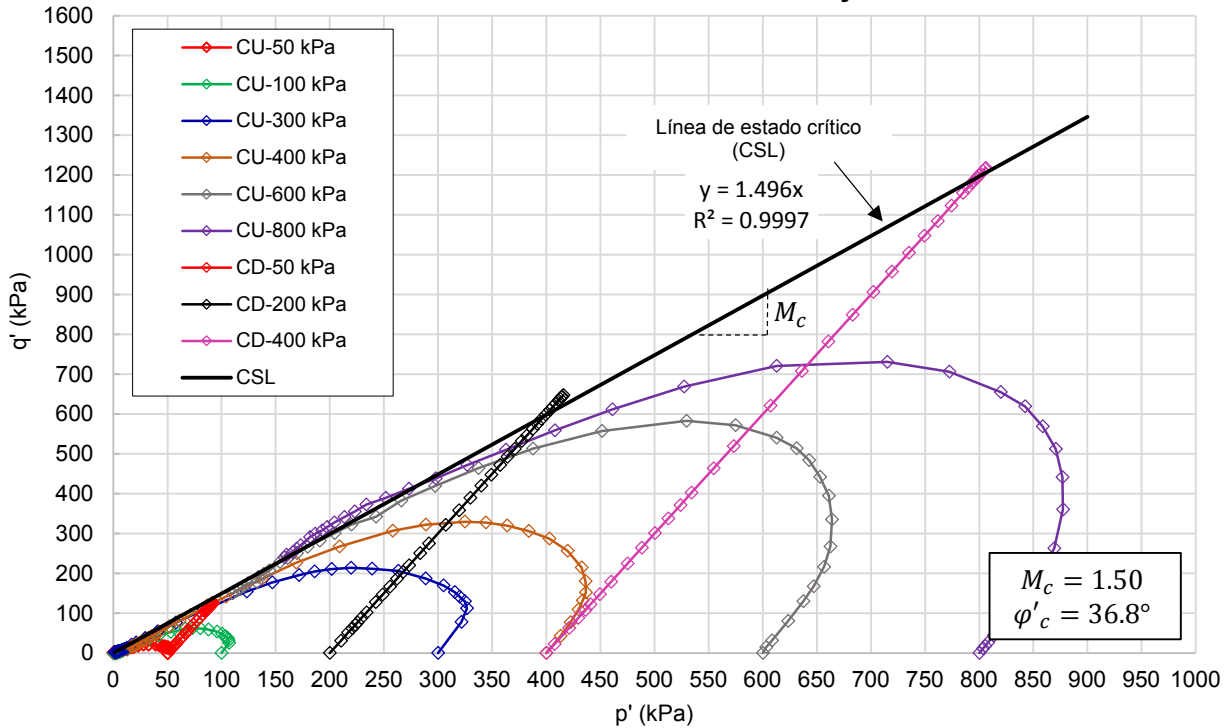
Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 03/05/2021

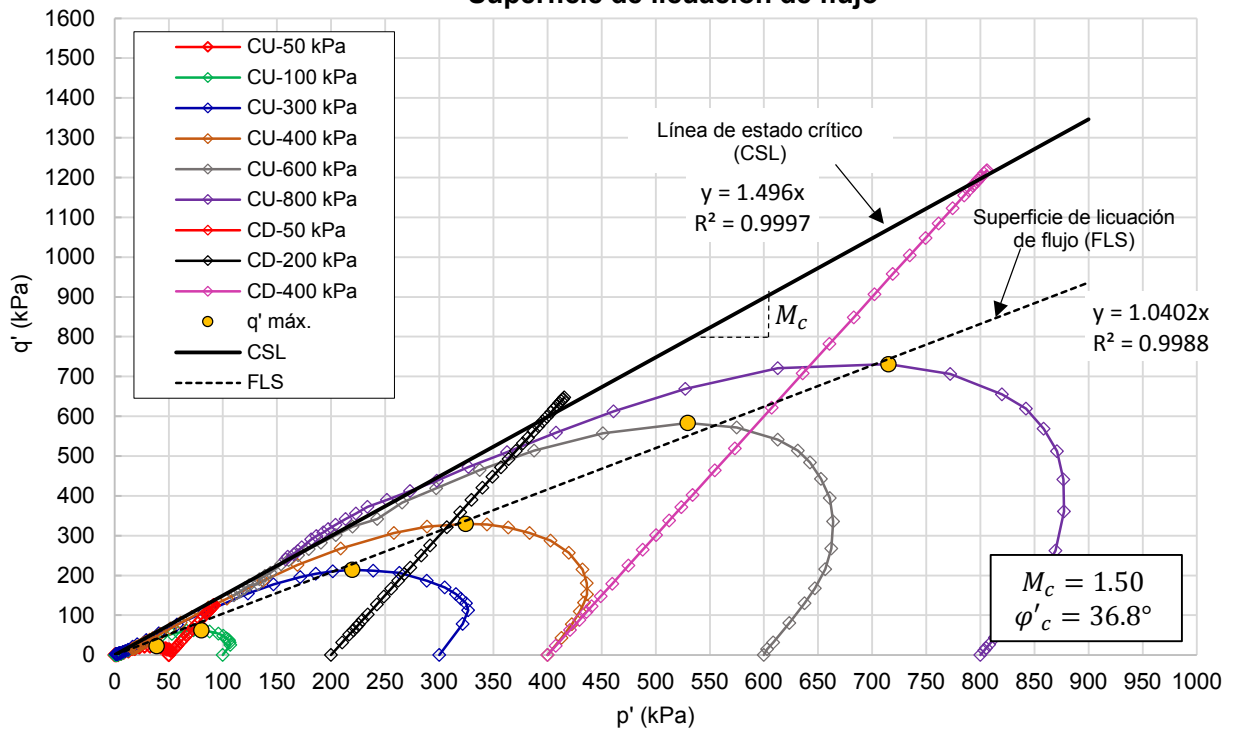
Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 8 %

Esfuerzos efectivos-Triaxiales CU y CD



Superficie de licuación de flujo



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	03/05/2021

Clasificación SUCS:	SP
----------------------------	-----------

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.472 g/cm³ y humedad de 8

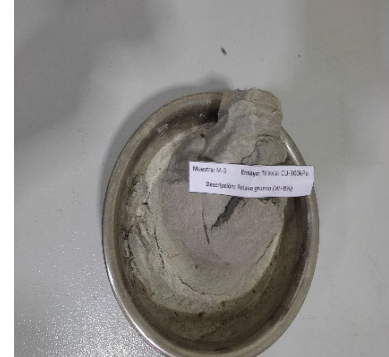
%Fotografía individual de los especímenes triaxiales CU



Ensayo triaxial:CU-50kPa



Ensayo triaxial:CU-100kPa



Ensayo triaxial:CU-300kPa



Ensayo triaxial:CU-400kPa



Ensayo triaxial:CU-600kPa



Ensayo triaxial:CU-800kPa

Fotografía individual de los especímenes triaxiales CD



Ensayo triaxial:CD-50kPa



Ensayo triaxial:CD-200kPa



Ensayo triaxial:CD-400kPa

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU) y Drenado (CD)
ASTM-D4767 y ASTM-D7181

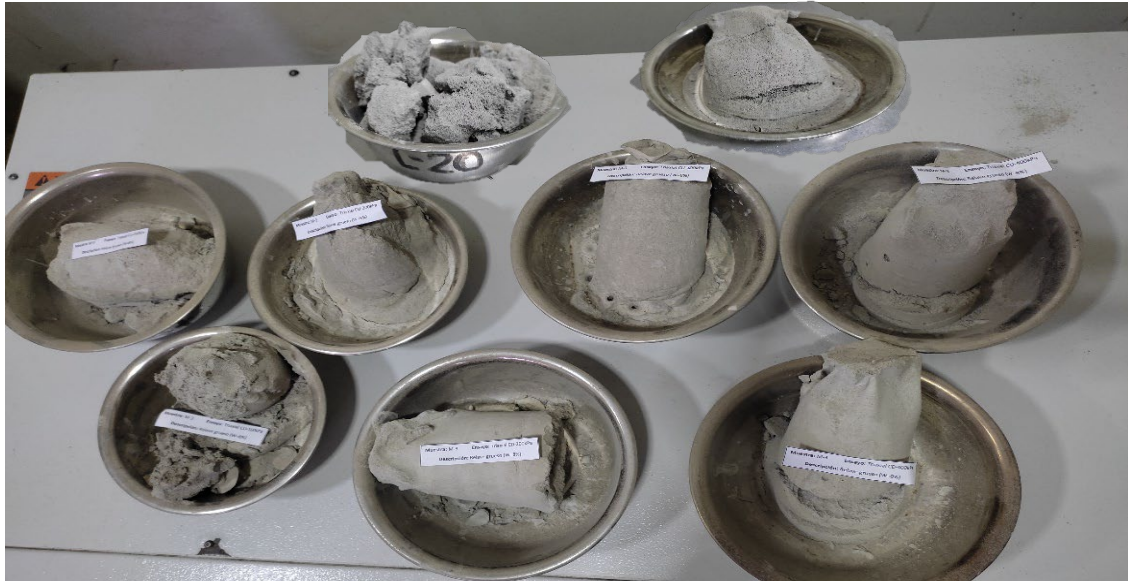
Muestra:	M-3	Elaborado por:	Diana Damian
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	03/05/2021

Clasificación SUCS:

SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.472 g/cm³ y humedad de 8 %

Fotografía grupal de los especímenes triaxiales CU y CD



Especímenes ensayados en condiciones drenados y no drenados de la muestra de relave grueso M-3.

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	50kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	03/05/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)		67.815

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

1. El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.
2. No se aplicó la corrección debido a que el esfuerzo desviador para el confinamiento de 50kPa es muy pequeño a grandes deformaciones llegando a tener valores de cero .

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
02	0.05	11.069	0.033	0.298	11.069
03	0.10	13.829	0.066	0.478	13.829
04	0.15	13.822	0.099	0.717	13.822
05	0.20	16.578	0.132	0.797	16.578
06	0.25	16.570	0.165	0.997	16.570
07	0.35	19.312	0.231	1.197	19.312
08	0.50	22.038	0.330	1.499	22.038
09	0.75	21.982	0.495	2.254	21.982
10	1.00	21.927	0.661	3.013	21.927
11	1.25	19.138	0.826	4.315	19.138
12	1.50	16.362	0.991	6.056	15.371
13	1.75	16.321	1.156	7.084	15.165
14	2.00	10.853	1.321	12.174	9.531
15	2.50	8.098	1.652	20.394	6.446
16	3.00	5.371	1.982	36.899	3.389
17	4.00	2.658	2.642	99.423	0.015
18	5.00	0.000	3.303	-	0.000
19	6.00	0.000	3.964	-	0.000
20	7.00	0.000	4.624	-	0.000
21	8.00	0.000	5.285	-	0.000
22	9.00	0.000	5.946	-	0.000
23	10.00	0.000	6.606	-	0.000
24	11.00	0.000	7.267	-	0.000
25	12.00	0.000	7.927	-	0.000
26	13.00	0.000	8.588	-	0.000
27	14.00	0.000	9.249	-	0.000
28	15.00	0.000	9.909	-	0.000
29	16.00	0.000	10.570	-	0.000
30	17.00	0.000	11.230	-	0.000
31	18.00	0.000	11.891	-	0.000
32	19.00	0.000	12.552	-	0.000
33	20.00	0.000	13.212	-	0.000
34	21.00	0.000	13.873	-	0.000
35	22.00	0.000	14.534	-	0.000
36	23.00	0.000	15.194	-	0.000
37	24.00	0.000	15.855	-	0.000
38	25.00	0.000	16.515	-	0.000

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3		
Descripción:	Relave grueso	Confinamiento:	100kPa
Elaborado por:	Diana Damian	Fecha:	28/04/2021

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young	(kPa)	1400
Espesor de la membrana	(mm)	0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar	(mm)	66.904

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

1. El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.
2. No se aplicó la corrección debido a que el esfuerzo desviador para el confinamiento de 100kPa es muy pequeño a grandes deformaciones llegando a tener valores de cero .

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
02	0.05	25.588	0.033	0.131	25.588
03	0.10	31.258	0.067	0.214	31.258
04	0.15	36.923	0.100	0.272	36.923
05	0.20	39.743	0.134	0.337	39.743
06	0.25	42.561	0.167	0.393	42.561
07	0.35	48.187	0.234	0.486	48.187
08	0.50	53.775	0.335	0.623	53.775
09	0.75	59.286	0.502	0.847	59.286
10	1.00	61.953	0.670	1.081	61.953
11	1.25	61.797	0.837	1.354	61.797
12	1.50	61.640	1.004	1.629	61.640
13	1.75	55.894	1.172	2.097	55.894
14	2.00	52.964	1.339	2.529	52.964
15	2.50	44.374	1.674	3.773	44.374
16	3.00	35.869	2.009	5.601	35.869
17	4.00	19.115	2.678	14.012	19.115
18	5.00	10.809	3.348	30.975	10.809
19	6.00	5.348	4.018	75.130	5.348
20	7.00	2.645	4.687	177.189	2.645
21	8.00	2.617	5.357	204.702	2.617
22	9.00	0.000	6.027	-	0.000
23	10.00	0.000	6.696	-	0.000
24	11.00	0.000	7.366	-	0.000
25	12.00	0.000	8.035	-	0.000
26	13.00	0.000	8.705	-	0.000
27	14.00	0.000	9.375	-	0.000
28	15.00	0.000	10.044	-	0.000
29	16.00	0.000	10.714	-	0.000
30	17.00	0.000	11.383	-	0.000
31	18.00	0.000	12.053	-	0.000
32	19.00	0.000	12.723	-	0.000
33	20.00	0.000	13.392	-	0.000
34	21.00	0.000	14.062	-	0.000
35	22.00	0.000	14.732	-	0.000
36	23.00	0.000	15.401	-	0.000
37	24.00	0.000	16.071	-	0.000
38	25.00	0.000	16.740	-	0.000

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	300kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	30/08/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)		66.591

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

1. El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

2. No se aplicó la corrección debido a que el esfuerzo desviador para el confinamiento de 300kPa es muy pequeño a grandes deformaciones en comparación a la corrección por membrana resultando el esfuerzo corregido negativo.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	51.657	0.034	0.1	51.657
03	0.10	77.447	0.067	0.1	77.447
04	0.15	94.609	0.101	0.1	94.609
05	0.20	111.755	0.135	0.1	111.755
06	0.25	123.156	0.168	0.1	123.156
07	0.35	140.199	0.235	0.2	140.199
08	0.50	159.987	0.336	0.2	159.987
09	0.75	182.382	0.505	0.3	182.382
10	1.00	193.293	0.673	0.3	193.293
11	1.25	195.641	0.841	0.4	195.641
12	1.50	195.145	1.009	0.5	195.145
13	1.75	191.829	1.177	0.6	191.829
14	2.00	185.713	1.346	0.7	185.713
15	2.50	170.768	1.682	1.0	170.768
16	3.00	155.967	2.018	1.3	155.967
17	4.00	124.038	2.691	2.2	124.038
18	5.00	92.742	3.364	3.6	92.742
19	6.00	67.475	4.037	6.0	63.438
20	7.00	45.395	4.709	10.4	40.685
21	8.00	31.699	5.382	17.0	26.317
22	9.00	23.516	6.055	25.7	17.461
23	10.00	18.089	6.728	37.2	11.361
24	11.00	15.333	7.400	48.3	7.932
25	12.00	12.634	8.073	63.9	4.560
26	13.00	9.992	8.746	87.5	1.246
27	14.00	9.877	9.419	95.4	0.458
28	15.00	9.762	10.091	103.4	-0.329
29	16.00	7.236	10.764	148.8	-3.529
30	17.00	7.149	11.437	160.0	-4.288
31	18.00	7.063	12.110	171.4	-5.046
32	19.00	6.977	12.783	183.2	-5.805
33	20.00	6.891	13.455	195.3	-6.564
34	21.00	6.805	14.128	207.6	-7.323
35	22.00	6.719	14.801	220.3	-8.082
36	23.00	6.633	15.474	233.3	-8.841
37	24.00	6.546	16.146	246.6	-9.600
38	25.00	4.307	16.819	390.5	-12.512

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	400kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	10/09/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra despues de consolidar (mm)		66.538

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	43.117	0.034	0.1	43.117
03	0.10	77.571	0.067	0.1	77.571
04	0.15	109.120	0.101	0.1	109.120
05	0.20	132.026	0.135	0.1	132.026
06	0.25	152.041	0.168	0.1	152.041
07	0.35	180.546	0.236	0.1	180.546
08	0.50	214.613	0.337	0.2	214.613
09	0.75	256.888	0.505	0.2	256.888
10	1.00	287.559	0.673	0.2	287.559
11	1.25	306.713	0.842	0.3	306.713
12	1.50	320.100	1.010	0.3	320.100
13	1.75	327.764	1.178	0.4	327.764
14	2.00	329.749	1.347	0.4	329.749
15	2.50	322.458	1.683	0.5	322.458
16	3.00	306.857	2.020	0.7	306.857
17	4.00	267.802	2.693	1.0	267.802
18	5.00	226.763	3.366	1.5	226.763
19	6.00	186.530	4.040	2.2	186.530
20	7.00	141.752	4.713	3.3	141.752
21	8.00	119.061	5.386	4.5	119.061
22	9.00	102.065	6.060	5.9	96.005
23	10.00	88.002	6.733	7.7	81.269
24	11.00	74.226	7.406	10.0	66.820
25	12.00	60.739	8.080	13.3	52.659
26	13.00	55.044	8.753	15.9	46.291
27	14.00	51.938	9.426	18.1	42.512
28	15.00	48.890	10.099	20.7	38.790
29	16.00	43.483	10.773	24.8	32.711
30	17.00	40.579	11.446	28.2	29.133
31	18.00	37.732	12.119	32.1	25.612
32	19.00	34.942	12.793	36.6	22.149
33	20.00	34.511	13.466	39.0	21.045
34	21.00	34.079	14.139	41.5	19.940
35	22.00	33.648	14.813	44.0	18.835
36	23.00	33.216	15.486	46.6	17.731
37	24.00	32.785	16.159	49.3	16.626
38	25.00	32.354	16.832	52.0	15.521

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	600kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	13/09/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young (kPa)		1400
Espesor de la membrana (mm)		0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)		66.373

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	14.444	0.034	0.2	14.444
03	0.10	31.761	0.067	0.2	31.761
04	0.15	80.805	0.101	0.1	80.805
05	0.20	129.800	0.135	0.1	129.800
06	0.25	167.214	0.169	0.1	167.214
07	0.35	216.008	0.236	0.1	216.008
08	0.50	267.446	0.337	0.1	267.446
09	0.75	335.619	0.506	0.2	335.619
10	1.00	394.862	0.675	0.2	394.862
11	1.25	442.384	0.844	0.2	442.384
12	1.50	483.967	1.012	0.2	483.967
13	1.75	513.975	1.181	0.2	513.975
14	2.00	540.991	1.350	0.2	540.991
15	2.50	572.046	1.687	0.3	572.046
16	3.00	583.130	2.025	0.3	583.130
17	4.00	557.696	2.700	0.5	557.696
18	5.00	513.447	3.375	0.7	513.447
19	6.00	464.574	4.050	0.9	464.574
20	7.00	419.313	4.725	1.1	419.313
21	8.00	382.896	5.400	1.4	382.896
22	9.00	341.913	6.075	1.8	341.913
23	10.00	322.548	6.750	2.1	322.548
24	11.00	300.958	7.425	2.5	300.958
25	12.00	282.316	8.100	2.9	282.316
26	13.00	266.536	8.775	3.3	266.536
27	14.00	251.044	9.450	3.8	251.044
28	15.00	238.298	10.125	4.2	238.298
29	16.00	228.212	10.800	4.7	228.212
30	17.00	218.298	11.475	5.3	206.824
31	18.00	210.928	12.150	5.8	198.779
32	19.00	203.674	12.824	6.3	190.849
33	20.00	191.910	13.499	7.0	178.411
34	21.00	189.512	14.174	7.5	175.337
35	22.00	182.604	14.849	8.1	167.755
36	23.00	175.812	15.524	8.8	160.288
37	24.00	171.332	16.199	9.5	155.133
38	25.00	166.910	16.874	10.1	150.036

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra:	M-3	Confinamiento:	800kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	23/10/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)	65.889

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	11.725	0.034	0.3	11.725
03	0.10	17.579	0.068	0.4	17.579
04	0.15	26.356	0.102	0.4	26.356
05	0.20	43.904	0.136	0.3	43.904
06	0.25	84.839	0.170	0.2	84.839
07	0.35	175.352	0.238	0.1	175.352
08	0.50	262.632	0.340	0.1	262.632
09	0.75	360.940	0.510	0.1	360.940
10	1.00	441.328	0.680	0.2	441.328
11	1.25	512.617	0.850	0.2	512.617
12	1.50	569.095	1.020	0.2	569.095
13	1.75	619.517	1.190	0.2	619.517
14	2.00	655.305	1.360	0.2	655.305
15	2.50	706.291	1.700	0.2	706.291
16	3.00	731.117	2.040	0.3	731.117
17	4.00	720.765	2.720	0.4	720.765
18	5.00	668.678	3.400	0.5	668.678
19	6.00	612.016	4.080	0.7	612.016
20	7.00	559.138	4.760	0.9	559.138
21	8.00	509.955	5.439	1.1	509.955
22	9.00	472.386	6.119	1.3	472.386
23	10.00	438.160	6.799	1.6	438.160
24	11.00	412.410	7.479	1.8	412.410
25	12.00	389.710	8.159	2.1	389.710
26	13.00	372.524	8.839	2.4	372.524
27	14.00	355.631	9.519	2.7	355.631
28	15.00	341.524	10.199	3.0	341.524
29	16.00	327.652	10.879	3.3	327.652
30	17.00	316.449	11.559	3.7	316.449
31	18.00	307.827	12.239	4.0	307.827
32	19.00	299.321	12.919	4.3	299.321
33	20.00	290.934	13.599	4.7	290.934
34	21.00	284.980	14.279	5.0	270.701
35	22.00	276.798	14.958	5.4	261.839
36	23.00	268.732	15.638	5.8	253.094
37	24.00	263.013	16.318	6.2	246.695
38	25.00	257.353	16.998	6.6	240.355

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-3	Confinamiento:	50kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	30/10/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)	67.922

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.0	0.000
02	0.05	11.036	0.033	0.3	11.036
03	0.10	13.792	0.066	0.5	13.792
04	0.15	16.547	0.099	0.6	16.547
05	0.20	16.545	0.132	0.8	16.545
06	0.25	19.300	0.165	0.9	19.300
07	0.35	22.051	0.231	1.0	22.051
08	0.50	24.794	0.330	1.3	24.794
09	0.75	33.034	0.495	1.5	33.034
10	1.00	38.509	0.660	1.7	38.509
11	1.25	43.976	0.824	1.9	43.976
12	1.50	49.426	0.989	2.0	49.426
13	1.75	52.122	1.154	2.2	52.122
14	2.00	57.552	1.319	2.3	57.552
15	2.50	65.626	1.649	2.5	65.626
16	3.00	70.934	1.979	2.8	70.934
17	4.00	81.410	2.638	3.2	81.410
18	5.00	89.030	3.298	3.7	89.030
19	6.00	96.503	3.957	4.1	96.503
20	7.00	103.829	4.617	4.4	103.829
21	8.00	108.358	5.277	4.9	108.358
22	9.00	112.770	5.936	5.3	106.834
23	10.00	117.056	6.596	5.6	110.461
24	11.00	121.212	7.255	6.0	113.957
25	12.00	122.675	7.915	6.5	114.760
26	13.00	126.581	8.575	6.8	118.006
27	14.00	127.844	9.234	7.2	118.610
28	15.00	129.032	9.894	7.7	119.138
29	16.00	132.598	10.553	8.0	122.045
30	17.00	133.610	11.213	8.4	122.397
31	18.00	134.555	11.872	8.8	122.682
32	19.00	137.812	12.532	9.1	125.280
33	20.00	138.600	13.192	9.5	125.408
34	21.00	139.315	13.851	9.9	125.464
35	22.00	139.954	14.511	10.4	125.444
36	23.00	140.514	15.170	10.8	125.344
37	24.00	141.009	15.830	11.2	125.179
38	25.00	141.435	16.490	11.7	124.945

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-3	Confinamiento:	200kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	18/05/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana	
Módulo de Young (kPa)	1400
Espesor de la membrana (mm)	0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar (mm)	66.966

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
02	0.05	31.219	0.033	0.107	31.219
03	0.10	51.070	0.067	0.131	51.070
04	0.15	62.405	0.100	0.161	62.405
05	0.20	70.902	0.134	0.189	70.902
06	0.25	76.559	0.167	0.218	76.559
07	0.35	87.874	0.234	0.266	87.874
08	0.50	102.001	0.334	0.328	102.001
09	0.75	127.412	0.502	0.394	127.412
10	1.00	147.119	0.669	0.455	147.119
11	1.25	166.790	0.836	0.501	166.790
12	1.50	186.424	1.003	0.538	186.424
13	1.75	203.186	1.171	0.576	203.186
14	2.00	219.915	1.338	0.608	219.915
15	2.50	250.496	1.672	0.668	250.496
16	3.00	275.230	2.007	0.729	275.230
17	4.00	321.441	2.676	0.832	321.441
18	5.00	358.653	3.345	0.933	358.653
19	6.00	389.703	4.014	1.030	389.703
20	7.00	420.327	4.683	1.114	420.327
21	8.00	447.802	5.352	1.195	447.802
22	9.00	471.787	6.021	1.276	471.787
23	10.00	492.503	6.690	1.358	492.503
24	11.00	512.703	7.359	1.435	512.703
25	12.00	532.417	8.028	1.508	532.417
26	13.00	546.204	8.697	1.592	546.204
27	14.00	562.096	9.366	1.666	562.096
28	15.00	574.867	10.035	1.746	574.867
29	16.00	587.163	10.704	1.823	587.163
30	17.00	598.957	11.373	1.899	598.957
31	18.00	610.246	12.042	1.973	610.246
32	19.00	618.500	12.711	2.055	618.500
33	20.00	626.327	13.380	2.136	626.327
34	21.00	633.722	14.049	2.217	633.722
35	22.00	638.253	14.718	2.306	638.253
36	23.00	642.391	15.387	2.395	642.391
37	24.00	643.819	16.056	2.494	643.819
38	25.00	647.264	16.725	2.584	647.264

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-Drenado (CD)
ASTM-D7181

Muestra:	M-3	Confinamiento:	400kPa
Descripción:	Relave grueso	Fecha:	14/08/2021
Elaborado por:	Diana Damian		

Corrección del esfuerzo desviador por efecto de la membrana

Corrección por membrana		
Módulo de Young	(kPa)	1400
Espesor de la membrana	(mm)	0.8
Diámetro de la muestra después de consolidar	(mm)	66.839

Abreviaturas:

Def. : Deformación
 Correcc. : Corrección
 Desv. : Desviador

Nota:

El esfuerzo desviador se corrige por efectos de membrana si el error supera el 5%.

N°	Def. (%)	σ_{desv} (kPa)	Correcc. membrana	% de Correcc. membrana	σ_{desv} Corregido (kPa)
01	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
02	0.05	22.790	0.034	0.147	22.790
03	0.10	62.658	0.067	0.107	62.658
04	0.15	88.273	0.101	0.114	88.273
05	0.20	108.188	0.134	0.124	108.188
06	0.25	122.404	0.168	0.137	122.404
07	0.35	147.984	0.235	0.159	147.984
08	0.50	179.223	0.335	0.187	179.223
09	0.75	224.614	0.503	0.224	224.614
10	1.00	264.262	0.670	0.254	264.262
11	1.25	301.008	0.838	0.278	301.008
12	1.50	337.694	1.005	0.298	337.694
13	1.75	371.459	1.173	0.316	371.459
14	2.00	402.322	1.341	0.333	402.322
15	2.50	463.859	1.676	0.361	463.859
16	3.00	519.457	2.011	0.387	519.457
17	4.00	621.222	2.681	0.432	621.222
18	5.00	707.640	3.351	0.474	707.640
19	6.00	781.646	4.022	0.515	781.646
20	7.00	848.840	4.692	0.553	848.840
21	8.00	906.465	5.362	0.592	906.465
22	9.00	957.491	6.032	0.630	957.491
23	10.00	1004.625	6.703	0.667	1004.625
24	11.00	1047.844	7.373	0.704	1047.844
25	12.00	1084.567	8.043	0.742	1084.567
26	13.00	1123.089	8.713	0.776	1123.089
27	14.00	1154.993	9.384	0.812	1154.993
28	15.00	1183.191	10.054	0.850	1183.191
29	16.00	1199.772	10.724	0.894	1199.772
30	17.00	1215.652	11.395	0.937	1215.652
31	18.00	1218.068	12.065	0.990	1218.068
32	19.00	1210.409	12.735	1.052	1210.409
33	20.00	1203.092	13.405	1.114	1203.092
34	21.00	1194.381	14.076	1.178	1194.381
35	22.00	1192.979	14.746	1.236	1192.979
36	23.00	1189.413	15.416	1.296	1189.413
37	24.00	1179.574	16.086	1.364	1179.574
38	25.00	1168.009	16.757	1.435	1168.009

Anexo C - Reporte de la estimación de la curva de estado crítico

Anexo C.1 – Reporte de la estimación de la curva de estado crítico de la muestra de relave M-1

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-1

Clasificación SUCS: SP-SC (Arena pobremente gradada con arcilla)

Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian

1. Datos iniciales de la muestra M-1 (antes de reconstituir)

Datos Iniciales	
Gravedad específica de sólidos (G_s)	3.36
Peso específico seco (γ_d) g/cm^3	1.138
Masa seca (m_s) g	700
Grado de saturación %	100
Contenido de humedad %	5

2. Datos geométricos del espécimen en el proceso de reconstitución

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Inicial		Reconstitución		Variación		% Variación	
			Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro	Altura
1	CU	50	7.120	15.450	7.190	15.446	0.070	0.004	0.98	0.03
2	CU	100	7.120	15.450	7.150	15.444	0.030	0.006	0.42	0.04
3	CU	200	7.120	15.450	7.150	15.450	0.030	0.000	0.42	0.00
4	CD	200	7.120	15.450	7.090	15.450	0.030	0.000	0.42	0.00
5	CD	400	7.120	15.450	7.067	15.453	0.053	0.003	0.74	0.02

3. Cálculo de la relación de vacío crítico (e_c)

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Contenido humedad final %	Inicial			Reconstitución			Final de corte			Variación de volumen (cm^3)		
				V_o (cm^3)	γ_d (g/cm^3)	e_o	V'_o (cm^3)	γ'_d (g/cm^3)	e'_o	$\gamma_{dfcorte}$ (g/cm^3)	V_{fcorte} (cm^3)	e_c	Saturación	Consolidación	Corte
1	CU	50	31.300	615.150	1.138	1.953	627.139	1.116	2.010	1.638	427.458	1.052	149.661	50.020	0.000
2	CU	100	28.270	615.150	1.138	1.953	620.100	1.129	1.976	1.723	406.247	0.950	145.753	68.100	0.000
3	CU	200	26.500	615.150	1.138	1.953	620.341	1.128	1.977	1.777	393.856	0.890	154.885	71.600	0.000
4	CD	200	21.890	615.150	1.138	1.953	609.973	1.148	1.928	1.936	361.584	0.736	159.759	69.740	18.890
5	CD	400	18.830	615.150	1.138	1.953	606.120	1.155	1.909	2.058	340.163	0.633	135.088	109.900	20.970

4. Variación de volumen del espécimen en cada etapa del ensayo triaxial

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Variación de volumen (%)			
			Saturación	Consolidación	Corte	Total
1	CU	50	23.9	8.0	0.0	31.8
2	CU	100	23.5	11.0	0.0	34.5
3	CU	200	25.0	11.5	0.0	36.5
4	CD	200	26.2	11.4	3.1	40.7
5	CD	400	22.3	18.1	3.5	43.9

Fórmulas:

$$e_o = \frac{G_s * \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e}$$

$$G_s * \omega\% = S * e_c$$

Abreviaturas:

V_o : Volumen inicial (volumen del molde)

V'_o : Volumen reconstituido

V_{fcorte} : Volumen al final del corte

e_o : Relación de vacío inicial

e'_o : Relación de vacío después de reconstituir la muestra de relave

e_c : Relación de vacío crítico

ω : Contenido de humedad

S : Grado de saturación

γ_w : Peso específico del agua

$\gamma_{dfcorte}$: Peso específico seco al final del corte

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-1

Clasificación SUCS: SP-SC (Arena pobremente gradada con arcilla)

Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian

5. Cálculo de los diámetros y alturas del espécimen en la etapa final de saturación y consolidación

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Final de saturación						Final de consolidación					
			V_{fsat} (cm ³)	$\gamma_{d fsat}$ (g/cm ³)	e_{fsat}	ΔH_{fsat} (cm)	H_{fsat} (cm)	D_{fsat} (cm)	$V_{fcons.}$ (cm ³)	$\gamma_{d fcons.}$ (g/cm ³)	$e_{fcons.}$	$\Delta H_{fcons.}$ (cm)	$H_{fcons.}$ (cm)	$D_{fcons.}$ (cm)
1	CU	50	477.478	1.466	1.292	1.050	14.396	6.498	427.458	1.638	1.052	0.539	13.857	6.267
2	CU	100	474.347	1.476	1.277	1.050	14.394	6.478	406.247	1.723	0.950	0.929	13.465	6.198
3	CU	200	465.456	1.504	1.234	0.650	14.800	6.328	393.856	1.777	0.890	1.002	13.798	6.029
4	CD	200	450.214	1.555	1.161	0.750	14.700	6.245	380.474	1.840	0.826	1.128	13.572	5.974
5	CD	400	471.033	1.486	1.261	1.020	14.433	6.446	361.133	1.938	0.733	1.248	13.185	5.906

6. Datos de entrada para la estimación de la CSL

N°	Tipo ensayo	Etapa de consolidación		Estado Crítico	
		Presión de confinamiento kPa	$e_{fcons.}$	Presión efectivo promedio kPa	e_c
1	CU	50	1.052	29.062	1.052
2	CU	100	0.950	64.624	0.950
3	CU	200	0.890	168.617	0.890
4	CD	200	0.826	380.840	0.736
5	CD	400	0.733	776.047	0.633

Abreviaturas:

V_{fsat} Volumen final - etapa de saturación

$V_{fcons.}$ Volumen final - etapa consolidación

$\gamma_{d fsat}$ Peso específico seco final - etapa saturación

$\gamma_{d fcons.}$ Peso específico seco final - etapa consolidación

e_{fsat} Relación de vacío final - etapa saturación

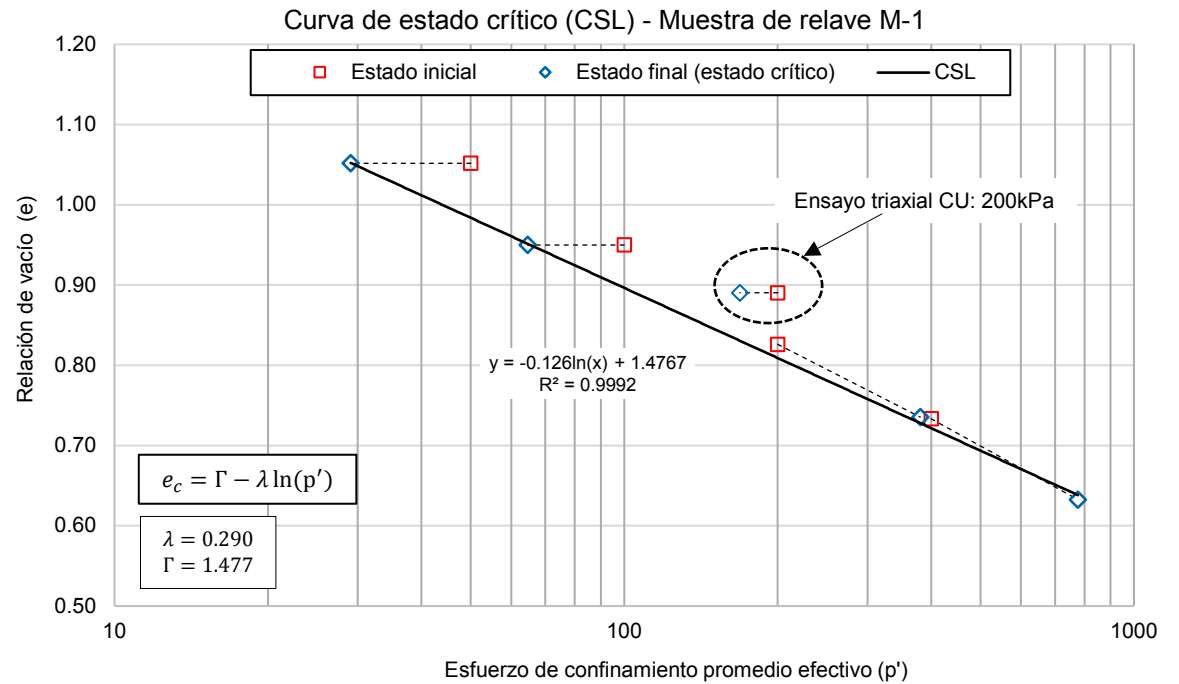
$e_{fcons.}$ Relación de vacío final - etapa consolidación

H_{fsat} Altura final del espécimen- etapa saturación

$H_{fcons.}$ Altura final del espécimen- etapa consolidación

D_{fsat} Diámetro final del espécimen - etapa saturación

$D_{fcons.}$ Diámetro final del espécimen - etapa consolidación



Nota:

1. El ensayo triaxial CU de 200kPa no alcanza el estado crítico, por ende no se consideró para el ajuste de la CSL.

**Anexo C.2 - Reporte de la estimación de la
curva de estado crítico de la muestra de
relave M-2**

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-2

Clasificación SUCS: SP (Arena pobremente gradada)

Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian

1. Datos iniciales de la muestra M-2 (antes de reconstituir)

Datos Iniciales	
Gravedad específica de sólidos (G_s)	2.96
Peso específico seco (γ_d) g/cm^3	1.34
Masa seca (m_s) g	824.3
Grado de saturación %	100
Contenido de humedad %	5

2. Datos geométricos del espécimen en el proceso de reconstitución

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Inicial		Reconstitución		Variación		% Variación	
			Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro	Altura
1	CU	50	7.120	15.450	7.120	15.450	0.000	0.000	0.00	0.00
2	CU	100	7.120	15.450	7.123	15.450	0.003	0.000	0.04	0.00
3	CU	200	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
4	CU	300	7.120	15.450	7.127	15.453	0.007	0.003	0.10	0.02
5	CU	400	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
6	CD	200	7.120	15.450	7.120	15.450	0.000	0.000	0.00	0.00
7	CD	400	7.120	15.450	7.120	15.450	0.000	0.000	0.00	0.00

3. Cálculo de la relación de vacío crítico (e_c)

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Contenido humedad final %	Inicial			Reconstitución			Final de corte			Variación de volumen (cm^3)		
				V_o (cm^3)	γ_d (g/cm^3)	e_o	V'_o (cm^3)	γ'_d (g/cm^3)	e'_o	$\gamma_{dfcorte}$ (g/cm^3)	V_{fcorte} (cm^3)	e_c	Saturación	Consolidación	Corte
1	CU	50	31.860	615.146	1.340	1.209	615.146	1.340	1.209	1.523	541.102	0.943	60.344	13.700	0.000
2	CU	100	28.740	615.146	1.340	1.209	615.665	1.339	1.211	1.599	515.384	0.851	79.581	20.700	0.000
3	CU	200	28.470	615.146	1.340	1.209	615.784	1.339	1.211	1.606	513.158	0.843	71.346	31.280	0.000
4	CU	300	26.830	615.146	1.340	1.209	616.476	1.337	1.214	1.650	499.639	0.794	75.277	41.560	0.000
5	CU	400	25.730	615.146	1.340	1.209	615.784	1.339	1.211	1.680	490.572	0.762	78.572	46.640	0.000
6	CD	200	25.950	615.146	1.340	1.209	615.146	1.340	1.209	1.674	492.386	0.768	59.441	28.500	34.820
7	CD	400	22.750	615.146	1.340	1.209	615.146	1.340	1.209	1.769	466.008	0.673	52.298	56.240	40.600

4. Variación de volumen del espécimen en cada etapa del ensayo triaxial

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Variación de volumen (%)			
			Saturación	Consolidación	Corte	Total
1	CU	50	9.8	2.2	0.0	12.0
2	CU	100	12.9	3.4	0.0	16.3
3	CU	200	11.6	5.1	0.0	16.7
4	CU	300	12.2	6.7	0.0	19.0
5	CU	400	12.8	7.6	0.0	20.3
6	CD	200	9.7	4.6	5.7	20.0
7	CD	400	8.5	9.1	6.6	24.2

Fórmulas

$$e_o = \frac{G_s * \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e}$$

$$G_s * \omega\% = S * e_c$$

Abreviaturas:

V_o : Volumen inicial (volumen del molde)

V'_o : Volumen reconstituido

V_{fcorte} : Volumen al final del corte

e_o : Relación de vacío inicial

e'_o : Relación de vacío después de reconstituir la muestra de relave

e_c : Relación de vacío crítico

ω : Contenido de humedad

S : Grado de saturación

γ_w : Peso específico del agua

$\gamma_{dfcorte}$: Peso específico seco al final del corte

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-2

Clasificación SUCS: SP (Arena pobremente gradada)

Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian

5. Cálculo de los diámetros y alturas del espécimen en la etapa final de saturación y consolidación

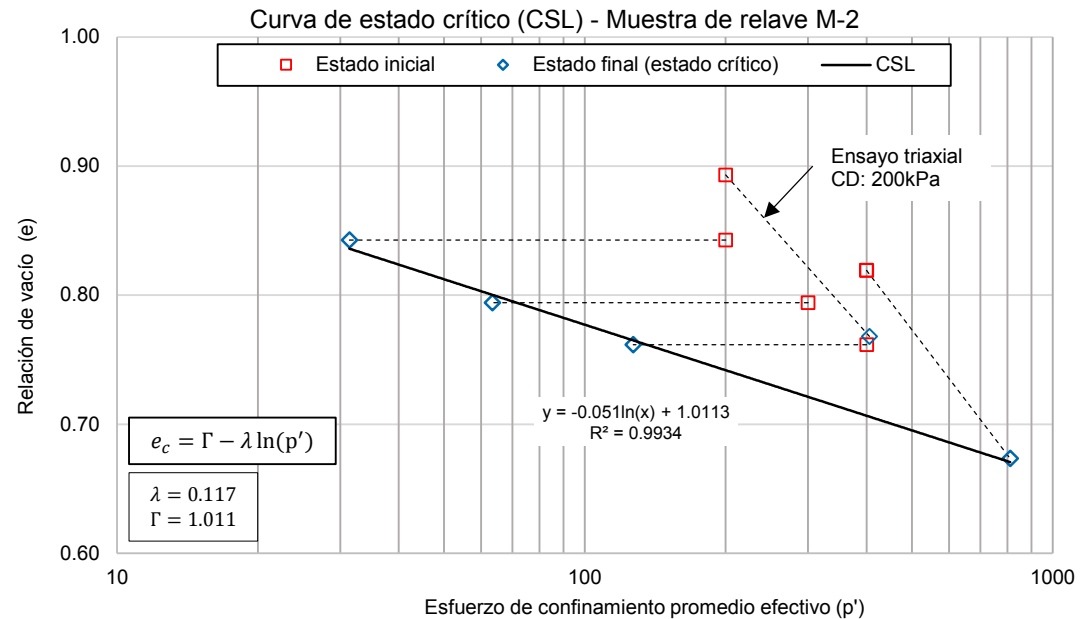
N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Final de saturación						Final de consolidación					
			V_{fsat} (cm ³)	$\gamma_{d fsat}$ (g/cm ³)	e_{fsat}	ΔH_{fsat} (cm)	H_{fsat} (cm)	D_{fsat} (cm)	$V_{fcons.}$ (cm ³)	$\gamma_{d fcons.}$ (g/cm ³)	$e_{fcons.}$	$\Delta H_{fcons.}$ (cm)	$H_{fcons.}$ (cm)	$D_{fcons.}$ (cm)
1	CU	50	554.802	1.486	0.992	0.000	15.450	6.762	541.102	1.523	0.943	0.238	15.212	6.730
2	CU	100	536.084	1.538	0.925	0.000	15.450	6.647	515.384	1.599	0.851	0.332	15.118	6.588
3	CU	200	544.438	1.514	0.955	0.000	15.453	6.698	513.158	1.606	0.843	0.475	14.978	6.605
4	CU	300	541.199	1.523	0.943	0.000	15.453	6.678	499.639	1.650	0.794	0.517	14.936	6.526
5	CU	400	537.212	1.534	0.929	0.000	15.453	6.653	490.572	1.680	0.762	0.522	14.931	6.468
6	CD	200	555.706	1.483	0.995	0.070	15.380	6.783	527.206	1.564	0.893	0.305	15.075	6.673
7	CD	400	562.848	1.465	1.021	0.120	15.330	6.837	506.608	1.627	0.819	0.410	14.920	6.575

6. Datos de entrada para la estimación de la CSL

N°	Tipo ensayo	Etapa de consolidación		Estado Crítico	
		Presión de confinamiento kPa	$e_{fcons.}$	Presión efectiva promedio kPa	e_c
1	CU	50	0.943	0.000	0.943
2	CU	100	0.851	0.000	0.851
3	CU	200	0.843	31.376	0.843
4	CU	300	0.794	63.446	0.794
5	CU	400	0.762	126.885	0.762
6	CD	200	0.893	405.610	0.768
7	CD	400	0.819	810.962	0.673

Abreviaturas:

- V_{fsat} Volumen final - etapa de saturación
- $V_{fcons.}$ Volumen final - etapa consolidación
- $\gamma_{d fsat}$ Peso específico seco final - etapa saturación
- $\gamma_{d fcons.}$ Peso específico seco final - etapa consolidación
- e_{fsat} Relación de vacío final - etapa saturación
- $e_{fcons.}$ Relación de vacío final - etapa consolidación
- H_{fsat} Altura final del espécimen- etapa saturación
- $H_{fcons.}$ Altura final del espécimen- etapa consolidación
- D_{fsat} Diámetro final del espécimen - etapa saturación
- $D_{fcons.}$ Diámetro final del espécimen - etapa consolidación



Nota:

1. Los ensayos triaxiales CU de 50kPa y 100kPa no se consideró en la estimación de la CSL por presentar el esfuerzo de confinamiento promedio efectivo p' prácticamente nulo (licuación estática).
2. Para un mejor ajuste de la CSL no se consideró el triaxial CD de 200kPa.
3. El parámetro λ se expresa en base 10 ($\lambda_{10} = 2.303 \lambda$) por tratarse de un tema experimental.

**Anexo C.3 - Reporte de la estimación de la
curva de estado crítico de la muestra de
relave M-3**

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-3

Clasificación SUCS: SP (Arena pobremente gradada)

Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian

1. Datos iniciales de la muestra M-3 (antes de reconstituir)

Datos Iniciales	
Gravedad específica de sólidos (G_s)	2.92
Peso específico seco (γ_d)	g/cm ³ 1.472
Masa seca (m_s)	g 905.5
Grado de saturación	% 100
Contenido de humedad	% 8

2. Datos geométricos del espécimen en el proceso de reconstitución

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Inicial		Reconstitución		Variación		% Variación	
			Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Diámetro	Altura
1	CU	50	7.120	15.450	7.127	15.450	0.007	0.000	0.10	0.00
2	CU	100	7.120	15.450	7.113	15.450	0.007	0.000	0.10	0.00
3	CU	300	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
4	CU	400	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
5	CU	600	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
6	CU	800	7.120	15.450	7.123	15.455	0.003	0.005	0.04	0.03
7	CD	50	7.120	15.450	7.120	15.458	0.000	0.008	0.00	0.05
8	CD	200	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02
9	CD	400	7.120	15.450	7.123	15.453	0.003	0.003	0.04	0.02

3. Cálculo de la relación de vacío crítico (e_c)

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Contenido humedad final %	Inicial			Reconstitución			Final de corte			Variación de volumen (cm ³)		
				V_o (cm ³)	γ_d (g/cm ³)	e_o	V'_o (cm ³)	γ'_d (g/cm ³)	e'_o	$\gamma_{dfcorte}$ (g/cm ³)	V_{fcorte} (cm ³)	e_c	Saturación	Consolidación	Corte
1	CU	50	26.320	615.146	1.472	0.984	616.356	1.469	0.988	1.651	548.427	0.769	50.949	16.980	0.000
2	CU	100	25.170	615.146	1.472	0.984	613.937	1.475	0.980	1.683	538.014	0.735	53.023	22.900	0.000
3	CU	300	23.470	615.146	1.472	0.984	615.784	1.470	0.986	1.733	522.621	0.685	51.263	41.900	0.000
4	CU	400	23.390	615.146	1.472	0.984	615.784	1.470	0.986	1.735	521.896	0.683	50.208	43.680	0.000
5	CU	600	22.780	615.146	1.472	0.984	615.784	1.470	0.986	1.754	516.373	0.665	45.571	53.840	0.000
6	CU	800	21.940	615.146	1.472	0.984	615.864	1.470	0.986	1.780	508.767	0.641	52.877	54.220	0.000
7	CD	50	22.740	615.146	1.472	0.984	615.445	1.471	0.985	1.755	516.011	0.664	50.414	14.120	34.900
8	CD	200	20.270	615.146	1.472	0.984	615.784	1.470	0.986	1.834	493.645	0.592	47.505	34.300	40.334
9	CD	400	19.450	615.146	1.472	0.984	615.784	1.470	0.986	1.862	486.220	0.568	40.035	48.380	41.149

Fórmulas:

$$e_o = \frac{G_s * \gamma_w - \gamma_d}{\gamma_d}$$

$$G_s * \omega \% = S * e_c$$

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + e}$$

Abreviaturas:

V_o : Volumen inicial (volumen del molde)

V'_o : Volumen reconstituido

V_{fcorte} : Volumen al final del corte

e_o : Relación de vacío inicial

e_c : Relación de vacío después de reconstituir la muestra de relave

e_c : Relación de vacío crítico

ω : Contenido de humedad

S : Grado de saturación

γ_w : Peso específico del agua

$\gamma_{dfcorte}$: Peso específico seco al final del corte

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-3

Clasificación SUCS: SP (Arena pobremente gradada)

Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian

4. Variación de volumen del espécimen en cada etapa del ensayo triaxial

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Variación de volumen (%)			
			Saturación	Consolidación	Corte	Total
1	CU	50	8.3	2.8	0.0	11.0
2	CU	100	8.6	3.7	0.0	12.4
3	CU	300	8.3	6.8	0.0	15.1
4	CU	400	8.2	7.1	0.0	15.2
5	CU	600	7.4	8.7	0.0	16.1
6	CU	800	8.6	8.8	0.0	17.4
7	CD	50	8.2	2.3	5.7	16.2
8	CD	200	7.7	5.6	6.6	19.8
9	CD	400	6.5	7.9	6.7	21.0

5. Cálculo de los diámetros y alturas del espécimen en la etapa final de saturación y consolidación

N°	Tipo ensayo	Presión de confinamiento kPa	Final de saturación						Final de consolidación					
			V_{fsat} (cm ³)	$\gamma_{d fsat}$ (g/cm ³)	e_{fsat}	ΔH_{fsat} (cm)	H_{fsat} (cm)	D_{fsat} (cm)	$V_{fcons.}$ (cm ³)	$\gamma_{d fcons.}$ (g/cm ³)	$e_{fcons.}$	$\Delta H_{fcons.}$ (cm)	$H_{fcons.}$ (cm)	$D_{fcons.}$ (cm)
1	CU	50	565.407	1.601	0.823	0.000	15.450	6.826	548.427	1.651	0.769	0.268	15.182	6.782
2	CU	100	560.914	1.614	0.809	0.000	15.450	6.799	538.014	1.683	0.735	0.145	15.306	6.690
3	CU	300	564.521	1.604	0.820	0.000	15.453	6.820	522.621	1.733	0.685	0.440	15.013	6.658
4	CU	400	565.576	1.601	0.824	0.000	15.453	6.826	521.896	1.735	0.683	0.442	15.011	6.653
5	CU	600	570.213	1.588	0.839	0.000	15.453	6.854	516.373	1.754	0.665	0.527	14.926	6.637
6	CU	800	562.987	1.608	0.815	0.000	15.455	6.810	508.767	1.780	0.641	0.532	14.923	6.589
7	CD	50	565.031	1.603	0.822	0.000	15.458	6.822	550.911	1.644	0.777	0.253	15.205	6.792
8	CD	200	568.279	1.593	0.833	0.000	15.453	6.843	533.979	1.696	0.722	0.290	15.163	6.696
9	CD	400	575.749	1.573	0.857	0.000	15.453	6.888	527.369	1.717	0.701	0.421	15.032	6.683

Estimación de la curva de estado crítico (CSL)

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso

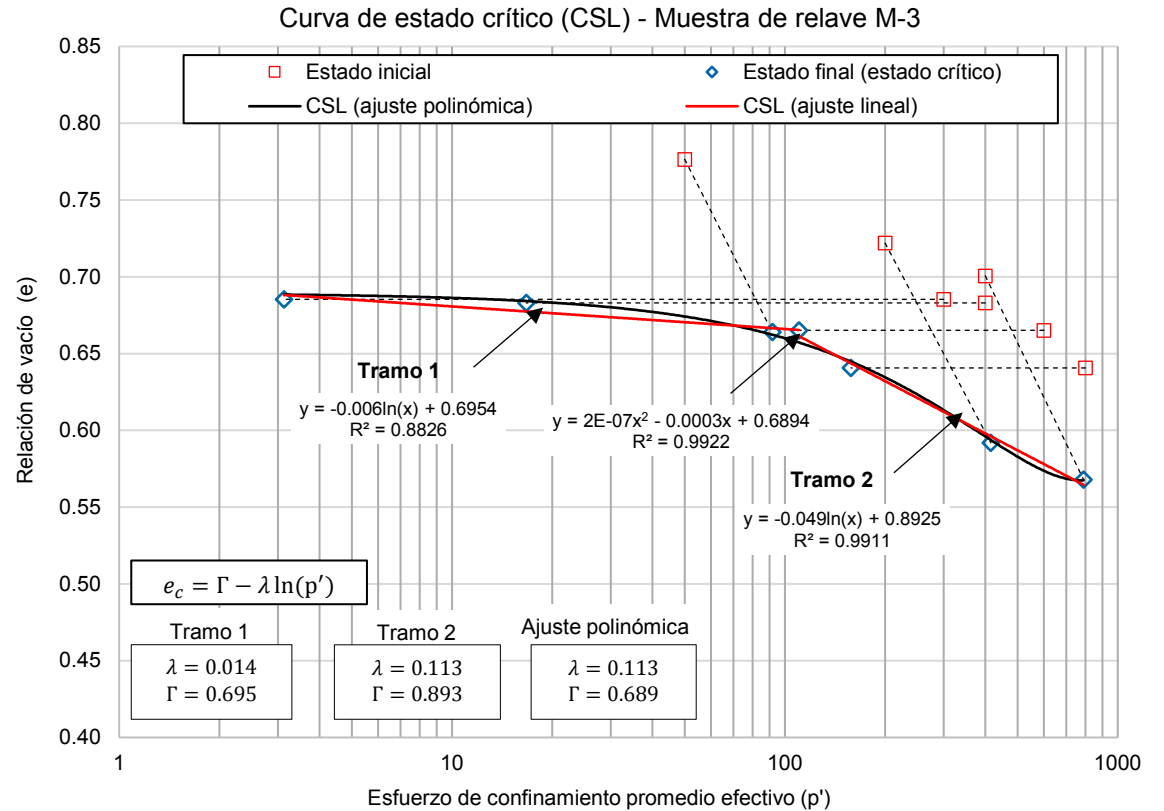
Clasificación SUCS: SP(Arena pobremente gradada)
Elaborado por: Diana Damian

6. Datos de entrada para la estimación de la CSL

N°	Tipo ensayo	Etapa de consolidación		Estado Crítico	
		Presión de confinamiento kPa	$e_{fcons.}$	Presión efectivo promedio kPa	e_c
1	CU	50	0.769	0.000	0.769
2	CU	100	0.735	0.000	0.735
3	CU	300	0.685	3.126	0.685
4	CU	400	0.683	16.707	0.683
5	CU	600	0.665	110.190	0.665
6	CU	800	0.641	158.016	0.641
7	CD	50	0.777	91.670	0.664
8	CD	200	0.722	415.635	0.592
9	CD	400	0.701	789.370	0.568

Abreviaturas:

- V_{fsat} Volumen final - etapa de saturación
- $V_{fcons.}$ Volumen final - etapa consolidación
- $\gamma_{d_{fsat}}$ Peso específico seco final - etapa saturación
- $\gamma_{d_{fcons}}$ Peso específico seco final - etapa consolidación
- e_{fsat} Relación de vacío final - etapa saturación
- $e_{fcons.}$ Relación de vacío final - etapa consolidación
- H_{fsat} Altura final del espécimen- etapa saturación
- $H_{fcons.}$ Altura final del espécimen- etapa consolidación
- D_{fsat} Diámetro final del espécimen - etapa saturación
- $D_{fcons.}$ Diámetro final del espécimen - etapa consolidación



Nota:

1. El parámetro lambda se expresa en base 10 ($\lambda_{10} = 2.303 \lambda$) por tratarse de un tema experimental y no de un modelo constitutivo.
2. Se consideró la parte lineal de la curva en el rango de $100 \text{ kPa} < p' < 400 \text{ kPa}$ para determinar los parámetros λ y Γ .
3. Los ensayos triaxiales CU de 50kPa y 100kPa no se consideró en la estimación de la CSL por presentar el esfuerzo de confinamiento promedio efectivo p' prácticamente nulo (licuación estática).

Anexo D – Reporte de los ensayos triaxiales de prueba y error para la estimación de la CSL

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

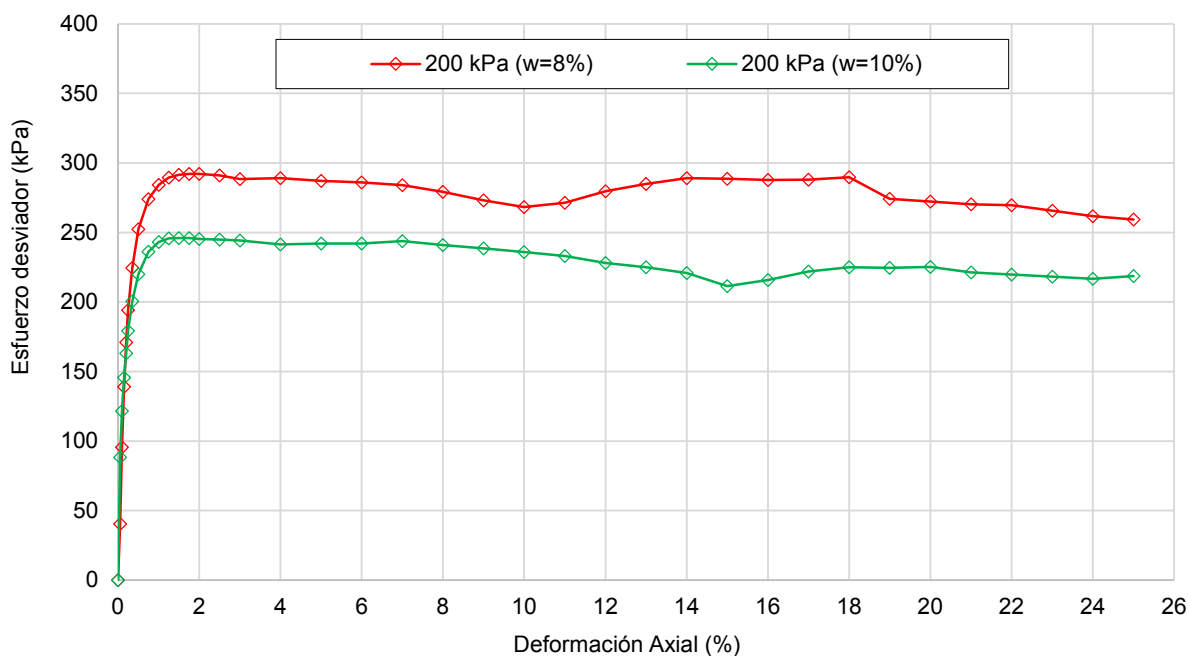
Muestra: M-1
Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 09/06/2021

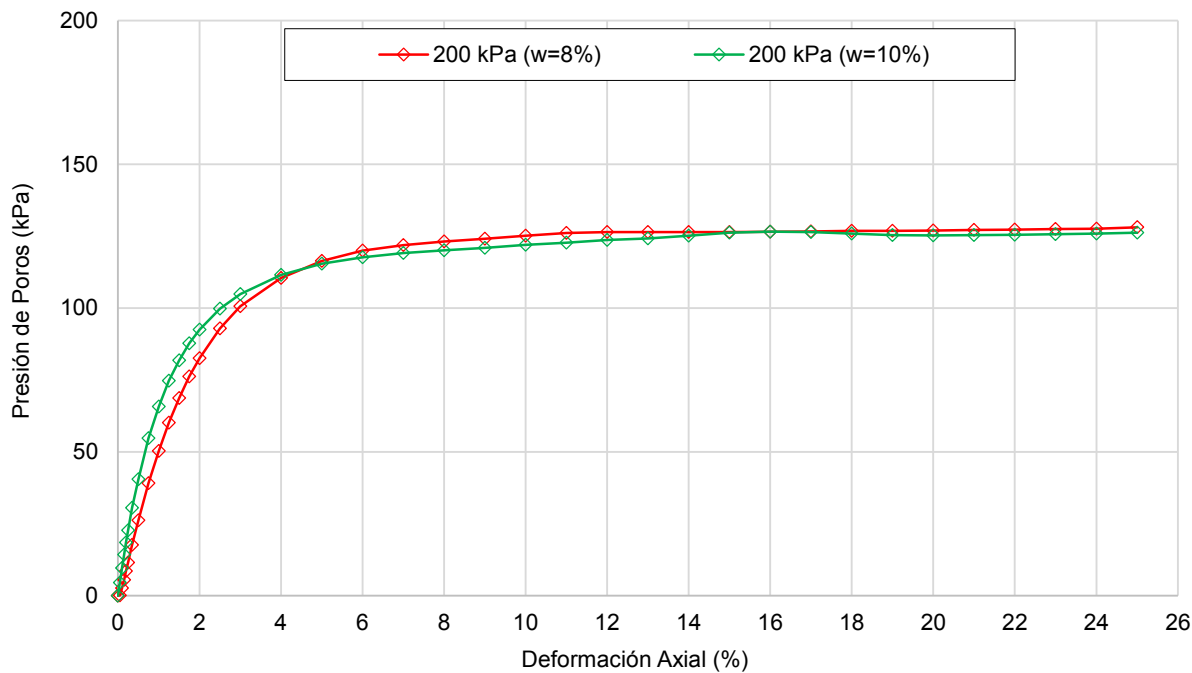
Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³, humedad de 5% , 8 % y 10%

Deformación vs Esfuerzo



Deformación vs Presión de Poros



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

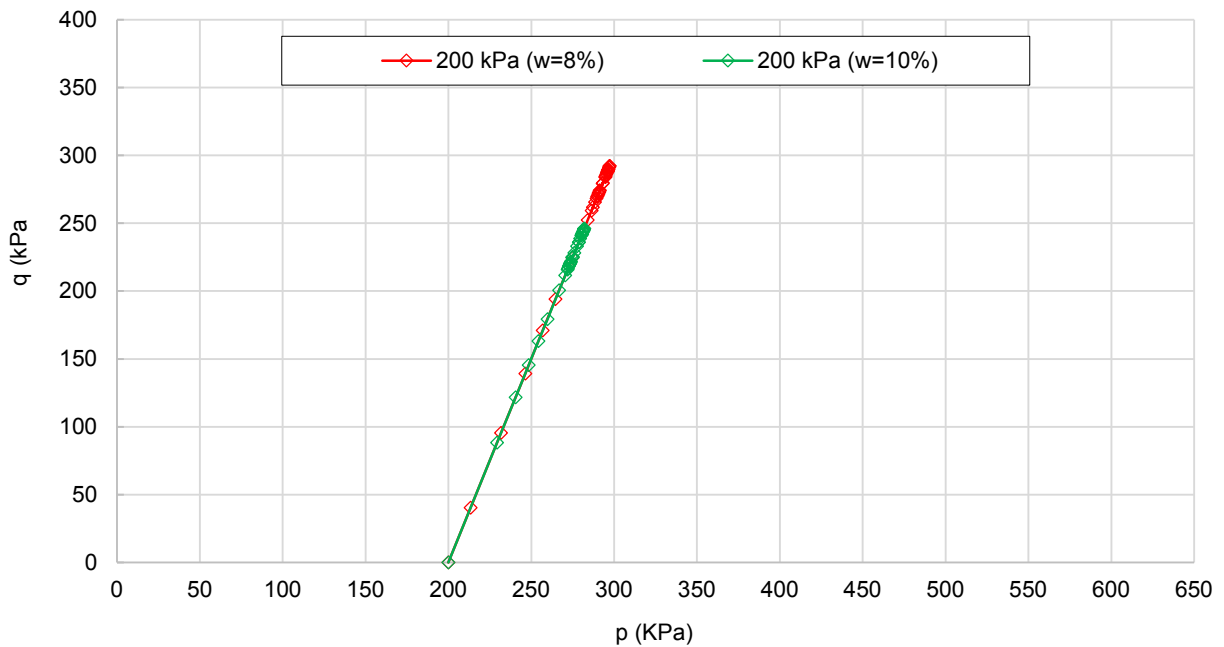
Muestra: M-1
Descripción: Relave fino

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 09/06/2021

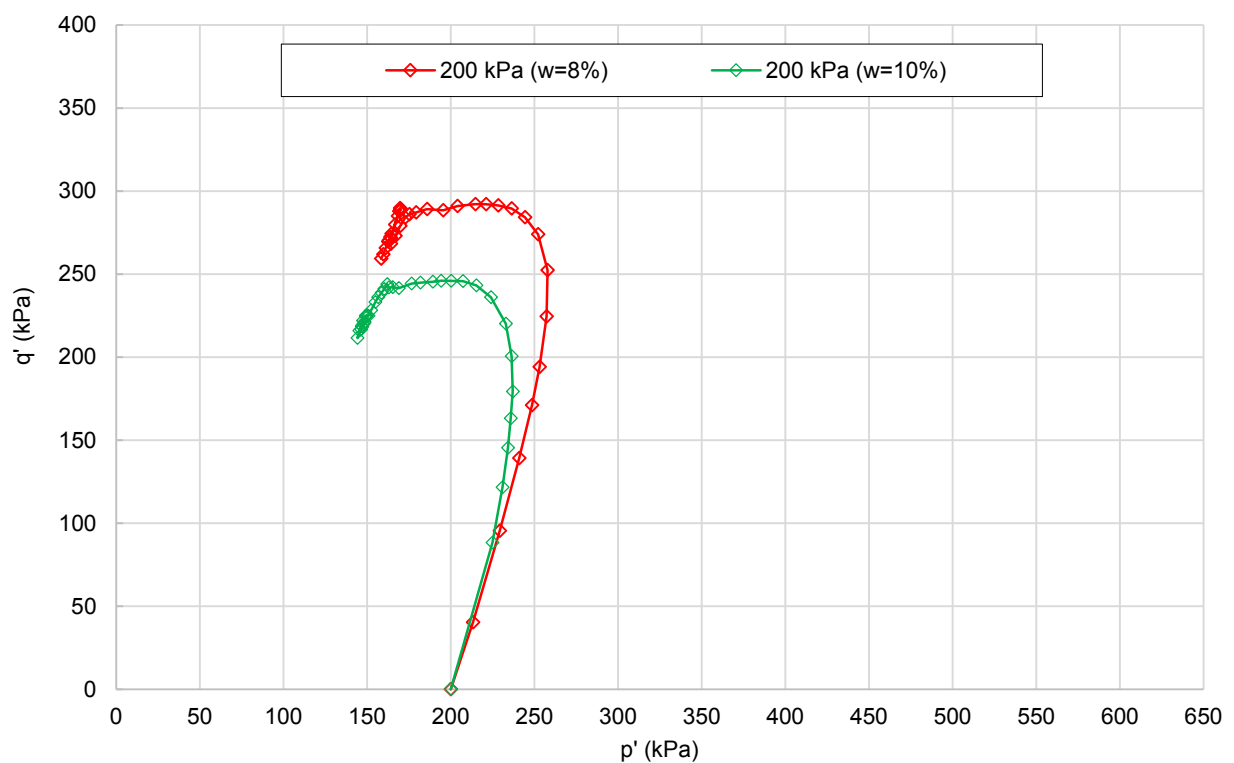
Clasificación SUCS: **SP-SC**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.138 g/cm³, humedad de 5% , 8 % y 10%

Esfuerzos totales



Esfuerzos Efectivos



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

ASTM-D4767

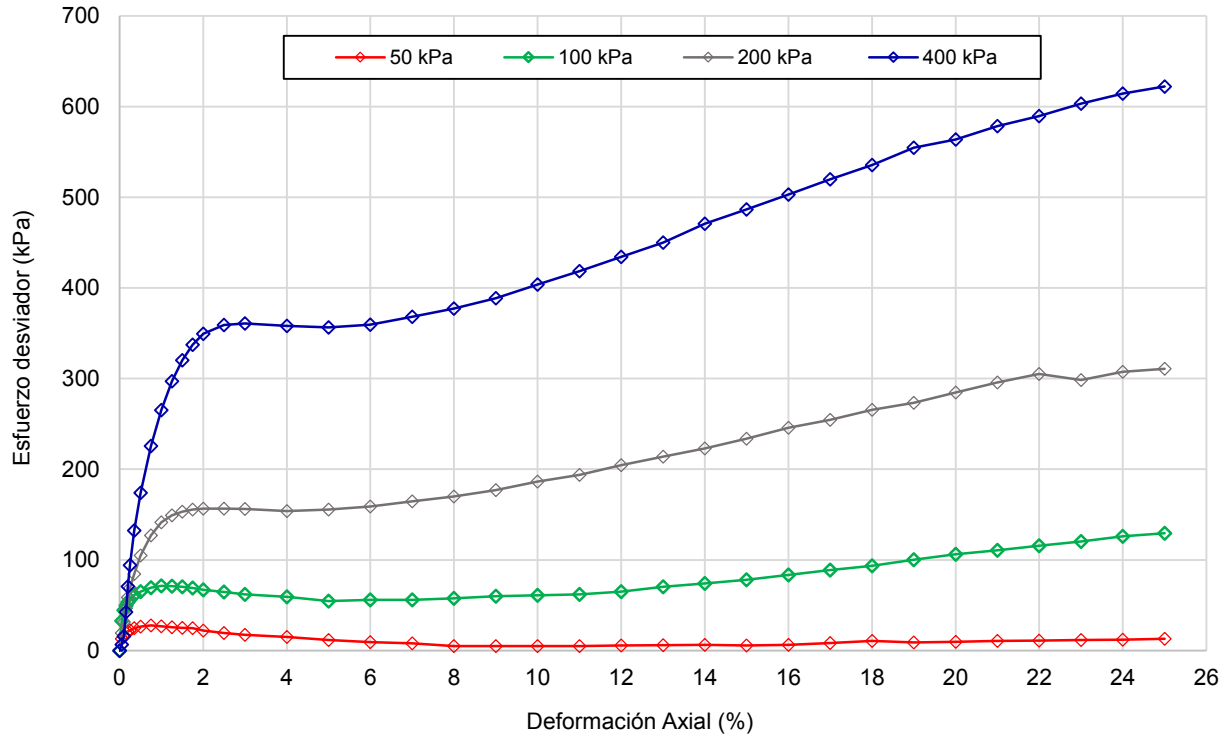
Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 02/02/2021

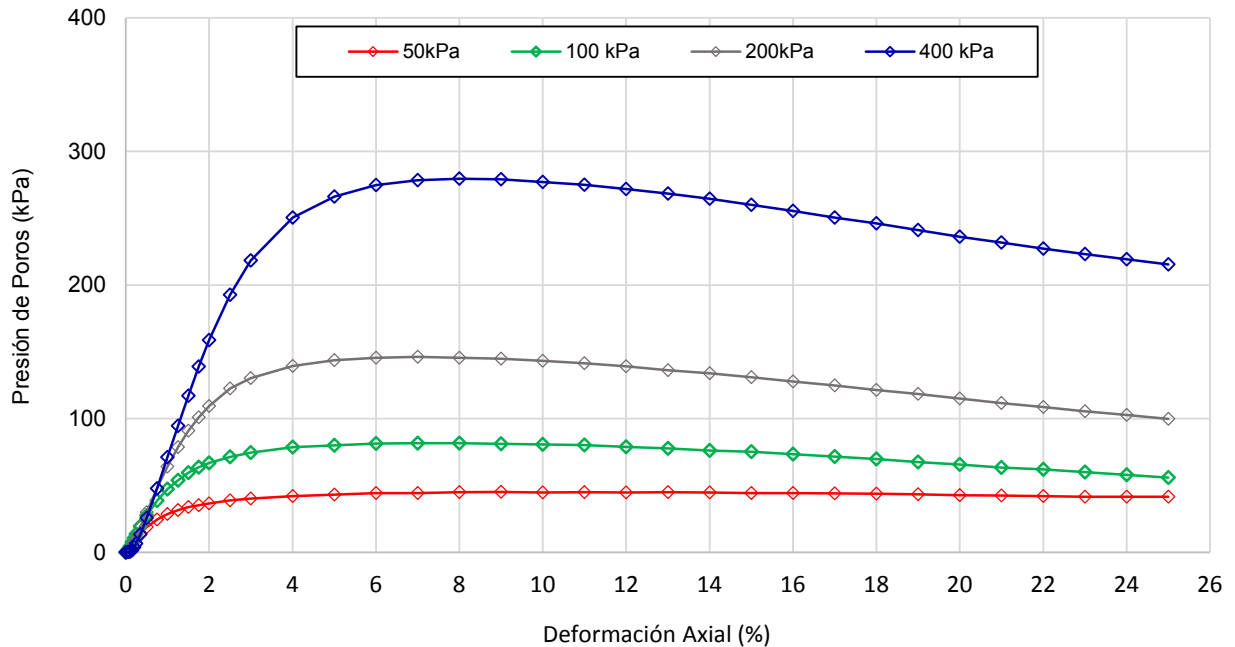
Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 2 %

Deformación vs Esfuerzo



Deformación vs Presión de Poros



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

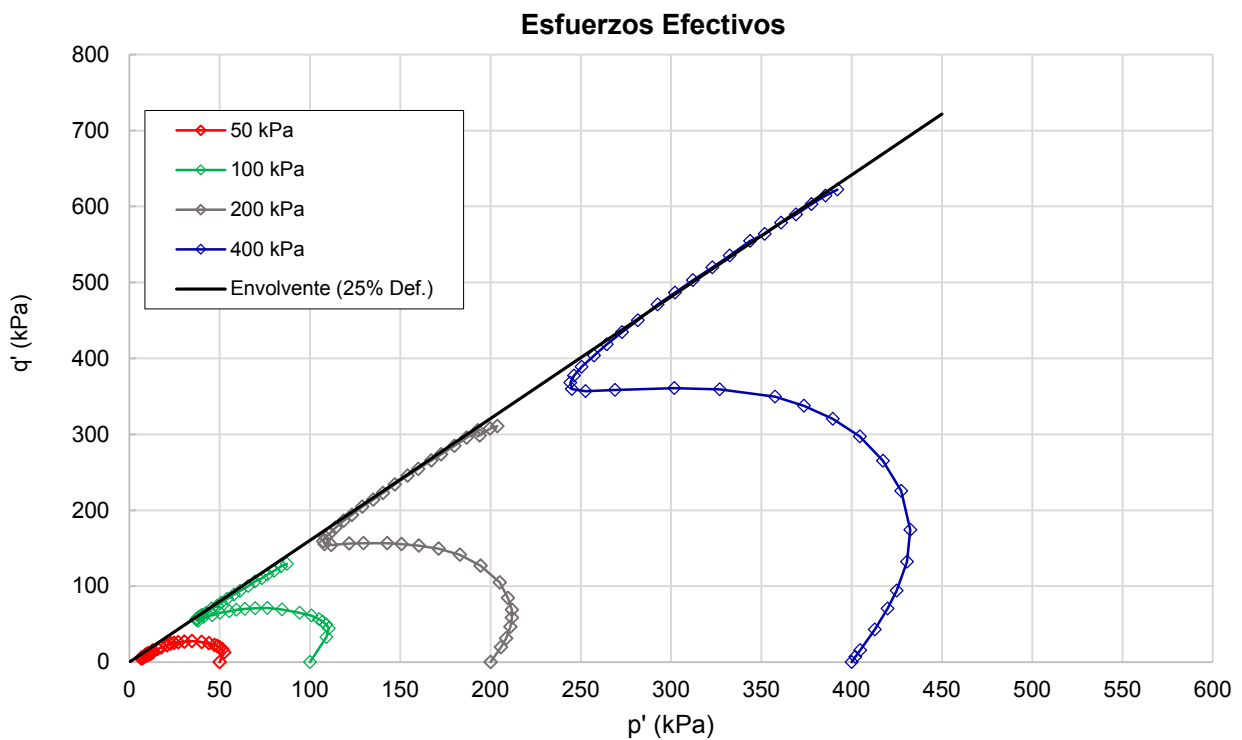
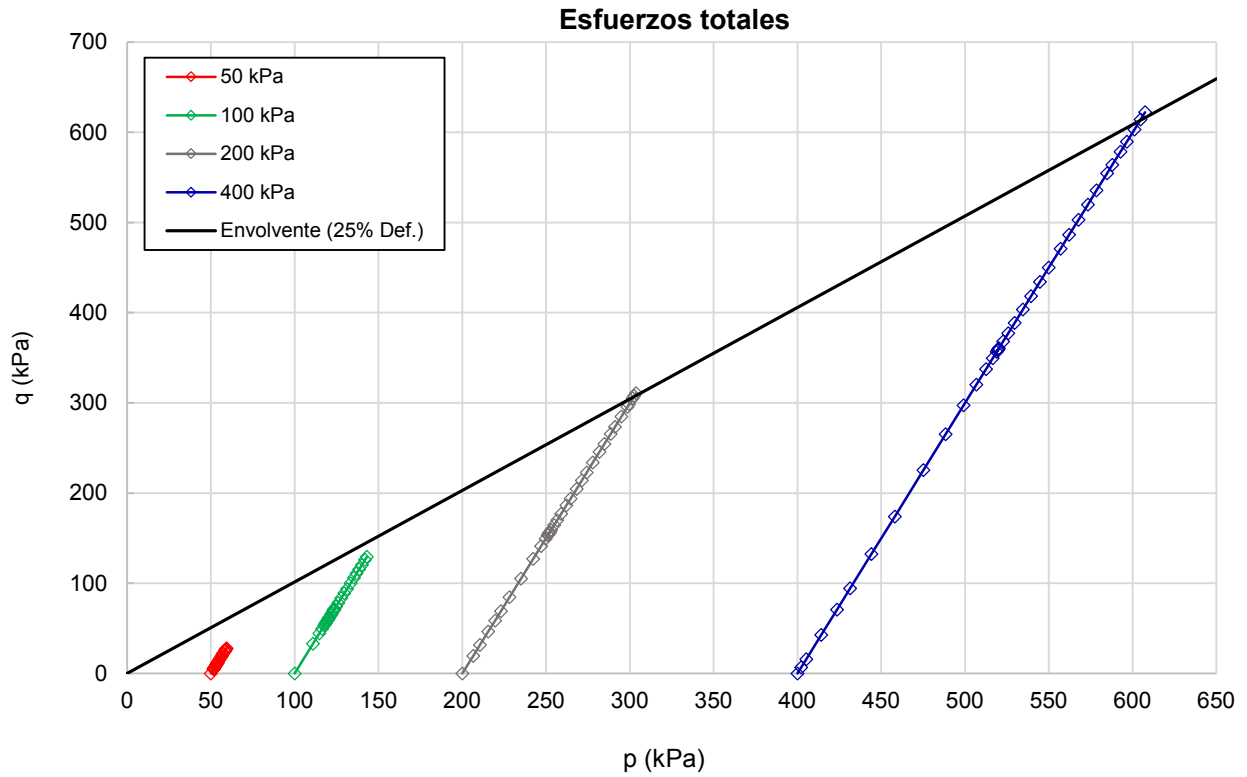
ASTM-D4767

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 05/02/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 2 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

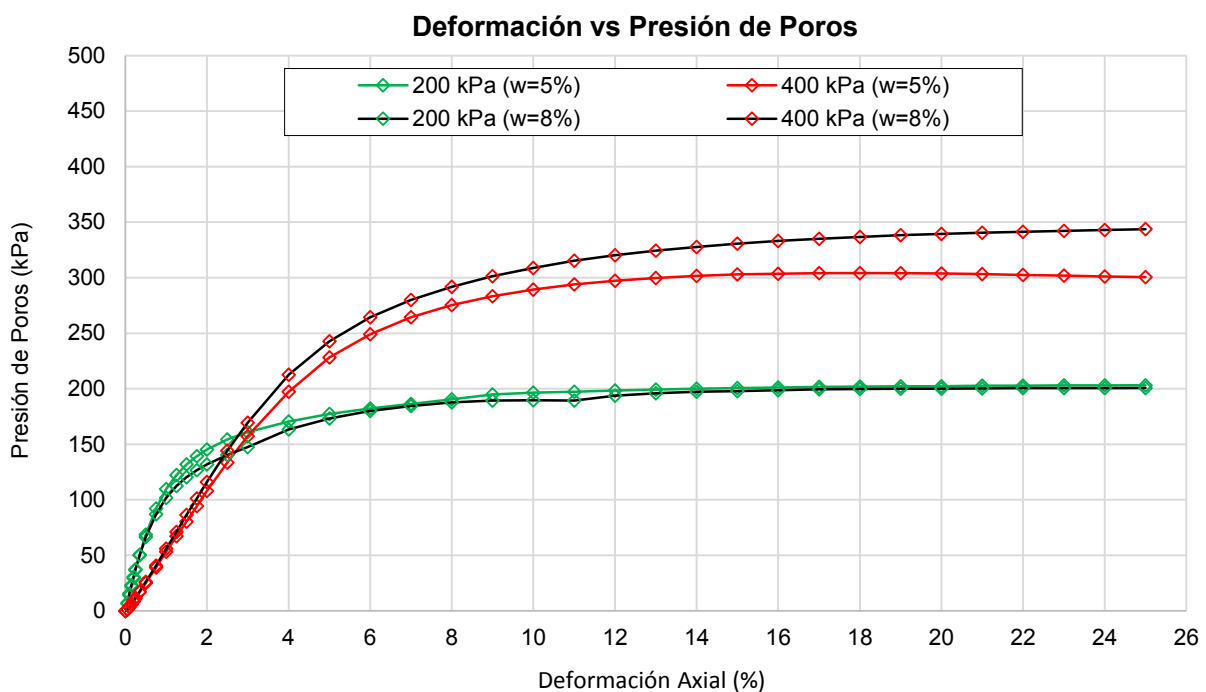
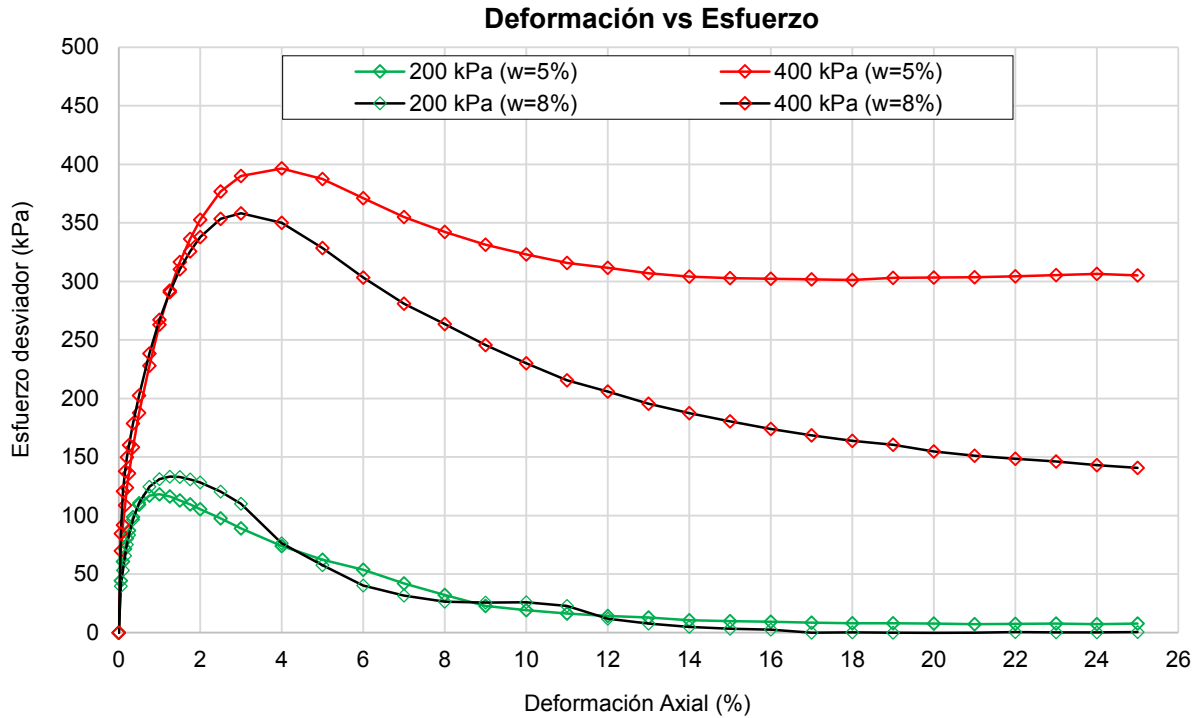
ASTM-D4767

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 09/06/2021

Clasificación SUCS: SP

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 % y 8 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

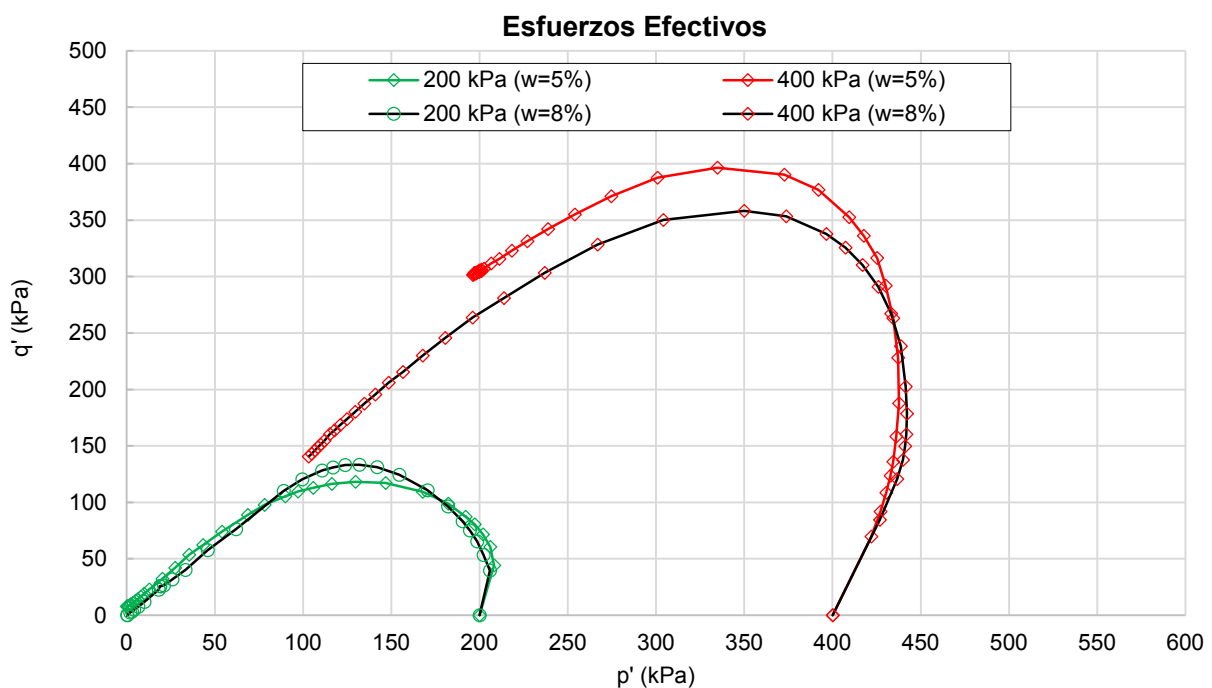
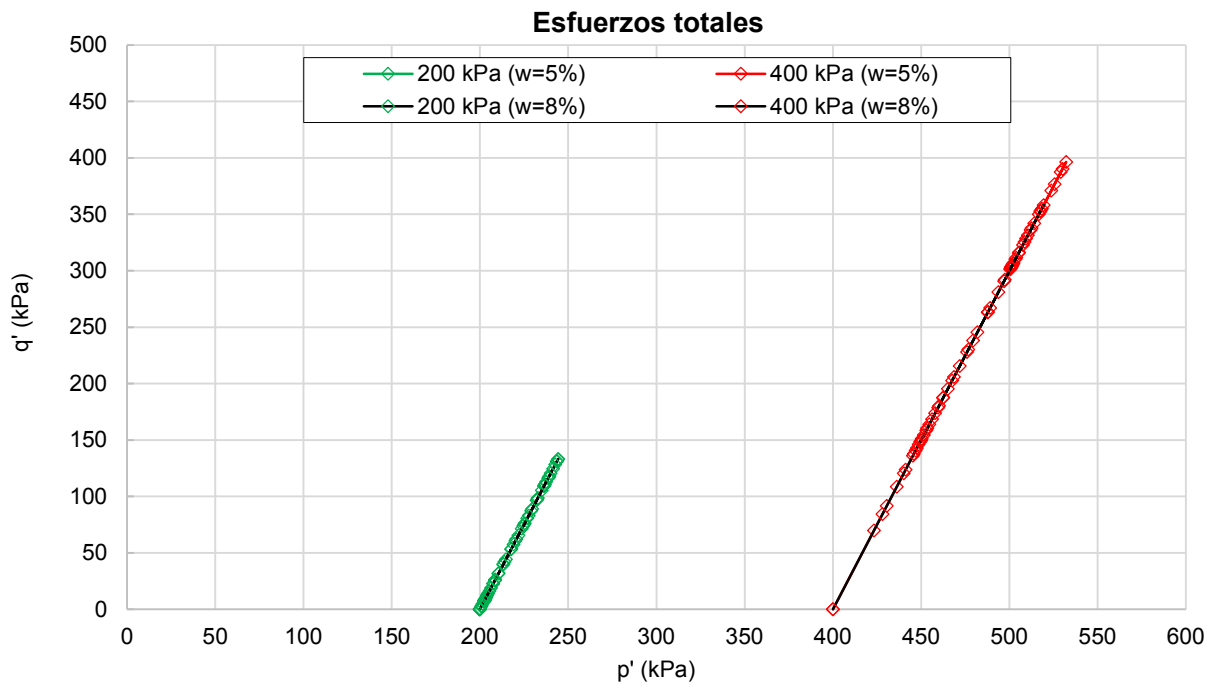
ASTM-D4767

Muestra: M-2
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 09/06/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.34 g/cm³ y humedad de 5 % y 8 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado-No drenado (CU)

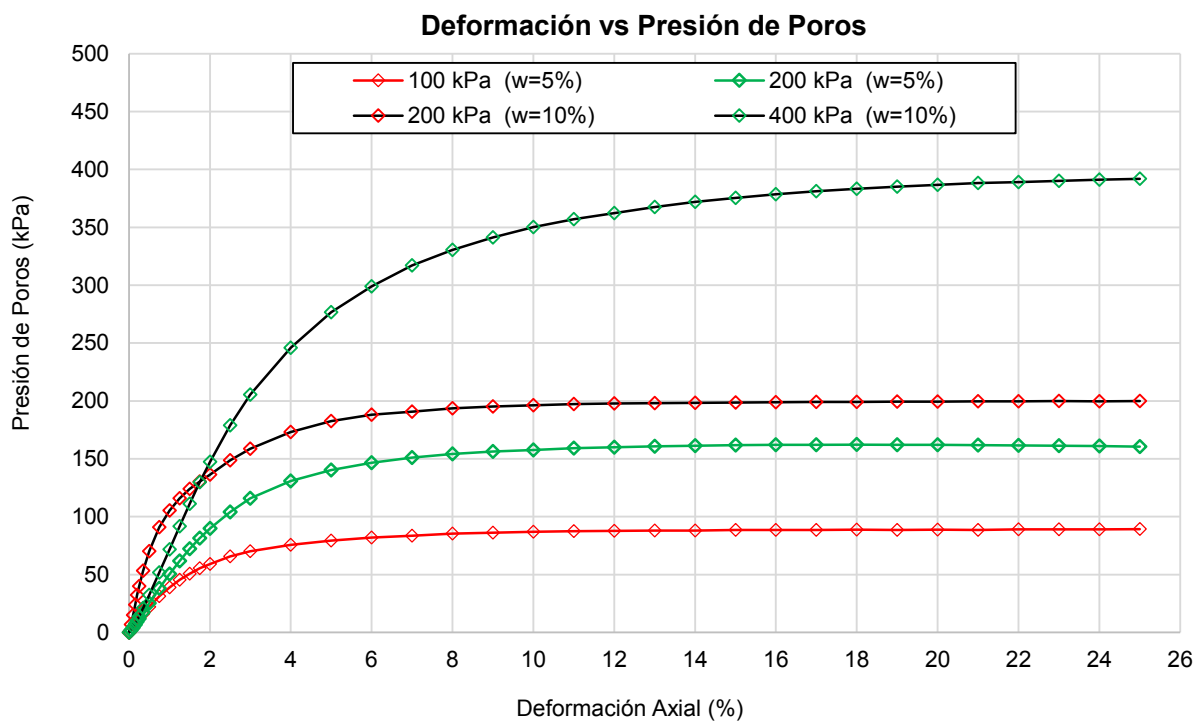
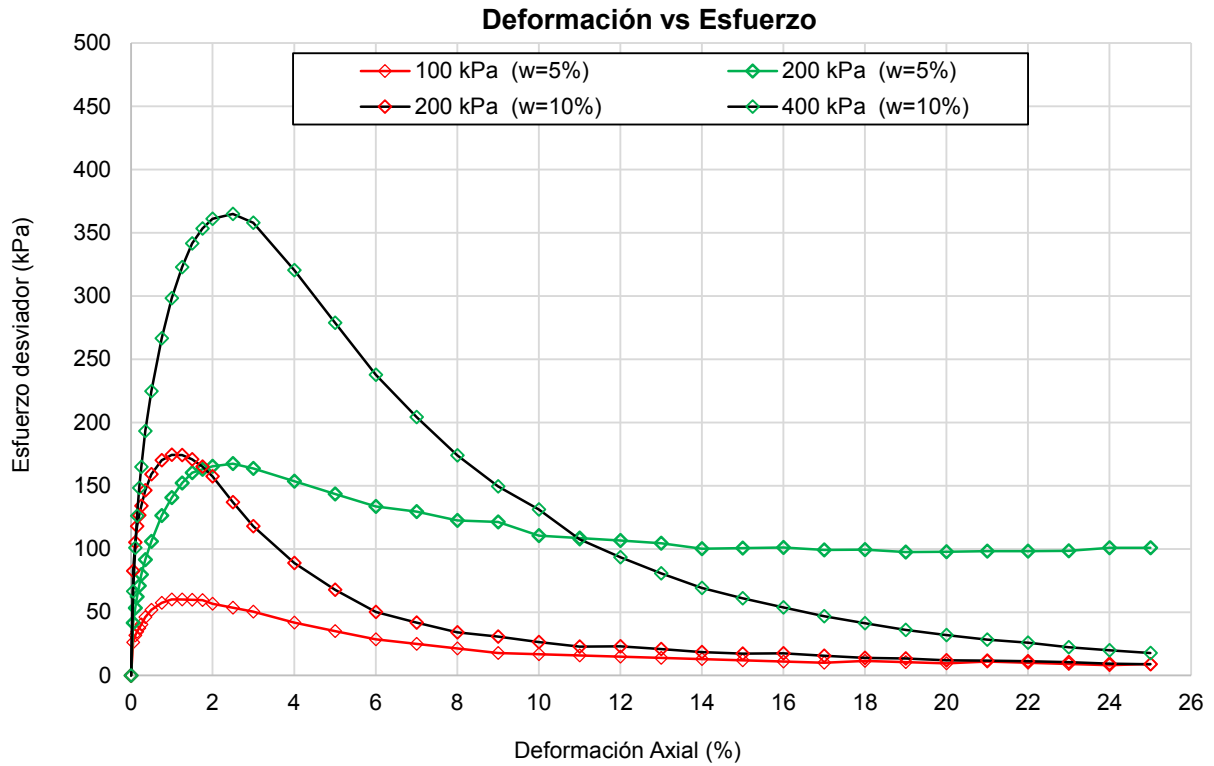
ASTM-D4767

Muestra: M-3
Descripción: Relave grueso

Elaborado por: Diana Damian
Fecha: 18/04/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 5 %



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Consolidado-No drenado (CU)
ASTM-D4767

Muestra: M-3

Elaborado por: Diana Damian

Descripción: Relave grueso

Fecha: 18/04/2021

Clasificación SUCS: **SP**

Estado: Reconstituido y compactado a una densidad seca de 1.47 g/cm³ y humedad de 5 %

