



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comportamiento esfuerzo-deformación
en ensayos triaxiales tipo CU de muestras
de jal inalteradas y reconstituidas.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Bryan Uriel Arredondo Galvez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Osvaldo Flores Castrellón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Dedicado a:

A mis padres, por su apoyo y cariño en todo momento, quienes siempre han sido un sostén en mi camino.

A mi hermano y hermana, por ser los motores de mi vida.

A Leslie, por su amor y todo su apoyo, por motivarme a ser una mejor persona cada día y siempre estar conmigo.

Agradecido con:

Mi Universidad que me ha brindado las bases académicas para lograr cumplir esta meta. A mis profesores, por sus enseñanzas y consejos, no solo los de la UNAM, sino todos los que me han brindado su sabiduría y apoyo.

A la Facultad de Ingeniería, lugar de los sueños y los triunfos, cuna de grandes mentes. Por haberme brindado una de las etapas más increíbles de mi vida.

El Dr. Osvaldo Flores Castellón, por la confianza que me brindó para realizar esta investigación, así como sus conocimientos, experiencia y paciencia que me ayudaron a desarrollarme profesionalmente y permitieron culminar este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas del Laboratorio de Mecánica de Suelos y brindarme todo el apoyo para el desarrollo de esta investigación. En especial, a todas las personas maravillosas con las que tuve el gusto de compartir esta aventura.

A mis sinodales, que me apoyaron durante el último trayecto de este trabajo.

Y a todos los grandes amigos que forman parte de mi vida.

ÍNDICE

SÍMBOLOS Y NOTACIÓN	1
ÍNDICE DE TABLAS	2
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ABSTRACT	7
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN.....	9
JUSTIFICACIÓN	10
OBJETIVOS.....	11
<i>Objetivo general</i>	11
<i>Objetivos específicos</i>	11
ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	12
1 ANTECEDENTES.....	13
1.1 PROCESOS MINEROS	15
1.2 RESIDUOS MINEROS.....	17
1.3 ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS MINEROS.....	18
1.4 DISEÑO DE DEPÓSITOS MINEROS.....	19
1.5 MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS	21
1.6 TIPOS DE DESCARGA Y DISPOSICIÓN DE JALES	24
1.7 MODOS DE FALLA EN DEPÓSITOS MINEROS.....	27
2 MARCO TEÓRICO.....	31
2.1 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN.....	31
2.2 PRUEBAS TRIAXIALES.....	33
2.3 CRITERIO MOHR COULOMB.....	35
2.4 PARÁMETROS DE SKEMPTON	38
2.5 COMPORTAMIENTO DE ARENAS.....	40
2.6 TRAYECTORIAS DE ESFUERZO	41
2.7 ESTUDIOS PREVIOS	44
3 METODOLOGÍA CONSIDERADA	50
4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	52
4.1 CÁMARA TRIAXIAL.....	53
4.2 INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO.....	54

4.3	CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL EQUIPO	57
5	DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE.....	63
5.1	DESCRIPCIÓN DE MATERIALES.....	63
5.2	PROPIEDADES ÍNDICES.....	63
5.3	LABRADO DE PROBETAS INALTERADAS	66
5.4	FORMACIÓN DE PROBETAS RECONSTITUIDAS	69
5.4.1	<i>Preparación del material.....</i>	73
5.4.2	<i>Compactación del material.....</i>	74
5.5	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYE	76
5.5.1	<i>Montaje.....</i>	79
5.5.2	<i>Saturación por contrapresión.....</i>	81
5.5.3	<i>Parámetro B de Skempton</i>	82
5.5.4	<i>Consolidación.....</i>	84
5.5.5	<i>Falla</i>	85
6	PRESENTACIÓN DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	88
6.1	DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE CONFINAMIENTO	88
6.2	RELACIONES VOLUMÉTRICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS.....	90
6.3	SATURACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE ENSAYES	92
6.4	COMPARACIÓN DE CURVAS ESFUERZO DESVIADOR – DEFORMACIÓN UNITARIA AXIAL Y PRESIÓN DE PORO – DEFORMACIÓN UNITARIA AXIAL DE MUESTRAS INALTERADAS Y RECONSTITUIDAS.....	96
6.5	ANÁLISIS DEL CRITERIO MOHR-COULOMB.....	103
6.6	TRAYECTORIAS DE ESFUERZO P^2 -Q.....	110
6.7	OBSERVACIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN	113
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	116
	REFERENCIAS	118

SÍMBOLOS Y NOTACIÓN

B	Parámetro B de Skempton
c	Cohesión
c'	Cohesión en términos de esfuerzos efectivos
CU	Prueba triaxial consolidada no drenada
δ	Desplazamiento
e	Relación de vacíos
ε	Deformación unitaria axial
Φ	Ángulo de fricción interna
Φ'	Ángulo de fricción interna en términos de esfuerzos efectivos
G _s	Densidad relativa de sólidos
G _w	Grado de saturación
γ_d	Peso volumétrico seco
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
IP	Índice de plasticidad
MC	Análisis utilizando el criterio Mohr-Coulumb
M	Pendiente de la línea de falla o envolvente de colapso
CD	Prueba triaxial consolidada drenada
UU	Prueba triaxial no consolidada no drenada
σ	Esfuerzo
σ'	Esfuerzo efectivo
σ_1	Esfuerzo principal mayor
σ_3	Esfuerzo principal menor
P	Carga
p'	Esfuerzo efectivo octaédrico
q	Esfuerzo desviador
TET	Trayectoria de Esfuerzos Totales
TEE	Trayectoria de Esfuerzos Efectivos
u	Presión de poro
V	Voltaje
w	Contenido de agua

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Número de muertes debido a la falla de depósitos de jales alrededor del mundo (Pérez, 2019).	30
Tabla 2-1 Valores de cohesión y ángulo de fricción encontrados por Shamzai <i>et al.</i> (2007), para pruebas triaxiales tipo CU.	46
Tabla 2-2 Resumen de los parámetros mecánicos en muestras reconstituidas (Flores <i>et al.</i> , 2012). 47	
Tabla 2-3 Resultados de parámetros de resistencia obtenidos bajo el criterio de Mohr-Coulomb (Bernal, 2016).	48
Tabla 2-4 Parámetros mecánicos obtenidos por González (2019) a partir de ensayos UU en probetas inalteradas y reconstituidas.	49
Tabla 4-1 Resumen de calibración y verificación de los transductores.	62
Tabla 5-1 Contenido natural de agua de la muestra proveniente de San Luis Potosí.....	65
Tabla 5-2 Resumen de propiedades de las muestras en esta investigación.	66
Tabla 6-1 Relaciones gravimétricas y volumétricas iniciales de las pruebas realizadas.	90
Tabla 6-2 Resumen de las condiciones volumétricas en las etapas de saturación y consolidación, a partir de las mediciones directas de cambio de volumen.	96
Tabla 6-3 Tabla resumen de valores obtenidos de las curvas de presión de poro y esfuerzo desviador	101
Tabla 6-4 Parámetros mecánicos totales y efectivos de la muestra inalterada de Colima.	104
Tabla 6-5 Parámetros mecánicos totales y efectivos de la muestra reconstituida de Colima.	105
Tabla 6-6 Resumen de parámetros mecánicos obtenidos en estados de esfuerzos efectivos y totales.	110
Tabla 6-7 Comparación del ángulo de fricción interna.	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mina a cielo abierto (Arriaga, 2019).	15
Figura 1-2 Interior de la mina de Hierro Orconera III, Vizcaya, España (Urdangaray, 2020).	15
Figura 1-3 Proceso de la obtención del mineral de beneficio (Fell <i>et al.</i> , 2005).	16
Figura 1-4 Tipos de formas de almacenamiento en vertederos y tipos de vertederos de residuos definidos por la topografía (Sanabria, 2018).	18
Figura 1-5 Esquema de la sección trasversal de la disposición de residuos mineros en aguas profundas (Sanabria, 2018).	19
Figura 1-6 Presa de Jales con el método “aguas arriba” (Flores, 2019).	22
Figura 1-7 Corte esquemático de Depósito de Jales (Flores, 2019).	23
Figura 1-8 Métodos de disposición. a) Un solo punto de descarga y b) Espigoteo (Bernal, 2016).	26
Figura 1-9 Diagrama de ciclón (Bernal, 2016).	26
Figura 1-10 Medios de disposición final. a) espigoteo., b) cicloneo, c) jal en pasta y d) jal filtrado (Flores, 2019).	27
Figura 1-11 Desborde de Presa Samarco. a) Posterior a la falla y b) Erosión al pie de la cortina (Sanabria, 2018).	29
Figura 2-1 Curva esfuerzo-deformación de Colima, probeta inalterada con esfuerzo de confinamiento de 1.50 kg/cm ² .	33
Figura 2-2 Esfuerzos en una prueba de compresión triaxial (Deméneghi & Puebla, 2001).	34
Figura 2-3 Esquema de esfuerzos en un espécimen probado en cámara triaxial, con ángulo α del plano de falla respecto a la horizontal.	34
Figura 2-4 Círculo de esfuerzos de Mohr (modificado de Peck <i>et al.</i> , 1983).	35
Figura 2-5 Envolvente de falla de un mismo suelo a diferentes valores de confinamiento (Deméneghi & Puebla, 2001).	36
Figura 2-6 Relación entre ángulo y ángulo α (modificado de Peck <i>et al.</i> , 1983).	37
Figura 2-7 Envolvente de falla para esfuerzos totales y esfuerzos efectivos, en pruebas CU (Peck <i>et al.</i> , 1983).	38
Figura 2-8 Variación de la presión de poro durante el desarrollo de una prueba triaxial (Deméneghi & Puebla, 2001).	39
Figura 2-9 Trayectorias de esfuerzos efectivos de compresión triaxial, ensayos CU y CD (Ovando & Segovia, 1996).	41
Figura 2-10 Comportamiento de arena densa y muy suelta (Ovando & Segovia, 1996).	42

Figura 2-11 Envolvente de falla en el estado crítico (Deméneghi & Puebla, 2001).	43
Figura 2-12 a) Trayectoria de esfuerzos p' - q y b) Relación entre el porcentaje de deformación unitaria axial y la presión de poro (Rodríguez, 2006).	45
Figura 4-1 Cámara triaxial 3, Instituto de Ingeniería de la UNAM.	53
Figura 4-2 Esquema generalizado de Cámara triaxial con muestra de suelo (Modificado de Budhu, 2000).	54
Figura 4-3 Cámaras triaxiales cíclicas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.	55
Figura 4-4 Transductores que conforman el sistema de la cámara triaxial cíclica. IIUNAM.	56
Figura 4-5 Menú del apartado de calibración del equipo, LabVIEW.	57
Figura 4-6 Menú de calibración experimental de transductores.	58
Figura 4-7 Arreglo de elemento patrón con transductor de LVDT.	58
Figura 4-8 Curva de calibración experimental, con valores finales de pendiente y ordenada de la función lineal.	59
Figura 4-9 a) Curva de carga sensor contra carga patrón, además y b) curva de desplazamiento patrón contra error parcial, desplazamiento al 100%.	60
Figura 4-10 Configuración para la calibración del sensor de carga al 100%.	60
Figura 5-1 Curva granulométrica presentada para las tres muestras de estudio.	64
Figura 5-2 Análisis granulométrico típico para un intervalo de 1 a 0.001 mm obtenidos de diferentes procesos mineros (Blight, 2010).	64
Figura 5-3 Curva de fluidez de la muestra 2 de Sombrero Zacatecas, con límite líquido de 29.22% de agua.	66
Figura 5-4 Proceso de extracción y corte de probetas inalteradas.	67
Figura 5-5 Labrado de probeta inalterada.	68
Figura 5-6 Probetas de cada sitio de estudio, en estado inalterado.	69
Figura 5-7 Piezas para el molde bipartido y su conjunto.	72
Figura 5-8 Proceso de homogenización y separación por capas del material para reconstitución.	74
Figura 5-9 Proceso de compactación de probeta reconstituida.	75
Figura 5-10 Muestras reconstituidas a punto de ser montadas.	76
Figura 5-11 Acondicionamiento del equipo previo a la prueba.	77
Figura 5-12 Menú de etapas de pruebas triaxiales, Instituto de Ingeniería.	78
Figura 5-13 Configuración del ensayo, Generales.	79
Figura 5-14 Configuración del ensayo, Falla.	79
Figura 5-15 Sistema de transductores en tiempo real.	80
Figura 5-16 Etapa de montaje.	81

Figura 5-17 Proceso de saturación y registro de datos de acuerdo a cada incremento realizado en una prueba.....	82
Figura 5-18 Incremento de presión de poro respecto al tiempo, al abrir la llave de confinamiento. 83	
Figura 5-19 Medición del parámetro B de Skempton.	83
Figura 5-20 Registro del proceso de consolidación, en donde se muestra la curva de consolidación y la curva de disipación de presión de poro.	85
Figura 5-21 Configuración de la falla estática de una prueba Triaxial del tipo CU.....	86
Figura 5-22 Término de la falla estática, donde se muestra la variación del desplazamiento, carga y presión de poro; muestra inalterada de Zacatecas con $\sigma'_v=2.00 \text{ kg/cm}^2$	86
Figura 5-23 Probetas previo a culminar la etapa de falla o ya falladas.....	87
Figura 6-1 Pesos volumétricos de probetas inalteradas vs reconstituidas.....	91
Figura 6-2 Relaciones de vacíos de probetas inalteradas vs reconstituidas.	92
Figura 6-3 Relación entre el esfuerzo de confinamiento y el volumen de aire en la etapa de saturación, muestras reconstituidas de Zacatecas a) $\sigma_c=0.5 \text{ kg/cm}^2$, b) $\sigma_c=2.0 \text{ kg/cm}^2$ y c) $\sigma_c=3.5 \text{ kg/cm}^2$	93
Figura 6-4 Relación del esfuerzo de confinamiento con el grado de saturación en la etapa de Saturación, muestras reconstituidas de Zacatecas a) $\sigma_c=0.5 \text{ kg/cm}^2$, b) $\sigma_c=2.0 \text{ kg/cm}^2$ y c) $\sigma_c=3.5 \text{ kg/cm}^2$	94
Figura 6-5 Curvas de disipación (presión de poro y cambio de volumen) de las muestras reconstituidas de Colima, a) $\sigma_c=0.7 \text{ kg/cm}^2$, b) $\sigma_c=1.5 \text{ kg/cm}^2$ y c) $\sigma_c=2.0 \text{ kg/cm}^2$	95
Figura 6-6 Deformación unitaria axial – Presión de poro de las muestras inalteradas y reconstituidas de Colima.	98
Figura 6-7 Deformación unitaria axial esfuerzo desviador de las muestras inalteradas y reconstituidas de Colima.	98
Figura 6-8 Comportamiento de la presión de poro y esfuerzo desviador de las muestras de Zacatecas.	99
Figura 6-9 Comportamiento de la presión de poro y esfuerzo desviador de las muestras de San Luis Potosí.....	100
Figura 6-10 Curva normalizada de presión de poro respecto al esfuerzo efectivo de Colima.	102
Figura 6-11 Curva normalizada de la presión de poro respecto al esfuerzo efectivo de Zacatecas. 102	
Figura 6-12 Curva normalizada de la presión de poro respecto al esfuerzo efectivo de San Luis Potosí.	103
Figura 6-13 Envolvente de falla por el criterio Mohr Coulomb para la muestra inalterada de Colima.	104

Figura 6-14 Envolvente de falla por el criterio Mohr Coulomb para la muestra reconstituida de Colima.....	105
Figura 6-15 Comparación de esfuerzos totales de probetas inalteradas y reconstituidas de Colima.	106
Figura 6-16 Comparación de esfuerzos efectivos de probetas inalteradas y reconstituidas de Colima.	106
Figura 6-17 Comparación de esfuerzos totales de probetas inalteradas y reconstituidas de Zacatecas.	107
Figura 6-18 Comparación de esfuerzos efectivos de probetas inalteradas y reconstituidas de Zacatecas.....	108
Figura 6-19 Comparación de esfuerzos totales y efectivos de probetas inalteradas de San Luis Potosí.	109
Figura 6-20 Trayectorias de esfuerzos p' - q del estado de Colima.	111
Figura 6-21 Trayectorias de esfuerzos p' - q del estado de Zacatecas.	112
Figura 6-22 Trayectorias de esfuerzo p' - q del estado de San Luis Potosí.	112

ABSTRACT

For the design, construction, and development of tailings dams, it is important to take into account several site characteristics and geometry dams, where mechanical parameters of tailings must be obtained to carry out the necessary stability analyses to provide safety and reliability to the mine deposit.

This work presents a physical and mechanical characterization of tailings from three different dams located in the States of Colima, Zacatecas, and San Luis Potosi. An experimental stage is developed, which consists of carrying out CU triaxial tests. For the performance of these tests, it was necessary to prepare natural specimens and evaluate their mechanical parameters. Additionally, there were used remolded specimens from the material used in natural samples, where volumetric conditions were similar to the natural specimens as much as possible, in particular, voids ratio and dry volumetric weight. These remolded samples were tested under CU conditions, and their mechanical strength parameters were obtained, in terms of total and effective stresses. The intention of carrying out the test on natural and remolded samples, with the same initial volumetric conditions, was to verify the soil structure impact on its mechanical behavior.

For the performance of these tests, automated triaxial equipment was used, which required a calibration process and the verification of the sensors installed in the equipment.

Furthermore, analysis of the results is presented, comparing the stress vs deformation behavior and the mechanical parameters of both samples. In the conclusions, it is highlighted the importance of using remolded samples to characterize deposit tailings, when it is not possible to hold natural ones.

RESUMEN

Para el diseño, construcción y ampliación de los depósitos de jales es necesario tener en cuenta diversas características del sitio y la geometría del depósito, en donde se deberá contar con parámetros mecánicos de los jales para poder realizar los análisis de estabilidad necesarios para poder brindar seguridad y confiabilidad al depósito.

En este trabajo se presenta una caracterización física y mecánica del jal proveniente de tres depósitos ubicados en los estados de Colima, Zacatecas y San Luis Potosí. Se desarrolla una etapa experimental la cual consta de realizar pruebas triaxiales tipo CU. Para la ejecución de estas pruebas fue necesario labrar probetas inalteradas y evaluar sus parámetros mecánicos, adicionalmente, se reconstituyeron probetas con el material utilizado en los ensayos inalterados, donde se buscó que las condiciones volumétricas fuesen lo más parecidas a las inalteradas, en particular la relación de vacíos y el peso volumétrico seco. Éstas se ensayaron en condiciones CU y se obtuvieron sus parámetros mecánicos de resistencia, en términos de esfuerzos totales y efectivos. La intención de realizar los ensayos en muestras inalteradas y reconstituidas con las mismas condiciones volumétricas iniciales es verificar la influencia de la estructura del suelo en su comportamiento mecánico.

Para la ejecución de estos ensayos se utilizó un equipo triaxial automatizado que como parte de su caracterización exigió llevar un proceso de calibración y verificación de los sensores instalados en el equipo.

Asimismo, se presenta el análisis de resultados obtenidos en donde se compara el comportamiento esfuerzo desviador vs deformación de ambas muestras y los parámetros mecánicos de éstas, y se discute sobre la pertinencia de utilizar muestras reconstituidas para caracterizar el jal de un depósito, en caso de que no sea posible tener muestras inalteradas.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria minera a lo largo de los siglos en México y en el mundo ha representado un gran impacto socio-económico y ambiental a causa de la gran cantidad de material (esto es, de beneficio y residuos) extraído de esta actividad económica. La minería ha generado una enorme cantidad de recursos para diversos tipos de industrias; debido a esto se ha creado un aumento mayor de residuos como producto de los procesos mineros. Es por ello que se ha ido concibiendo una mayor demanda en la construcción de depósitos de residuos mineros, los cuales resultan ser parte importante dentro de la realización de la minería. Es imprescindible que dichos depósitos cuenten con una mayor capacidad de almacenamiento del residuo y que, de igual manera, garanticen su estabilidad, seguridad y un mejor manejo en el control del impacto ambiental. No obstante, para un adecuado proceso de construcción de dichos depósitos, se tiene que considerar que la planificación de éstos incluye desde su diseño, construcción, operación, conservación, control de calidad hasta la clausura del depósito de jales. Para ello, se necesita contar con el conocimiento adecuado de las características del sitio de estudio y de las propiedades geotécnicas del mismo (mecánicas e hidráulicas), además de diferentes estudios previos (e.g., geológicos, geofísicos, geoquímicos, geo-hidrológicos, hidrológicos, hidráulicos y ambientales).

El comportamiento de un depósito de jales debe brindar seguridad y confiabilidad óptimas durante las distintas etapas de la operación minera. La adecuada planeación de este tipo de proyectos y su diseño demanda contar con la composición y estructuración del depósito (esto es, las propiedades geotécnicas del sitio y su caracterización). Por esta razón, es necesario contar con los parámetros mecánicos (i.e., cohesión y ángulo de fricción interna) del material de construcción y del residuo minero como uno de los estudios fundamentales.

Debido a la importancia de los parámetros mecánicos, es necesaria la extracción de probetas inalteradas que hagan la función de una muestra del suelo en estudio, con el fin de obtener la caracterización geotécnica del sitio y del residuo minero para así poder realizar una adecuada planeación y diseño del depósito. Sin embargo, a veces no es posible obtener tan fácilmente dichas muestras inalteradas y en caso de nuevos proyectos posiblemente no se tengan. Por esta razón, se recurre al uso de probetas reconstituidas, las cuales pueden dar una idea de las características reales del suelo, cosa que también podría obtenerse a partir de muestras inalteradas. Pero es esencial conocer qué tan adecuado resulta utilizar muestras reconstituidas en lugar de inalteradas (en caso de que éstas últimas no puedan obtenerse fácilmente) y las implicaciones que esto generaría en los resultados al momento de la caracterización geotécnica del sitio y del residuo minero.

En la presente investigación se muestra la caracterización física y mecánica de residuos sólidos de depósitos mineros ubicados en los estados de Colima, Zacatecas y San Luis Potosí. El trabajo se desarrolló en primera

instancia de forma experimental, en la cual se realizó la extracción de muestras inalteradas y posteriormente la reconstitución de muestras a partir del material de residuo en estudio obtenido en los tres sitios antes mencionados. Resaltando que, dichas muestras inalteradas de material eran extraídas de sondeos realizados en los depósitos de jales, mientras que las muestras reconstituidas se elaboraron por medio de una compactación estática en donde el peso volumétrico seco del material y la relación de vacíos tenían que ser similares a las de su homóloga inalterada. El peso volumétrico seco de las muestras es utilizado ya que es una característica volumétrica que no cambia teniendo un suelo parcialmente saturado o saturado, además de que define al peso de suelo seco como una constante. Por otro lado, la relación de vacíos es una característica asociada al espacio que ocupa el agua y el aire respecto al volumen de suelo. En este sentido, ambas propiedades se relacionan con el peso y volumen existente del suelo en la muestra y, para nuestro caso, con ambos valores se puede inferir una relación de volúmenes similares entre ambas muestras. Se descarta el uso de otras relaciones ya que pueden variar respecto al volumen de agua.

Para poder obtener los parámetros mecánicos del material se recurrió al uso de pruebas triaxiales estáticas tipo CU, consolidadas no drenadas debido a que nos permiten analizar muestras saturadas de suelo y poder observar el comportamiento de la presión de poro en los depósitos de jales mineros. Dichas pruebas permitieron obtener las curvas esfuerzo-deformación del material, y con ello poder hacer uso de la ley de resistencia por medio del criterio Mohr-Coulomb.

Ante lo expuesto, es importante realizar una comparación a partir de las curvas esfuerzo-deformación y los parámetros mecánicos del material al trabajar con muestras inalteradas y muestras reconstituidas, ambas en estado saturado.

JUSTIFICACIÓN

La disposición de residuos en la actualidad debe brindar seguridad a la población, al proyecto minero y al medio ambiente. Sin embargo, se ha demostrado que el inadecuado diseño, malas prácticas de construcción, operación y cierre, son las principales causas de que se presente un mal comportamiento y fallas en los depósitos mineros.

Los modos de falla más comunes de los cuales se tiene registro han sido por licuación estática o cíclica, niveles de disposición excesivos (i.e., incrementos rápidos de carga), falla en el suelo de cimentación, filtraciones excesivas, falta de control y supervisión durante la construcción y operación, entre otros, (Sanabria, 2018); en resumen, un diseño deficiente o la falta del conocimiento del comportamiento de los residuos mineros en el sitio de interés. Es por ello que el presente trabajo pretende incentivar la investigación para ayudar a realizar un análisis de estabilidad

de los elementos de contención como lo son las cortinas de los depósitos de jales mineros. Si bien este trabajo no resuelve todos los problemas antes mencionados, pretende ayudar y permitir que más personas se envuelvan en el tema de seguridad que es de suma importancia. En este trabajo se exponen las posibles diferencias (considerando los alcances del trabajo y la información disponible) respecto a curvas de esfuerzos-deformación y parámetros mecánicos entre muestras reconstituidas e inalteradas (se hizo la comparación de muestras procedentes de tres lugares diferentes). Esto con el fin de que cuando no se puedan obtener muestras inalteradas del sitio por diversas razones (e.g., porque no se puede hacer una exploración de campo o para un nuevo proyecto), se pueda recurrir al uso de muestras reconstituidas con base en un criterio ingenieril.

Diversas causas han evidenciado los problemas que generan la falla de los depósitos mineros, por mencionar algunos en los últimos 30 años, (Santos, 2012) y (Sanabria, 2018), se han presentado: desbordamiento del depósito de jales, Baia Mare (Rumania, 2000). Fallas en la cimentación del depósito, una muestra de esto se observó en el depósito Kolontar, (Hungría, 2010) y Mount Polley (Canadá, 2014). Fallas o rupturas, e.g, los depósitos de Stava (Italia, 1985), Attik (Suecia, 2000), Los Frailes (España, 1998), La Negra (Querétaro, 1987), Bacis (Durango, 1996), Kolontar (Hungría, 2010), Cananea (México, 2014); son solo algunos ejemplos de fallas que pudieron haberse prevenido con un adecuado diseño, haciendo las consideraciones y estudios pertinentes para el sitio durante la construcción y operación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Conocer el comportamiento esfuerzo-deformación y presión de poro-deformación de jales saturados de tres sitios específicos, comparando dos muestras (i.e., inalteradas y reconstituidas), realizadas con el mismo material de estudio y bajo condiciones similares de relaciones volumétricas y esfuerzos efectivos de confinamiento. Para verificar la influencia de la estructura del suelo en su comportamiento mecánico.

Objetivos específicos

- Calibrar y verificar los sensores instalados en el equipo triaxial estático y validar el programa de operación que permita ejecutar ensayos triaxiales tipo CU en residuos mineros.

- Definir un método de formación de probetas que permita reconstituir muestras con las mismas condiciones volumétricas iniciales a las inalteradas.
- Ensayar probetas inalteradas y reconstituidas con condiciones volumétricas iniciales semejantes y ensayarlas en condiciones no drenadas bajo la misma condición de esfuerzos efectivos.
- Comparar los resultados experimentales obtenidos en las muestras inalteradas y reconstituidas.
- Generar las conclusiones sobre la posibilidad del uso de muestras reconstituidas ensayadas en condiciones no drenadas, para la estimación de parámetros mecánicos.

ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

- Realizar una investigación en la que se consideren ensayos de probetas inalteradas y reconstituidas con las mismas condiciones granulométricas, volumétricas iniciales y de esfuerzo, ensayadas en condiciones no drenadas.
- Comparar los resultados obtenidos y evaluar el efecto de la estructuración del suelo en el comportamiento esfuerzo vs deformación.

1 ANTECEDENTES

¿Estamos lo suficientemente preparados para poder seguir explotando los recursos naturales de nuestro entorno sin tener alguna consideración de las afectaciones que provocamos? Todos los seres que convivimos en el ambiente estamos estrechamente unidos por el mismo, ya que residimos en él y gracias a los beneficios que obtenemos del mismo podemos vivir y coexistir. El cuidado y la preservación del espacio en que habitamos debería ser razón suficiente para poder empezar a tener una consideración en el impacto que provocamos por las actividades que realizamos en el medio.

Diferentes tipos de industrias han trascendido en nuestra sociedad durante siglos. La minería es una actividad que ha llegado a tener una historia muy larga y diversificada. Es tal su importancia a nivel mundial que se podría decir que es una de las actividades más significativas. Un ejemplo de esto es el hecho de que diversas industrias se alimentan de los recursos generados de la minería, ya que son empleados como materia prima básica para la fabricación de una gran variedad de productos industriales para que puedan estar al alcance de nuestras manos.

En el mundo, la minería genera una gran cantidad de recursos para poder satisfacer la creciente demanda mundial de materiales. Siendo esta actividad uno de los grandes motores que pueden impulsar a un país, tal es el caso de países como Mongolia, Madagascar, Uganda y los países en desarrollo; mientras que en otros es un pilar del fortalecimiento del mismo, como es el caso de países como Estados Unidos, Australia y China (AIMMGM, 2015).

La minería en México representa una historia valiosa y rica, debido a que es una de las actividades económicas más importantes de nuestro país, y ha demostrado ser una actividad sustentable. Durante la colonia española, la minería fue la principal actividad económica y fue uno de los factores más relevantes durante la conquista, siendo el oro y la plata los principales productos que se enviaban de México a España. En ese entonces, cualquiera podía echar a andar una mina, siempre y cuando entregase la quinta parte de sus ganancias a la corona española. Esto fue un incentivo para la exploración y colonización de nuevos territorios. Las principales minas de Nueva España fueron ubicadas en los estados de Zacatecas (1546), Pachuca (1552), Guanajuato (1554) y San Luis Potosí (1592) (AIMMGM, 2015).

En México la minería ha sido una actividad que ha constituido la base económica para importantes localidades en los estados de Hidalgo, Guanajuato, Zacatecas, Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y San Luis Potosí, por mencionar algunos (Santos *et al.*, 2010). El sector minero-metalúrgico en México contribuye con el 4% del PIB (Economía, 2020).

La minería se conoce como una actividad primaria, ya que los minerales que se extraen son directamente de la tierra, sin tener un proceso intervenido por el hombre. De igual forma, la minería incluye una serie de actividades durante todo su proceso, donde encontramos el descubrimiento y la exploración del yacimiento, la explotación del mismo, el beneficio (i.e., la extracción de los minerales), la transformación y finalmente el cierre de la mina. Los recursos naturales se encuentran en diferentes formas, y éstos se pueden presentar en estado sólido, líquido, quebradizo y gaseoso. Se presentan en lugares denominados yacimientos, los cuales se pueden encontrar expuestos en la superficie de la tierra, ocultos debajo de la superficie, o en el subsuelo a diferentes profundidades. Es por ello que la minería se divide en cuatro tipos, que dependen de la forma y características del yacimiento: minas a cielo abierto o minería superficial (que son excavaciones en la superficie del terreno), minas subterráneas (que se componen de galerías o túneles por debajo de la superficie terrestre), por pozos de perforación en el subsuelo, y por último la minería submarina o por dragado (que se encuentra por debajo de lagos o mares) (AIMMGM, 2015).

Para la presente investigación son de suma importancia los dos primeros tipos (AIMMGM, 2015):

- *Minería Superficial*: La mayoría de las minas de todo el mundo suelen ser de este tipo, aproximadamente un 60% emplea este método. Consiste en retirar la cobertura superficial para obtener acceso a los yacimientos. Entre los factores más importantes para la extracción están los climas extremos que se pueden presentar, donde se encuentran zonas frías y calurosas que podrían llegar a hacer más difícil la operación. Entre los factores naturales y geológicos más importantes de la exploración se mencionan la topografía, la profundidad del yacimiento, características espaciales del yacimiento y la presencia del agua. Por otro lado, existen diferentes tipos de minas superficiales, por ejemplo, minas a cielo abierto (metales y carbón), canteras (para materiales de construcción) y minas de placer (para metales pesados). En la Figura 1-1 se puede apreciar el dimensionamiento de una mina a cielo abierto.
- *Minería Subterránea*: Es aquella que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno. El uso de este método es debido a que su extracción a cielo abierto no es posible por motivos económicos, sociales o ambientales. Se realiza por medio del uso de túneles que permiten llegar al yacimiento. Este tipo de minería depende principalmente del tipo de roca en el que se trabaja, ya sea roca blanda o roca dura, la diferencia radica principalmente en el uso de explosivos para poder facilitar su proceso de extracción. En la Figura 1-2 se puede apreciar un viejo túnel de una mina de Hierro.



Figura 1-1 Mina a cielo abierto (Arriaga, 2019).



Figura 1-2 Interior de la mina de Hierro Orconera III, Vizcaya, España (Urdangaray, 2020).

Para el beneficio de los minerales que se encuentran en los yacimientos, la industria minera cuenta con diversos métodos de procesos metalúrgicos, entre los cuales resaltan las principales actividades para el aprovechamiento del producto de beneficio, tal como, la reducción del tamaño del material obtenido de la explotación del yacimiento, para posteriormente ser concentrado y obtener el elemento mineral de beneficio, además de los residuos producidos, los cuales pueden encontrarse en estados líquido y sólido.

1.1 Procesos mineros

Dentro de los procesos metalúrgicos, encontramos dos actividades principales, la concentración (i.e., separar el metal o mineral de interés del resto de material residual que lo acompaña) y el refinado (consiste en obtener el metal en estado puro o casi puro).

El procedimiento de la obtención del mineral de beneficio tiene un proceso secuencial, posterior a la explotación y obtención del material de un yacimiento. En la Figura 1-3 de manera general se presenta una cadena de procesos para la obtención del mineral (Sanabria, 2018; AIMMGM, 2015), donde encontramos:

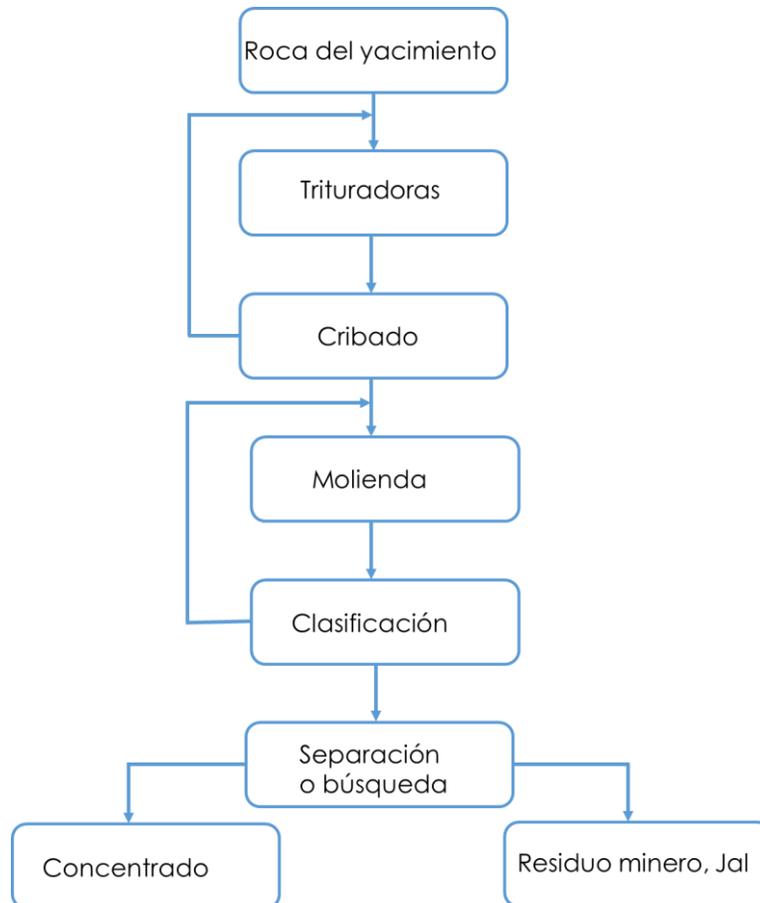


Figura 1-3 Proceso de la obtención del mineral de beneficio (Fell *et al.*, 2005).

- *Trituración*: En donde se reduce gradualmente el tamaño de los trozos de roca provenientes de la explotación del yacimiento.
- *Cribado*: Es el proceso mecánico que realiza la separación de partículas por tamaño y su aceptación o rechazo por una superficie tamizada.
- *Molienda*: El mineral se reduce en molinos de bolas o barras hasta tamaños de partículas de polvo. Se realiza en un ambiente seco o húmedo. El material contiene partículas del mineral y residuos mineros.
- *Clasificación*: Es la separación de partículas sólidas en dos o más productos, de acuerdo con sus velocidades, en donde depende de su tamaño, densidad y forma, es especialmente para minerales que se consideran demasiado finos para separarlos por cribado. Se da principalmente en estado húmedo, utilizando el agua como medio de fluido, o seco utilizando al aire como medio.

- *Concentración*: Es la separación del mineral, metal o no metal del material sin valor.

1.2 Residuos mineros

Los residuos generados durante todas las etapas del proceso, desde la extracción hasta el de beneficio van tomando diferentes nombres, y esto se debe principalmente a sus características (e.g., tamaño, la composición física y química, y el contenido de agua en los procesos de producción utilizados).

La minería implica la extracción de grandes cantidades de material de la tierra, del cual sólo se recuperan pequeñas cantidades del mineral deseado. Por ejemplo, 1 g/t (un gramo por tonelada) de oro, significa que por cada gramo de oro se extrae una tonelada de roca (AIMMGM, 2015). El producto del proceso minero da como resultado dos materiales esencialmente, en donde encontramos el material puro de beneficio (i.e., elementos químicos, minerales metálicos y no metálicos) y el material de residuo minero (denominado en México como jales). Las características del residuo obtenido, aunado a las características del mineral y en combinación con el tren de tratamiento utilizado, determinan las propiedades físicas de los mismos (e.g., la distribución granulométrica de partículas). Como consecuencia de ello, generalmente consisten en partículas de tamaño de arenas, limos y arcilla, sin minerales de arcilla. Los jales siendo también un residuo obtenido y por poseer un valor económico nulo, no son requeridos y por ello es necesario hacer disposición de ellos a un sitio seguro. Cabe recalcar que los residuos mineros sólidos son materiales geológicos heterogéneos que pueden consistir de rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas, al igual que de suelos y sedimentos sueltos, dependiendo del tipo de yacimiento.

Por otro lado, como ya se mencionó, la minería es una actividad que se caracteriza por su alto volumen de generación de residuos, sin embargo pocos son tóxicos y podrían significar riesgos en la salud de la sociedad y generar un impacto al medio ambiente, de no ser manejados de la manera adecuada (SEMARNAT, 2009).

A continuación se presentan los tipos de residuos generados por una explotación minera, los cuales se pueden presentar en estado sólido o líquidos, según el tipo de extracción y tratamiento para obtener el mineral de beneficio (Sanabria, 2018).

- Roca de desecho de mina (tepetate de mina): Para poder tener acceso al mineral se extraen rocas no mineralizadas y rocas que contienen mineralización. La que no tiene mineral se convierte en Tepetate y hay que almacenarla de manera segura.
- Residuos metalúrgicos (escorias): Son los residuos obtenidos de los procesos de lixiviado o fundido que se consideran sin valor. Estos residuos pueden ser la escoria, la ceniza, el polvo.

- Colas y jales: Es el residuo producto del remanente después de que los minerales se han extraído del mineral mediante técnicas físicas o químicas. Los sólidos pueden subdividirse en tamaños de partícula, generalmente en el rango de arena fina y limos.

Cabe aclarar que dichos residuos no son los únicos existentes, además, cada uno de los diferentes residuos generados dependerán del proceso minero-metalúrgico utilizado para su desarrollo.

1.3 Almacenamiento de los residuos mineros

Los depósitos de residuos mineros pueden clasificarse según el tipo de almacenamiento que se utilice para su contención. Los tipos de almacenamiento pueden ser:

- Almacenamiento superficial: como vertederos (rocas de desecho).
- Almacenamiento acuático.
- Almacenamiento de minas a cielo abierto o subterráneo, depósitos de jales.

El almacenamiento de tipo superficial son los métodos más versátiles y económicos para disponer de los residuos en la mayoría de operaciones mineras. Los vertederos (Figura 1-4) son depósitos que almacenan materiales de desecho o material mineralizado de bajo grado que no es económico procesar y se dispone mecánicamente en estado húmedo o semiseco, con o sin alguna forma de compactación. Además, el método de disposición puede ser por medio de transporte, apilamiento o lanzamiento. Es importante aclarar que la configuración de los vertederos es dependiente de la topografía, en el caso de contar con superficies planas la configuración apilada se presenta apropiada, mientras que, en terrenos montañosos es aplicable los vertederos tipo ladera o de valle (Sanabria, 2018).

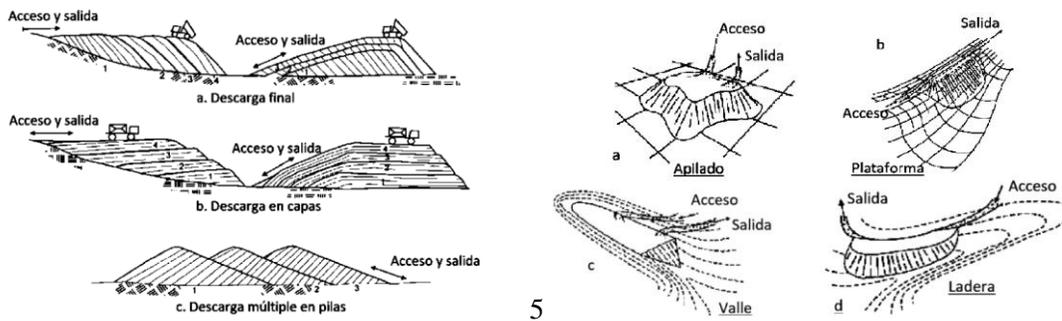


Figura 1-4 Tipos de formas de almacenamiento en vertederos y tipos de vertederos de residuos definidos por la topografía (Sanabria, 2018).

Para el caso del almacenamiento acuático (Figura 1-5), éste se refiere a la descarga de residuos mineros al océano a través de un punto de descarga diseñado adecuadamente a una cierta profundidad y ubicación. Son ideales para

minimizar los impactos ambientales, tales como la turbidez y su efecto sobre los peces (Sanabria, 2018). Aunque no es una forma de almacenamiento aceptada en México, ni en muchos otros países.

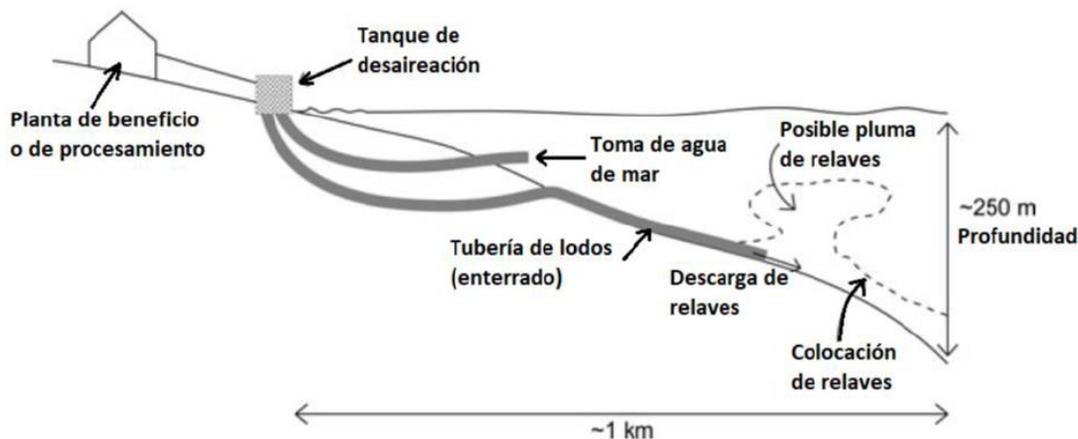


Figura 1-5 Esquema de la sección transversal de la disposición de residuos mineros en aguas profundas (Sanabria, 2018).

Para esta investigación, el almacenamiento a cielo abierto y la mina subterránea es el sitio de estudio más importante que presentamos. La importancia de este tipo de almacenamiento es que es posible retomar prácticamente la mitad y hasta dos tercios de los residuos mineros producidos. El método es sumamente beneficioso puesto que la disposición consiste en descargar los residuos mineros de trabajos de excavación de la mina a cielo abierto o subterránea a un bajo costo. Sin embargo, una de las grandes problemáticas de dicho método económico es la repercusión al ambiente, ya que puede provocar múltiples problemas de contaminación (e.g., problemas de filtración del suelo, posible contaminación de acuíferos o fuentes de agua, entre otros).

1.4 Diseño de depósitos mineros

Los almacenamientos de residuos mineros, para el caso de depósitos de jales utilizados para minas a cielo abierto o subterráneas normalmente se construían y operaban simultáneamente sin un proyecto definido, siguiendo las prácticas que se iban transmitiendo por generaciones en cada empresa minera y en algunos casos se presentaban derrames involuntarios que rápidamente conducían a la falla total o parcial de las cortinas, presentándose de manera rutinaria la pérdida o descarga de jales a los arroyos o ríos en temporada de lluvias (Orozco, 2010).

Debido a estas y otras razones es que los residuos mineros se deben resguardar en depósitos diseñados para almacenarlos de manera adecuada y cumpliendo con los requerimientos mínimos necesarios propuestos en normas establecidas (e.g., NOM-141-SEMARNAT-2003), para que no afecten al medio que lo rodea.

Uno de los objetivos principales del diseño es lograr un depósito seguro y estable. Es importante recalcar que varios países han propuesto y desarrollado guías o manuales para el adecuado manejo, control y disposición de los

residuos mineros, tal es el caso de Chile (Decreto supremo N° 248, 2007), Sudáfrica (National Environmental Management, 2008) y Perú (Decreto Supremo que reglamenta la ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, 2004), por mencionar algunos (Pérez, 2019).

La importancia de las presas de jales (“tailings dams”, comúnmente conocidas a nivel mundial, presa de “colas” en el proceso minero; o “presa de relaves” en la industria sudamericana) radica principalmente en el resguardo de los residuos mineros sólidos, y además el agua que se emplea para ayudar en su transporte (Orozco, 2010). En México la industria minera es de suma importancia, por ello se asume que los depósitos de residuos mineros van de la mano. En México existen múltiples presas de jales que han perdurado décadas, y dentro de las cuales también han existido problemas de fallas, como fueron los casos de La Negra (Querétaro, 1997), Las Torres (Guanajuato, 1993), Cuale (Jalisco, 1993), Peña colorada (Colima 1995), El Monte (Hidalgo, 1992), Bacis (Durango, 1996), Villa de la Paz (SLP, 1997), Bolañitos (Guanajuato, 2000). Un caso histórico es aquel ocurrido en los cedros Michoacán en 1937, donde lamentablemente se perdieron más de 300 vidas humanas por una falla en un depósito minero (Santos, 2012; Pérez, 2019).

Como se mencionó anteriormente, la existencia de las presas de jales en México ha tenido una longevidad bastante amplia, pero no existía una reglamentación que rigiera la construcción y operación de los mismo hasta el 13 de septiembre de 2004 que se publicó en México la Norma Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003, en donde se señalan los estudios que deben realizar las empresas mineras para el manejo y depósito de jales en forma segura. Los jales mineros por sus características físico-químicas, su composición y forma pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población, por lo cual es necesario establecer los criterios y procedimientos para su correcta disposición. La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones para la caracterización del jal, la caracterización y preparación del sitio, así como los criterios de mitigación de los impactos ambientales por el cambio de uso de suelo. Por otro lado, también señala las especificaciones y los criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de las presas de jales. Esta norma está obligada para los generadores de jales provenientes del beneficio de minerales metálicos y no metálicos, exceptuando a los jales peligrosos o materiales radiactivos, los cuales son abordados por la Norma-052-SEMARNAT-2003.

La importancia de la Norma NOM-141-SEMARNAT-2003 radica principalmente en la caracterización del jal y del sitio en donde para esta última es de suma importancia revisar aspectos climáticos, edafológicos, geotécnicos del sitio (i.e. estructuras geológicas, mecánica de rocas, región sísmica, estratigrafía del sitio, parámetros de resistencia y permeabilidad, hidrológicos, biodiversidad y ecosistemas frágiles o únicos, además del potencial de daño) (SEMARNAT, 2003).

Una vez definido el proyecto de un nuevo depósito de jales, es importante considerar ciertos factores que indica la NOM-141, por ejemplo: la estimación del volumen de almacenamiento, sección de la cortina contenedora (la cual deberá cumplir con los análisis de estabilidad), la cortina de la presa de jales que se deberá formar por suelos y materiales definidos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y el sistema de recuperación de agua para utilizarla nuevamente en el proceso.

Por otro lado, dentro de la norma es posible notar que faltan especificaciones dentro de los criterios de caracterización de sitio, tal es el caso de los parámetros mecánicos que se deben obtener del sitio, ya que no se especifica la profundidad o ubicación adecuada en donde se deben realizar sondeos para obtener muestras inalteradas de suelo o roca para la obtención de la información necesaria en laboratorio. En el caso de la permeabilidad, dentro de la norma se pueden encontrar esquemas de diferentes tipos de depósitos en los cuales se puede observar que la permeabilidad tiene variaciones, como lo puede ser una cortina drenante y además puede observarse un sistema drenante para la reutilización del agua. Sin embargo, al igual que los parámetros mecánicos, la norma no hace ninguna especificación de la obtención de los valores de permeabilidad. Es entonces, que la norma deja a criterio del diseñador definir el tipo, ubicación y cantidad de ensayos para la construcción o ampliación de un depósito de jales, lo cual dependerá de la geometría del depósito y de las condiciones operativas del mismo.

De manera más estricta, en la norma se especifica que para el análisis de estabilidad de la cortina del depósito de jales se deberán realizar análisis estáticos y sísmicos, en donde se usen métodos convencionales como equilibrio límite (estático, pseudo estático y post licuación) o elemento finito. En donde para hacer uso de dichos métodos, es necesario obtener los parámetros mecánicos del suelo y las características del depósito a diseñar o a revisar.

Volviendo a los depósitos de jales, estas son de las pocas obras ingenieriles que se construyen y operan simultáneamente. La seguridad es el objetivo número uno dentro de las propiedades de la obra, además de otras propiedades fundamentales que se indican posteriormente para la cortina (e.g., la resistencia a la licuación, la tubificación, el deslizamiento de taludes, la erosión y al derramamiento por descuido) (Orozco, 2010).

1.5 Métodos de construcción de los depósitos de residuos mineros

Las presas de jales (Figura 1-6) son obras de ingeniería muy importantes, incluso algunas de ellas se ubican entre las más grandes del mundo, pueden superar los 150 m de altura y volúmenes de almacenamiento superiores a los 50 millones de metros cúbicos y ocupar áreas de hasta 100 km². De acuerdo con la norma oficial mexicana, NOM 141-SEMARNAT-2003, los principales tipos de almacenamiento de jales son el método aguas arriba, método aguas abajo, línea central y la presa convencional, la diferencia principal entre estos tipos de

almacenamiento radica en su proceso constructivo, en la Figura 1-7 se muestra un corte esquemático de dichos depósitos. A continuación se presenta una breve descripción estos métodos de almacenamiento (Fernandez & López, 2016):

- *Método aguas arriba:* el dique de arranque es un terraplén o bordo iniciador, se construye en algunos casos con roca de desecho permeable para permitir el drenaje. Es el método más antiguo, común y simple de construcción, fue el método más empleado en el siglo XX, pero debido a problemas de inestabilidad, comparado con los otros tipos de depósitos, no es muy utilizado en la actualidad. Se usa cuando el riesgo de sismo es muy bajo, los bordos no van a ser muy altos y para áreas muy secas. Consiste en la disposición del material sobre la corona y la playa de jales depositados, en donde se va colocando el residuo minero hacia aguas arriba para formar la cortina. Este método es el más económico, pero diversos antecedentes de fallas indican que es muy susceptible a licuación ante sismos y desbordamientos. Este tipo de método ya no es muy común actualmente, siendo que países como Chile han prohibido su construcción.
- *Método aguas abajo:* Es un método con un alto índice de estabilidad, se utiliza en regiones con alta actividad sísmica. Su método constructivo consta de inicialmente construir un bordo iniciador, sobre el cual se descarga el jal, pero con dirección hacia aguas abajo formando el relleno y es entonces que se va elevando conforme se va requiriendo un mayor volumen de almacenamiento; además, se debe contar con filtros y drenes adecuados para su ejecución.
- *Método de eje central:* Este método es una variación del método de aguas arriba, ya que la presa se levanta verticalmente con la línea central de incremento coincidiendo con el aumento de la altura de la presa.
- *Presa convencional:* Este método es el más costoso de todos los mencionados ya que se construye con material ajeno al depósito y de sección graduada. No es muy común.



Figura 1-6 Presa de Jales con el método “aguas arriba” (Flores, 2019).

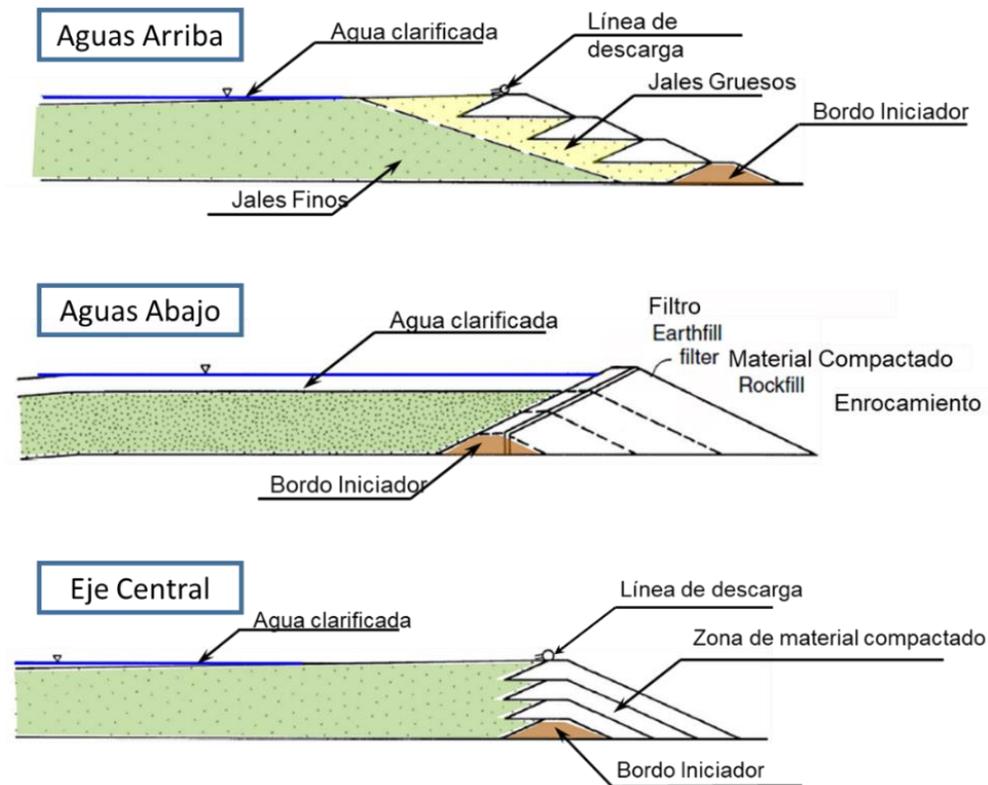


Figura 1-7 Corte esquemático de Depósito de Jales (Flores, 2019).

Los elementos principales que constituyen a un depósito de jales son los siguientes (Orozco, 2010; Briseño, 2010):

- *Cortina contenedora*: debe ser una estructura resistente que delimite y soporte el empuje de los jales y el agua almacenada, deberá ser permeable y resistente a la erosión, tubificación, licuación y a los deslizamientos de talud. El estanque de agua, tiene que estar alejado lo más posible de la corona de la cortina, de tal manera que tenga una playa amplia y asegure estabilidad a la cortina. La norma oficial mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003, establece que, en el caso de presa de jales, la cortina se deberá formar por suelos y materiales definidos utilizando el SUCS o con fragmentos de roca. Además, aclara que el uso de jales como material de construcción de cortina solo podrá utilizarse cuando por lo menos el 15% de su contenido lo constituyan arenas mayores a $76 \mu\text{m}$ y su contenido de sólidos sea igual o mayor a 50%.
- *Vaso de almacenamiento*: es el elemento de la presa de jales que tiene el volumen disponible para almacenar los jales y el agua empleada para su transporte, además debe considerar el volumen de agua para el manejo de las aguas pluviales que caen dentro de la presa. Dicho elemento debe contar con el área suficiente para permitir la clarificación del agua contenida en los jales y facilitar su extracción ya

clarificada, también debe mantener una capacidad suficiente la cual mantenga un bordo libre mínimo dependiendo del tipo de zona.

- *Sistema decantador drenante*: su función principal es la captación del agua de los jales proveniente de su transporte al depósito y de la misma forma enviarla a la pileta de recuperación para su reutilización en el proceso de beneficio. Además, funciona como un vertedor de excedencias adicional, el cual desaloja el agua que no puede retenerse en el depósito.
- *Vertedor de excedencias*: tiene como propósito proveer un medio de control de los escurrimientos normales y extremos hasta su desalojo, considerando la seguridad en el desalojo de la tormenta de diseño del depósito.

1.6 Tipos de descarga y disposición de Jales

El residuo minero es un material heterogéneo sin valor económico, además de no tener un reuso significativo. Como se ha explicado al largo de este trabajo, el método de disposición de jales es un factor importante en los procesos metalúrgicos, donde el residuo al salir del proceso de concentración deja de ser útil. Es por ello que existen diversos métodos de descarga y disposición de jales, en donde la diferencia de éstos últimos radica principalmente en su función, facilidad de transporte y su costo.

Para entender el comportamiento de un depósito es importante saber cuál es el método de disposición de jales, los cuales dependen principalmente del contenido de agua que tengan para su transporte. A continuación, se describirán los tipos de descarga y disposición haciendo relevante sus características más importantes, y en la Figura 1-10 se pueden observar los medios de disposición en campo:

Para el caso de los tipos de descarga se tiene principalmente:

- *Un solo punto de descarga*: La descarga de jales por este método ofrece poca flexibilidad en el manejo de los jales, lo cual es indeseable. Su descarga se realiza desde el extremo abierto de una tubería (Figura 1-8a), la ubicación de la línea de descarga está situada por encima de la corona de la cortina y se emplea a menudo en los métodos de construcción de aguas arriba y línea central. Este método no es adecuado cuando el estanque de agua debe mantenerse alejado de la cortina. Además, el punto de descarga se debe mover periódicamente para evitar secciones desiguales en la presa (Fell *et. al.*, 2005).
- *Espigoteo*: Facilita la distribución uniforme de los jales y fomenta la desecación de los mismos por medio de una sedimentación homogénea, para un almacenamiento de jales en pulpa o espesado. Su descarga es a partir de la corona de la cortina para presas de aguas arriba y línea central, por medio de la descarga de jales a través de pequeñas tuberías (espigas) que dan origen a múltiples puntos (Figura 1-8b), en intervalos

igualmente espaciados. Este método brinda playas medianamente uniformes, además de que la forma con muy poca profundidad, donde la fracción más gruesa se asienta cerca del punto de descarga y la fracción más fina se deposita paulatinamente lejos de estos puntos. Como resultado de ello, el peso volumétrico, la resistencia al corte y la permeabilidad disminuyen al aumentar la distancia desde el punto de descarga hacia puntos más alejados (Bernal & Flores, 2016).

- *Cicloneo*: Cuando las presas de jales deben construirse con jales mediante los métodos de aguas arriba y línea central, es común separar la fracción gruesa de la fina, “limos”, mediante el uso de ciclones, con el fin de usarlos para construir la presa, lo cual también permite reducir el volumen de residuos depositados en el almacenamiento. Los ciclones separan las partículas más gruesas de los finos por medio de fuerza centrífuga. Los jales en suspensión entran al ciclón y la fracción más fina sube a la salida superior, mientras que las partículas gruesas descienden a través de la sección cónica conocida como flujo inferior (Figura 1-9). Al ser equipos de disposición, su efectividad depende de varios factores como el tamaño de la partícula, la gravedad, el tamaño del ciclón y la presión, entre otros (Bernal & Flores, 2016).

Para el caso de los tipos de disposición se tiene principalmente:

- *Jales en pulpa*: Método convencional debido a su flexibilidad y menores costos de operación, en donde se presentan contenidos de agua mayores al 70%, y de un 30 a 40% de sólidos, comúnmente son descargados por medio de un solo punto de descarga o por espigoteo.
- *Jales espesados*: Método que cuenta con la particularidad de depositar jales con contenidos de agua entre 35 y 70%, con un contenido de sólidos del 60 a 70%.
- *Jales en pasta*: Presentan una conservación de agua eficiente y, además utilizan requisitos mínimos de contención; saturación cercana al 100%, con un contenido de agua entre el 25 y 35% y un contenido de sólidos del 70 al 75%, también permiten un depósito de jal estable (Flores, 2019).
- *Jal filtrado*: El uso de este método es poco común, pero cubre ciertas ventajas en comparación a los otros, ya que presenta un menor consumo de agua y menor espacio de almacenamiento en comparación con los métodos convencionales, además de ser considerados parcialmente saturados (Gw entre 70-80%), presenta contenidos de agua menores al 16%. Presenta un mejor factor de seguridad, pero el costo es más elevado en comparación a métodos convencionales. Esta metodología somete al jal a un proceso de expulsión de agua por medio de prensas o un sistema de vacío. Son depositados por medio de transporte, bandas o camiones y, posteriormente, se colocan, extienden y compactan formando jales parcialmente saturados con una alta compacidad pudiendo formar depósitos estables (Bernal & Flores, 2016).

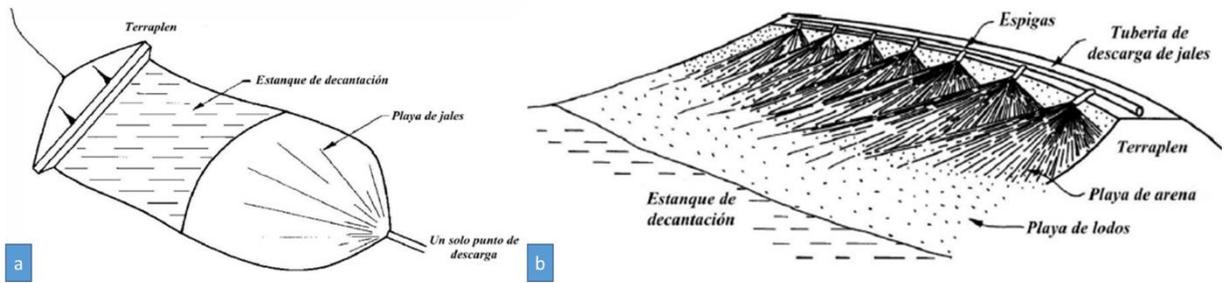


Figura 1-8 Métodos de disposición. a) Un solo punto de descarga y b) Espigoteo (Bernal, 2016).

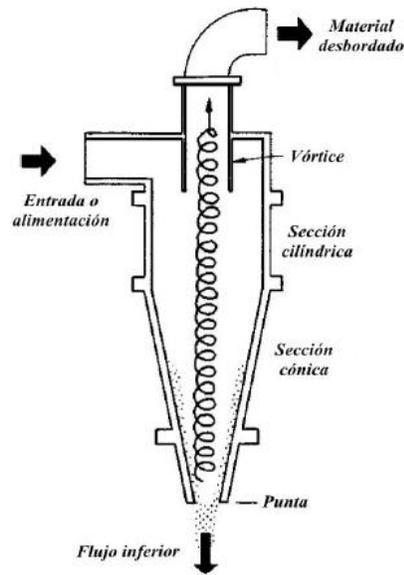


Figura 1-9 Diagrama de ciclón (Bernal, 2016)



Figura 1-10 Medios de disposición final. a) espigoteo., b) cicloneo, c) jal en pasta y d) jal filtrado (Flores, 2019).

1.7 Modos de falla en depósitos mineros

Los jales son suelos de comportamiento visco-elástico muy complejo y de alta susceptibilidad a fenómenos como la erosión pluvial, la tubificación y la licuación estática o cíclica (Orozco, 2010).

Los inadecuados diseños, malas prácticas constructivas de operación y de cierre son algunas de las causas principales de un mal comportamiento y fallas en los depósitos mineros. Los modos de falla más comunes que se registraron corresponden a fallas por licuación, falla en el suelo de cimentación, excesivos niveles de agua y filtración excesiva. Adicional a las fallas mencionadas, el factor humano contribuye también en la falta de planeación, estrategia, observación, supervisión y además la falta de conocimiento del comportamiento de los residuos (Sanabria, 2018).

De realizar un análisis estadístico de fallas de los principales accidentes mineros, sobresalen a nivel internacional y nacional las deficiencias en la ingeniería. Las fallas en los depósitos de jales pueden ocasionar la interrupción generalizada de la producción, pérdidas humanas, daños a los ecosistemas, así como consecuencias económicas y legales. Solo en México hay registros sobre fallas ocurridas en depósitos de jales con pérdidas humanas de hasta

300 personas, y a nivel internacional se encontró que en China, por la falla de un depósito, se perdieron al menos 254 vidas humanas que murieron como consecuencia del colapso de un depósito de jales en el 2008 (Briseño, 2010).

Las principales fallas se describen a continuación (Ramírez, 2001; Bernal, 2016):

- *Licuación cíclica*: es la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante causada por un incremento repentino pero temporal de la presión de poro cuando es sometido a sollicitaciones sísmicas o vibraciones cercanas. Los materiales sueltos, saturados y con partículas del tamaño de arenas están sujetas a licuación; los jales, debido a su método de almacenamiento generalmente suelto y a su naturaleza no cohesiva, frecuentemente son propensos a licuación.
- *Licuación estática*: Cuando el suelo se encuentra en un estado muy suelto, los aumentos de presión de poro pueden anular a los esfuerzos efectivos, pues el material pierde toda su capacidad para resistir esfuerzos cortantes y se comporta como un fluido.
- *Falla del suelo de cimentación*: Si la sollicitación de cargas es mayor que la que puede proporcionar, y la cimentación no puede soportar el peso del depósito, se generan planos de fallas. La debilidad de los estratos y las altas presiones de agua debajo de la base de una presa pueden provocar fallas por cortante en la cimentación.
- *Deslizamiento del talud*: cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones próximas a su frontera se deslicen hacia abajo; el fenómeno es más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe.
- *Excesivos niveles de agua*: ocurre cuando el nivel del estanque rebasa el nivel de la cortina y el agua fluye por encima del mismo. El material por lo general se erosiona y forma una línea de flujo cuyo tamaño dependerá del volumen del derrame y de qué tan erosionable sea el material. Además, dependiendo de las sollicitaciones externas cerca de la zona del depósito, pueden provocar el desbordamiento de la cortina o la ruptura de la misma, aparte de la inadecuada operación y planeación ante el ingreso de agua no controlado.
- *Tubificación*: cuando el drenaje en la base de la cortina es insuficiente, el agua de infiltración sale en la base de la cortina creando una zona húmeda y débil provocando erosión, lo que conduce a la falla de la cortina; generando el movimiento de partículas de jales como resultado de fuerzas no equilibradas de infiltración que da por resultado líneas de flujo de erosión. El flujo de la infiltración se concentra en una vía preferencial que produce la erosión interna y la formación de tubos o túneles que pueden originar la destrucción de la cortina.

Algunos ejemplos de desastres ocurridos en presas y sus fallas se presentan a continuación:

- *Samarco, Brasil.* El método de construcción utilizado en este depósito fue aguas arriba, alcanzando una altura de 110 m antes de su falla en 2015. La falla de dicho depósito fue por deslizamiento, provocada por la licuación en la zona de aguas arriba del depósito (Figura 1-11a). El depósito en 2010 presentó fallas por filtración, lo cual generó erosión al pie de la cortina (Figura 1-11b).

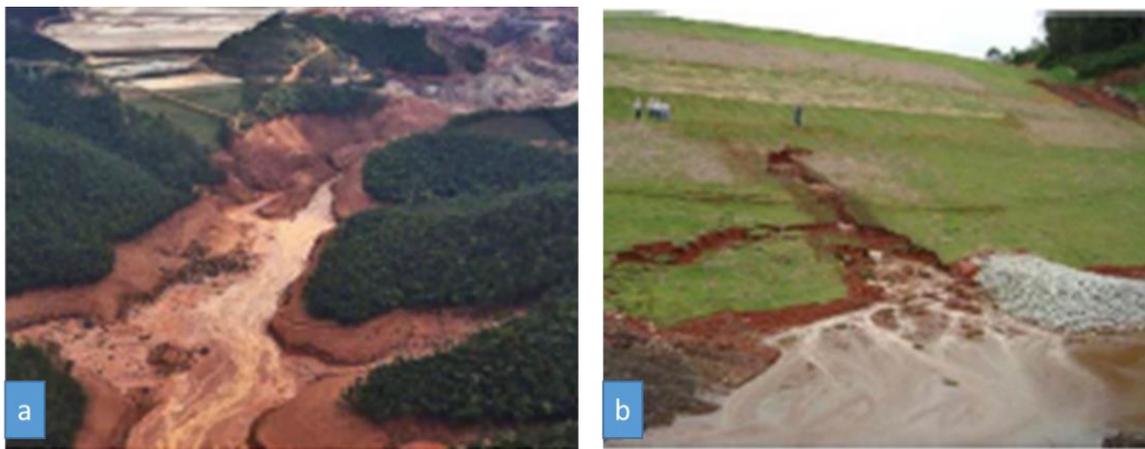


Figura 1-11 Desborde de Presa Samarco. a) Posterior a la falla y b) Erosión al pie de la cortina (Sanabria, 2018).

- A nivel mundial se han registrado derrames de jales en depósitos de operación, los cuales se ocasionaron por una conjunción de fenómenos naturales extraordinarios y fallas en los propios depósitos. Algunos de los casos recientes que destacan por la magnitud de afectación ambiental son (Santos, 2012): Merriespruit (Sudáfrica, 1994), Omai (Guyana 1995), Marcopper (Filipinas, 1996), Baja Mare (Rumania, 2000), Cerro Negro (Chile, 2003) Pinchi Lake (Canadá, 2004), Bangs Lake (EUA, 2005), Nchanga (Zambia, 2006), Huayan (China, 2009), Kolontar (Hungria, 2010). En México se han presentado diversos tipos de fallas o accidentes ocurridas en: La Negra (Querétaro, 1987, 1996 y 1997), Las Torres (Guanajuato, 1988 y 1993), Cuale (Jalisco, 1993), Peña colorada (Colima 1995), El Monte (Hidalgo, 1992), Bacis (Durango, 1996), Villa de la Paz (SLP, 1997), Bolañitos (Guanajuato, 2000), Rey de Plata (Guerrero, 2001) y Molango (Hidalgo, 2003). En la Tabla 1-1 se muestra información sobre las muertes lamentablemente provocadas por la falla de depósitos de minas alrededor del mundo, en donde se puede observar cual fue la cantidad de material desbordado, el año y país (Pérez, 2019).

Tabla 1-1 Número de muertes debido a la falla de depósitos de jales alrededor del mundo (Pérez, 2019).

Numero	MINAS	PAIS	AÑO	TONELADAS	MUERTES	MINERAL
1	Los Cedros, Tlalpujahua, Michoacán, México	MEXICO	1937	10,000,000	300	Au Ag
2	Huogudu, Yunnan Tin Group Co., Yunnan	CHINA	1962	3,300,000	171	Sn
3	American Cyanamid, Florida	USA	1962	11,356,230		Gypsum
4	El Cobre Old Dam	CHILE	1965	1,900,000	200	Cu
5	Mir mine, Sgorigrad, Bulgaria	BULGARIA	1966	450,000	488	Pb Zn
6	Aberfan, South Wales Colliery	REINO UNIDO	1966	162,000	144	Coal
7	Mufulira, Zambia (Roan Consolidated Mines)	ZAMBIA	1970	68,000	89	Cu
8	Cities Service, Fort Meade, Florida, phosphate	USA	1971	9,000,000		P
9	Certej gold mine, Romania	ROMANIA	1971	300,000	89	Au
10	Buffalo Creek, West Virginia, USA (Pittson Coal Co.)	USA	1972	500,000	125	Coal
11	Bafokeng, South Africa, Morensky Tailings dam	SUDAFRICA	1974	13,000,000	12	Pt
12	Sipalay, Philippines, No.3 Tailings Pond (Maricalum Mining Corp)	FILIPINAS	1982	11,618,257		Cu
13	Prestavel Mine - Stava, North Italy, 2, 3 (Prealpi Mineraria)	ITALIA	1985	200,000	269	F
14	Tubu, Benquet, No.2 Tailings Pond, Luzon, Philippines - Padcal (Philex)	FILIPINAS	1992	32,243,000		Cu
15	Los Frailes, near Seville, Spain (Boliden Ltd.)	ESPAÑA	1998	6,800,000		Pb Zn
16	Lixi Tailings Dam (Tahsan Mining Co.)	CHINA	2008	268,000	254	Fe
17	Padcal No 3, Benquet Philippines (Philex)	FILIPINAS	2012	13,000,000		Au Cu
18	Imperial Metals, Mt Polley, British Columbia, Canada	CANADA	2014	23,600,000		Cu Au
19	Fundao-Santarem samarco (bhp/vale)	BRAZIL	2015	45,000,000		19 Fe
20	Hpakant, Kachin state, Myanmar	MYANMAR	2015		113	Jade
	TOTAL			182,765,487	2,273	

2 MARCO TEÓRICO

En la historia de la geotecnia el uso de equipos que reproducen las condiciones en las que se encuentra el suelo en campo son de suma importancia para su desarrollo, en donde por medio de ellos se ha podido investigar y desarrollar gran parte de la teoría de la ingeniería geotécnica. En la mayoría de los suelos, hablando de casos en campo, se considera que ocurren deformaciones laterales como verticales en los suelos, y que además se tiene un flujo de agua tanto vertical como lateral. Por lo tanto, las pruebas triaxiales, en el aspecto de la evaluación de las relaciones esfuerzo-deformación, no son suficientes y además es indispensable conocer las condiciones de presión de poro y presiones laterales que puedan provocar variaciones del suelo al momento de la falla. Las relaciones esfuerzo-deformación en los suelos son muy complejas para representarlas únicamente por constantes (e.g., el módulo de elasticidad y relaciones como el módulo de Poisson). Las curvas esfuerzo-deformación comúnmente no presentan un comportamiento lineal y no son independientes de la historia de los esfuerzos. En las pruebas triaxiales las resistencias máximas de los materiales y la configuración de las curvas dependen de la presión lateral ejercida, ya que en los suelos reales existen presiones laterales realizadas por la sobrecarga y otras cargas soportadas por el suelo, frecuentemente es necesario considerar esta condición, además de la presión ejercida por los suelos a una cierta profundidad.

Cuando el suelo se somete a pruebas triaxiales se producen esfuerzos cortantes en la muestra por la aplicación de un esfuerzo axial de compresión, por lo cual las partículas tendrán una reacción ante este esfuerzo, un reacomodo, y presentaran una tendencia a resbalar entre sí conforme aumente el esfuerzo axial aplicado, si dicho esfuerzo es lo suficientemente grande para provocar una gran deformación en el suelo esto provocará que el suelo falle por corte. Es por ello que conocer las características de falla por esfuerzo cortante es un requisito indispensable en el diseño geotécnico de cualquier proyecto.

2.1 Curvas esfuerzo deformación

Para el presente caso de estudio, se considera que una prueba triaxial de compresión es aquella que por medio de la aplicación de una fuerza axial a través de un pistón se intenta comprimir o acortar un material. La aplicación de dicha fuerza causa inmediatamente una deformación al elemento, es entonces cuando el material sufre un cambio de altura en el sentido de aplicación de dicha carga. Debido a esto se considera que la deformación sufrida al elemento queda definida por:

$$\varepsilon = \frac{H_f - H_0}{H_0} \quad (2.1)$$

donde:

ε : Deformación unitaria axial

H_f : Altura del elemento al final de la aplicación de la fuerza (mm)

H_0 : Altura inicial del elemento (mm)

Como es bien sabido, las fuerzas aplicadas en un área determinada son llamadas esfuerzos.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

donde:

σ : Esfuerzo

P : Es la fuerza aplicada al elemento

A : Es el área transversal de aplicación

Para el caso de las pruebas triaxiales hay que recordar que la aplicación del esfuerzo axial no se considera total puesto que una de las principales características de estas pruebas es la aplicación de esfuerzos horizontales o laterales en la muestra de suelo, es decir, esfuerzos de confinamiento. Es debido a esto que es necesario restar el esfuerzo de confinamiento al esfuerzo axial aplicado, dando como resultado el esfuerzo desviador:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.3)$$

donde:

q : Esfuerzo desviador

σ_1 : Esfuerzo axial aplicado a la muestra o esfuerzo principal máximo

σ_3 : Esfuerzo de confinamiento o esfuerzo principal mínimo

Teniendo en cuenta que el esfuerzo desviador es dependiente de la deformación unitaria ocurrida en el elemento, obtendremos la curva esfuerzo desviador-deformación unitaria axial. En la Figura 2-1 podemos observar que para un valor máximo de esfuerzo desviador le corresponde una deformación unitaria axial. A través de la historia de esfuerzos aplicados, se puede observar que se presenta una falla del tipo plástica.

La importancia de las curvas de esfuerzo-deformación en las pruebas triaxiales se debe principalmente a que nos permiten observar el estado de esfuerzos aplicados a la muestra a través de la deformación de la misma, en donde nos interesa principalmente la falla de esta o el esfuerzo máximo de resistencia.

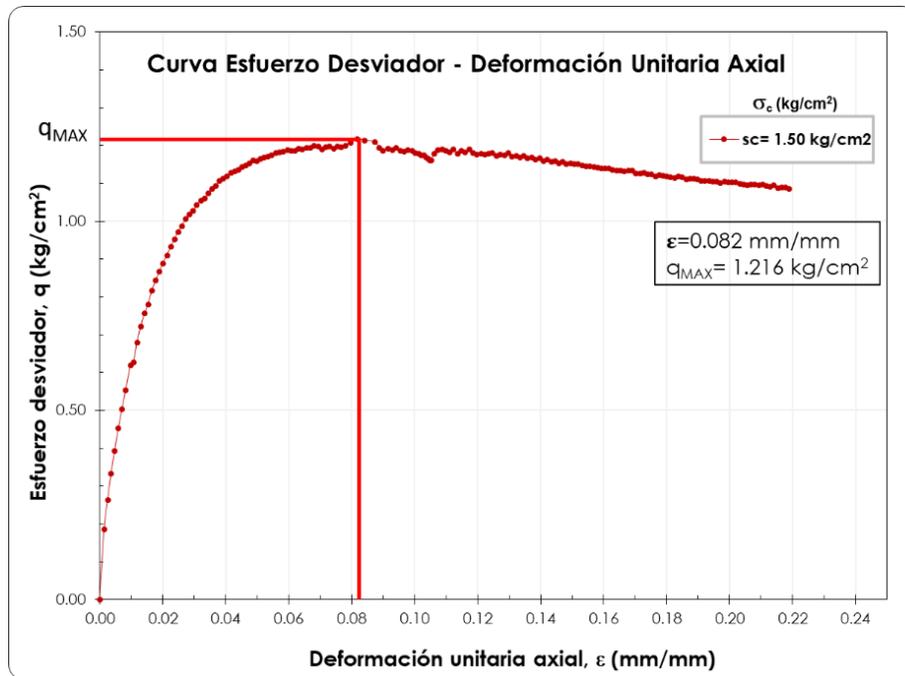


Figura 2-1 Curva esfuerzo-deformación de Colima, probeta inalterada con esfuerzo de confinamiento de 1.50 kg/cm²

2.2 Pruebas triaxiales

En una prueba triaxial se somete a una probeta cilíndrica de suelo a una presión hidrostática de confinamiento y, además, a una presión axial que puede variarse independientemente de la presión de confinamiento. La descripción de una cámara triaxial se podrá observar con mayor detenimiento en el Capítulo 4.

El nombre otorgado a la prueba triaxial es inapropiado, ya que idealmente se aplican únicamente dos esfuerzos, los cuales pueden ser controlados y variar independientemente. En la Figura 2-2 se pueden apreciar los tres esfuerzos actuantes en una prueba triaxial, en donde σ_2 y σ_3 son referidos al líquido confinante (e.g., agua), el cual al ser isotrópico, genera que ambos esfuerzos ejerzan la misma presión, por lo tanto son iguales; mientras que σ_1 es el esfuerzo axial. En una prueba triaxial de compresión el esfuerzo axial aplicado es más grande que el esfuerzo confinante, entonces se dice que el suelo es comprimido verticalmente. (Budhu, 2000).

El esfuerzo σ_1 es considerado el esfuerzo principal mayor mientras que el esfuerzo σ_3 es considerado el esfuerzo principal menor. Como ya se mencionó anteriormente, la curva esfuerzo-deformación relaciona la diferencia de ambos esfuerzos y la deformación unitaria axial.

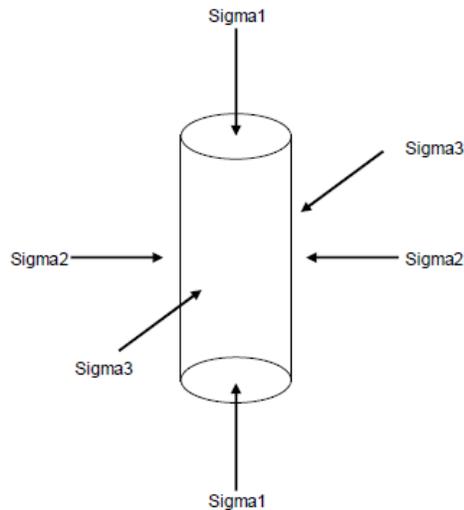


Figura 2-2 Esfuerzos en una prueba de compresión triaxial (Deméneghi & Puebla, 2001).

Cuando el suelo es sometido al esfuerzo axial, las partículas del mismo empiezan a generar un roce entre sí hasta que llega un momento en donde la aplicación de carga es la máxima y las partículas resbalan entre sí y se genera la falla por corte, en la Figura 2-3 podemos observar el plano de falla que se genera en la probeta cuando el suelo es sometido a los esfuerzos principales hasta el momento de su falla, donde además se aprecia el esfuerzo normal y cortante del plano generado.

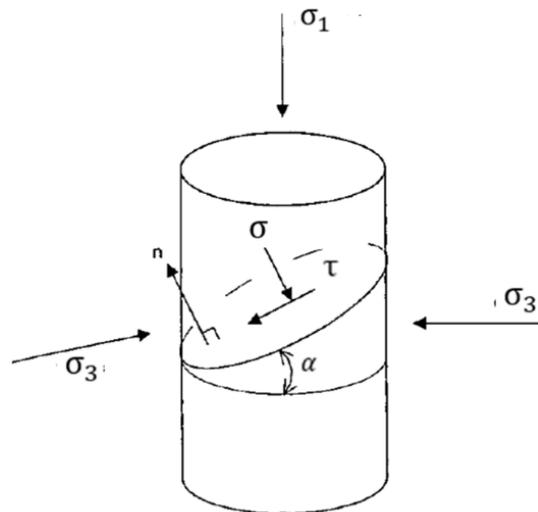


Figura 2-3 Esquema de esfuerzos en un espécimen probado en cámara triaxial, con ángulo α del plano de falla respecto a la horizontal.

Debido a que se conoce el valor de los esfuerzos principales durante toda la etapa de falla, es posible obtener los esfuerzos normales σ y cortantes τ sobre cualquier plano que forme el ángulo α , en el cual actúan los esfuerzos principales, de acuerdo con los principios de equilibrio (Peck *et al.*, 1983). Siendo así, tendríamos las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (2.4)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (2.5)$$

2.3 Criterio Mohr Coulomb

Con la obtención de los esfuerzos normales y esfuerzos cortantes respecto a un ángulo de falla y definidos en las ecuaciones antes mencionadas, los valores de dichos esfuerzos pueden ser representados por puntos en un círculo que se encuentre en un sistema de coordenadas cartesianas. En dicho sistema encontramos que el eje de las abscisas representa los esfuerzos principales y el eje de las ordenadas representa los esfuerzos cortantes. Este sistema coordenado recibe el nombre de *círculo de esfuerzos* o *círculo de Mohr*. En la Figura 2-4 se puede observar el sistema coordenado del círculo de Mohr, en donde cada punto que forma el círculo tiene los valores correspondientes de esfuerzos cortantes. Es importante recalcar que el círculo enmarca la envolvente de falla del suelo, la cual está delimitada por los esfuerzos principales y su cortante máximo, además el esfuerzo máximo del suelo es igual al radio del círculo, es decir, el esfuerzo desviador dividido entre dos (Peck *et al.*, 1983).

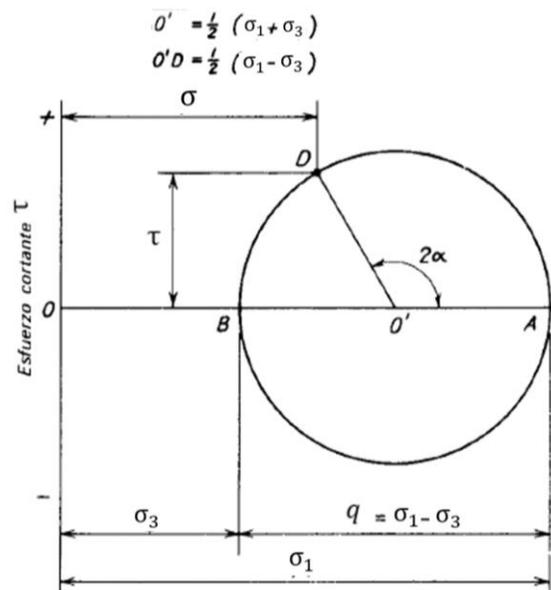


Figura 2-4 Círculo de esfuerzos de Mohr (modificado de Peck *et al.*, 1983).

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo debe determinarse por medio de los esfuerzos principales. La manera más sencilla de determinar dicho cálculo es por medio de métodos gráficos como lo son los círculos de Mohr. Si los esfuerzos principales corresponden a un estado o plano de falla en el espécimen, por lo menos un punto del

círculo de Mohr deberá representar una coordenada de esfuerzo normal y esfuerzo cortante que corresponda a un estado de falla del espécimen.

Si se elabora una serie de pruebas con diferentes valores de confinamiento, σ_3 , y se realizan los círculos de Mohr correspondientes a la falla para cada prueba, al menos un punto deberá representar los esfuerzos normales y cortantes referidos a la falla del suelo. En la Figura 2-5 se pueden apreciar los puntos de diferentes círculos de Mohr asociados a la falla de los especímenes bajo las condiciones especificadas en las pruebas, en donde se muestra la envolvente de falla, a la cual se le conoce como *línea de ruptura o de corte*. La envolvente de falla es una línea que puede o no intersectar con el eje cortante, lo cual se asocia a que el material presenta cierta cohesión de partículas ante la falla; sin embargo, esta deberá intersectar tangente a los círculos de Mohr (Peck *et al*, 1983).

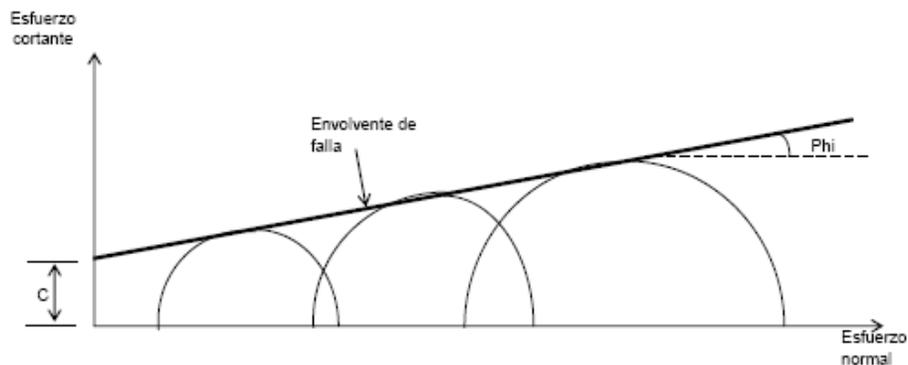


Figura 2-5 Envolvente de falla de un mismo suelo a diferentes valores de confinamiento (Deméneghi & Puebla, 2001).

Como los valores de cortante corresponden a la envolvente de falla, si esta se considera como una línea recta, podría representarse como:

$$\tau = c + \sigma \tan(\phi) \quad (2.6)$$

La cual es conocida como la Ley de resistencia de Coulomb, donde:

τ : Esfuerzo cortante

c : Cohesión

σ : Esfuerzo normal

ϕ : Ángulo de fricción interna

Por las propiedades geométricas de los círculos de Mohr y la envolvente de falla, puede observarse en la Figura 2-6 que para cualquier círculo tenemos que:

$$2\alpha = 90^\circ + \phi \quad (2.7)$$

Por lo tanto, el ángulo entre los planos en los que ocurre la falla y el plano en el que actúa el esfuerzo principal mayor es:

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2.8)$$

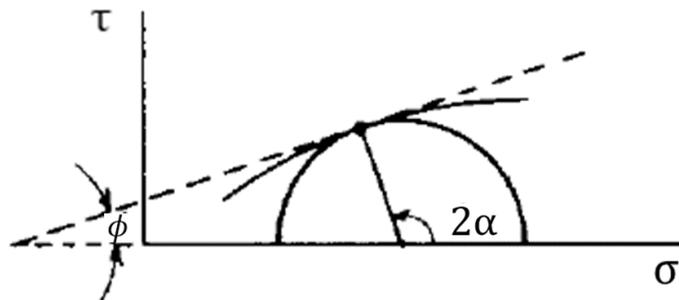


Figura 2-6 Relación entre ángulo y ángulo α (modificado de Peck *et al*, 1983).

La influencia del agua en los poros de la muestra de suelo puede producir cambios en los esfuerzos efectivos, con lo cual la resistencia al esfuerzo cortante y las relaciones esfuerzo-deformación pueden alterarse. El que se produzcan o no las presiones de poro en las muestras dependerá de las características del drenaje de la muestra de suelo y de la tendencia del suelo a dilatarse o contraerse.

Para las pruebas triaxiales CD, en donde se permite el drenaje, conocida como prueba lenta o prueba drenada, el agua difícilmente impide la tendencia del volumen a disminuir. Entonces la presión de poro permanece esencialmente igual a cero durante toda la etapa de falla y no tiene influencia en el comportamiento de la muestra. Las pruebas drenadas son los medios más seguros para obtener una curva de cambio de volumen, midiendo el volumen de agua que sale de la muestra saturada en el momento que se efectúa la falla.

Por otro lado, las pruebas triaxiales CU son aquellas en las que se permite una disipación de la presión de poro en el momento de la falla. Es conocida como una prueba consolidada rápida y como no se permite el drenaje no experimenta una disminución de volumen, pero como el agua no puede escapar de los vacíos, la presión varía en el agua de los poros. Lo anterior podría provocar un aumento en la presión de poro, en donde se podría presentar una presión de poro negativa, el valor negativo en la presión de poro no implica necesariamente una succión en el agua, sino por el contrario, es un esfuerzo menor que el original (Peck *et al*, 1983).

Teniendo en cuenta que la medición de presión de poro en la falla es durante todo el proceso de la etapa, se considera que se tiene un registro del comportamiento de la misma, con lo cual por medio del principio de esfuerzos efectivos se pueden obtener los parámetros mecánicos en función de dichos esfuerzos.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.9)$$

donde:

σ : Esfuerzos en estados totales

σ' : Esfuerzos en estados efectivos

u : Presión de poro

En la Figura 2-7 se pueden observar los círculos de Mohr con sus respectivas envolventes de falla para esfuerzos totales y para esfuerzos efectivos, en donde claramente se aprecia la afectación de la presión de poro en los esfuerzos principales.

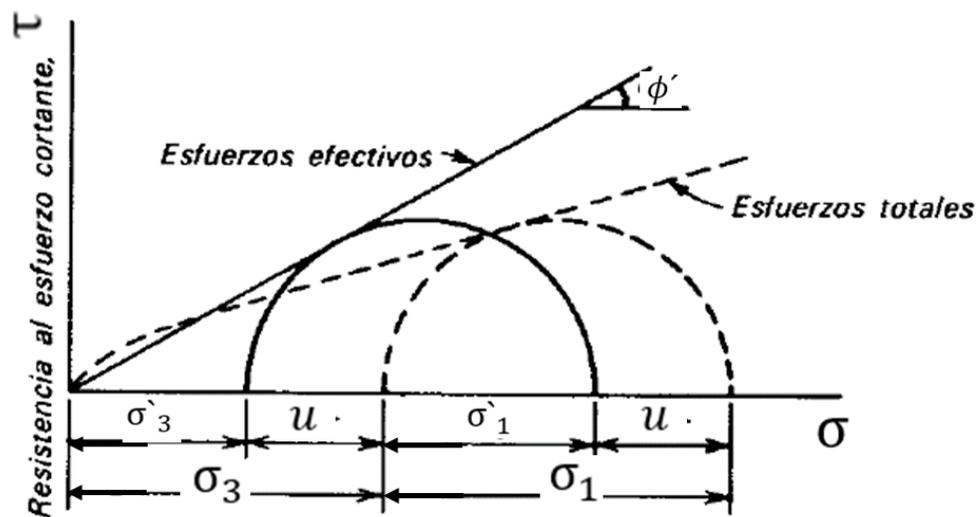


Figura 2-7 Envolvente de falla para esfuerzos totales y esfuerzos efectivos, en pruebas CU (Peck *et al.*, 1983).

2.4 Parámetros de Skempton

El 1954 Skempton determinó los coeficientes A y B de la presión de poro, los cuales estiman los incrementos de la presión de poro en un suelo. El procedimiento se realiza para estimar la influencia del agua presente en el comportamiento de un suelo. Skempton encontró conveniente expresar el cambio de presión de poro, que ocurre bajo cambios en los esfuerzos principales $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$ con la siguiente ecuación:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (2.10)$$

Donde los coeficientes A y B se miden experimentalmente en una prueba triaxial sin drenaje. Skempton explica además cuál es la variación de la presión de poro en la muestra de suelo durante la prueba triaxial, donde en primera instancia se tiene al elemento sujeto a un confinamiento isotrópico, posteriormente se somete a un esfuerzo de confinamiento mayor en la etapa de consolidación, donde la presión de poro tendrá un cambio, y durante la falla al aplicar el esfuerzo axial, la presión de poro presentará cambios, dando como resultado la variación de la misma durante esta etapa. Esto puede ser mejor observado en la Figura 2-8.

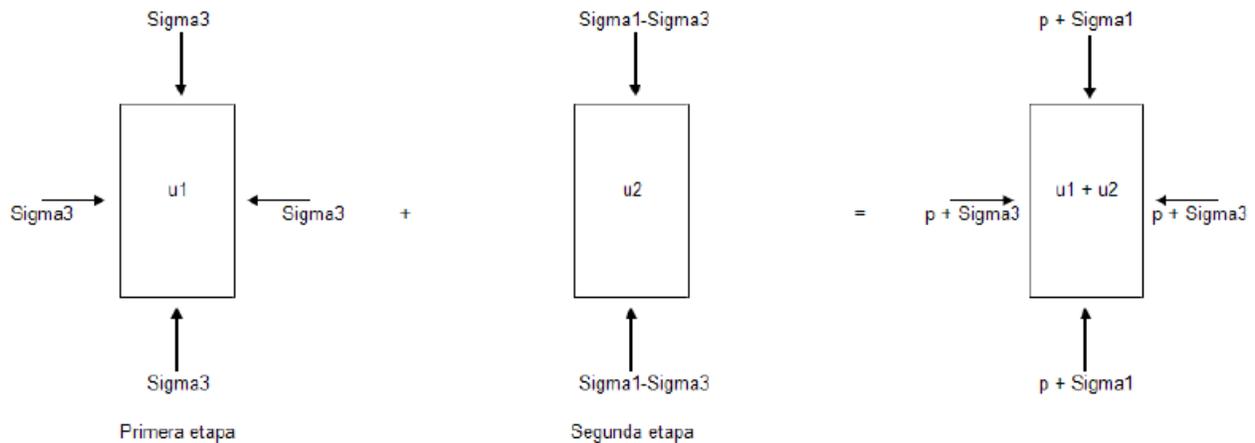


Figura 2-8 Variación de la presión de poro durante el desarrollo de una prueba triaxial (Deméneghi & Puebla, 2001).

Los coeficientes de A y B pueden analizarse teóricamente y en laboratorio durante la etapa de saturación, consolidación y falla. El coeficiente B se define como la relación que existe entre el aumento de presión de poro Δu_3 y el aumento del esfuerzo isotrópico de confinamiento $\Delta\sigma_3$, que quedaría representado de la siguiente forma:

$$B = \frac{\Delta u_3}{\Delta\sigma_3} \quad (2.11)$$

Donde el cambio de presión de poro se debe principalmente a la variación del confinamiento. Por otro lado, es evidente que Skempton determinó esta relación observando la variación de la compresibilidad de la estructura del suelo, la compresibilidad del fluido aire-agua y los cambios de volumen. Teniendo esta referencia, Skempton determina que un suelo totalmente saturado deberá manejar el valor de B igual a 1 (Skempton, 1954).

El parámetro A alcanza los valores máximos en la falla, los valores pueden ser positivos si los suelos tienden a comprimirse, por ejemplo, una arcilla normalmente consolidada o una arena suelta, mientras que, si los valores son negativos los suelos tienden a dilatarse, tal es el caso de las arenas densas y las arcillas pre consolidadas (Lambe & Whitman, 1972).

2.5 Comportamiento de arenas

El estudio del comportamiento de las arenas a lo largo de la historia ha sido de suma importancia en la ingeniería geotécnica. Una de las razones principales por la cual se utiliza esta base del comportamiento de arenas es que el comportamiento de los residuos mineros ha demostrado una similitud en su comportamiento.

Existen dos comportamientos dentro el estudio de materiales granulares de suma importancia, el comportamiento en condiciones drenadas y no drenadas durante la etapa de falla de pruebas CD y CU, respectivamente, en donde ambas presentan particularidades importantes. Para esta investigación se centrará únicamente en el comportamiento en condiciones no drenadas.

Comportamiento bajo carga en condiciones drenadas: Al aplicar esfuerzos cortantes a un suelo granular suelto saturado, éste experimentará una compresión y por lo tanto su volumen será reducido, entonces la reducción de volumen será mayor cuanto más suelto se encuentre el material. Si el material es medianamente denso, la reducción del volumen será pequeña y ésta puede suceder después de que se han generado deformaciones y esfuerzos cortantes los suficientemente grandes para que el material aumente su volumen. Los materiales densos o muy densos sólo aumentarán de volumen al someterse a esfuerzos cortantes. Estos cambios de volumen son iguales a los volúmenes de agua que expulsa el suelo al contraerse o a los que absorbe cuando se dilata. Los suelos que se comprimen por el efecto de la aplicación de cargas se definen como contractivos y los que aumentan de volumen como dilatantes. Los suelos granulares, saturados y sueltos son contractivos y quizá son los más problemáticos, pues en ellos se puede encontrar el fenómeno de licuación de arenas.

En el *comportamiento bajo carga en condiciones no drenadas*, al impedir el cambio de volumen durante la aplicación de esfuerzos cortantes; es decir, al no permitir el drenaje, el agua contenida en los poros del suelo experimentará cambios de presión.

Si el suelo es contractivo, la presión de poro aumentará; si es dilatante, la presión de poro disminuirá. Cuando el material se encuentra en un estado muy suelto, el aumento de la presión de poro podría anular a los esfuerzos efectivos, es en ese momento en donde sobreviene la licuación, pues el material habrá perdido su capacidad de resistir esfuerzos cortantes y se comportará como un fluido (Ovando & Segovia, 1996).

2.6 Trayectorias de esfuerzo

En el comportamiento de los suelos, las curvas esfuerzo desviador-deformación unitaria axial son muy importantes para la determinación de los esfuerzos totales, pero al tratarse de una prueba triaxial CU, en donde la medición de presión de poro tiene un protagonismo muy importante, se debe contar con curvas de presión de poro-deformación unitaria axial para poder determinar los esfuerzos efectivos. Además de ello, es muy útil contar con trayectorias de esfuerzos en donde estas últimas se representan como gráficas que utilizan los esfuerzos efectivos principales, como en el diagrama $p' - q$, siendo p' el esfuerzo efectivo octaédrico y q el esfuerzo desviador:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (2.12)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2.13)$$

En la Figura 2-9 se presenta el comportamiento en condiciones drenadas y no drenadas de las arenas. Como se puede observar, la distancia horizontal entre la trayectoria de esfuerzos drenada y la no drenada es la presión de poro en exceso, Δu .

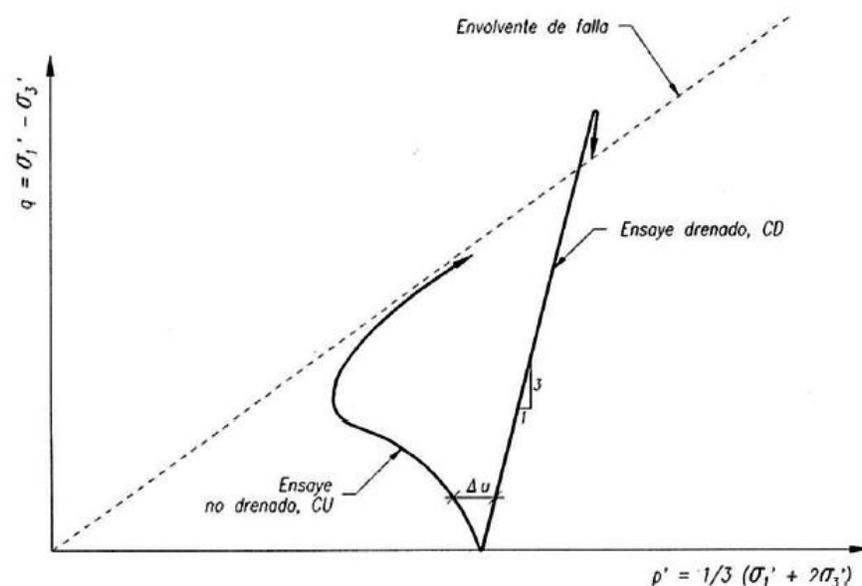


Figura 2-9 Trayectorias de esfuerzos efectivos de compresión triaxial, ensayos CU y CD (Ovando & Segovia, 1996).

Ovando y Segovia (1996) al realizar ensayos de pruebas triaxiales sin permitir el drenaje, encontraron el comportamiento que se muestra en la Figura 2-10. En dicha figura podemos observar que la muestra densa genera presiones de poro negativas, mientras que la muestra ensayada en estado muy suelto sólo genera presión de poro positiva. En la curva esfuerzo-deformación de la arena muy suelta se define un esfuerzo máximo después del cual

la presión de poro continúa aumentando hasta que a deformaciones grandes tiende a mantenerse constante. Después del esfuerzo cortante máximo, los aumentos de presión de poro posteriores producen reducciones en los esfuerzos normales efectivos y en los esfuerzos cortantes, observándose que al final de la prueba se alcanza un esfuerzo cortante residual que incluso puede ser nulo. Es entonces que la muestra se licúa al presentar presiones de poro positivas que anulan a los esfuerzos efectivos, lo cual impide que la muestra pueda soportar esfuerzos cortantes por el exceso de presión de poro generado, y el suelo se comportara como un fluido en donde las deformaciones que se presentan por licuación son denominadas como deformaciones de flujo. El estado estable se define como el estado en el que se alcanza la resistencia última de las arenas, sin cambios de volumen o de presión de poro, en donde además las deformaciones ocurren a velocidad constante; entonces este comportamiento es representado en las trayectorias de esfuerzo p' - q en donde se observa que el material de arena muy suelta se comporta de manera contractiva, mientras que el material de arena densa se comporta de manera dilatante.

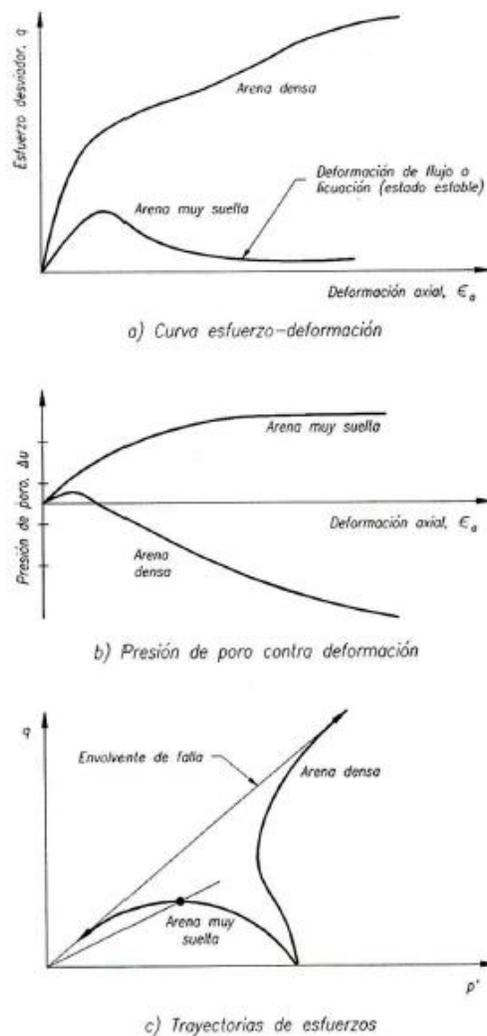


Figura 2-10 Comportamiento de arena densa y muy suelta (Ovando & Segovia, 1996).

Dentro de las trayectorias p' - q encontramos que la envolvente de falla en el estado crítico es denominada como la pendiente M de la línea de falla, como se observa en la Figura 2-11, la cual queda determinada como la relación existente entre el esfuerzo desviador y el esfuerzo octaédrico, como se muestra en la Ecuación (2.14).

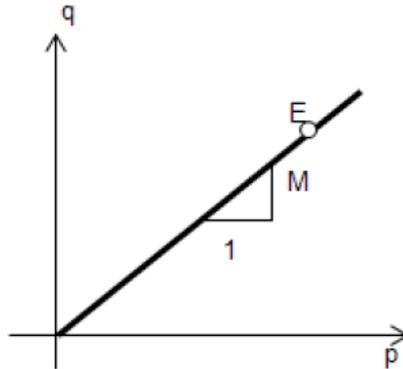


Figura 2-11 Envolvente de falla en el estado crítico (Deméneghi & Puebla, 2001).

Si consideramos que:

$$M = \frac{q}{p'} \quad (2.14)$$

$$M = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}} \quad (2.15)$$

Una de las relaciones más importantes que encontramos en las trayectorias de esfuerzo es aquella en la cual se puede obtener por medio de relaciones trigonométricas el ángulo de fricción interna en estados de esfuerzos efectivos, lo cual sirve para poder observar cuál es el valor de dicho ángulo. Entonces por relaciones de círculos de Mohr, tenemos que:

$$\sigma'_3 = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi} \sigma'_1 \quad (2.16)$$

$$M = \frac{6 * \text{sen } \phi'}{3 - \text{sen } \phi'} \quad (2.17)$$

$$\text{sen } \phi' = \frac{3M}{6 + M} \quad (2.18)$$

2.7 Estudios previos

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se revisaron diversas referencias bibliográfica con el objetivo de recopilar información acerca de investigaciones, enfocadas en la determinación de parámetros mecánicos de jales inalterados y reconstituidos en condiciones saturadas; además de ello, la relevancia de la recopilación de la información que se muestra en esta sección resulta importante debido a que es necesario tener en cuenta las consideraciones de otras investigaciones de la misma índole, enfocándose en el desarrollo del método de reconstitución de probetas y en las propiedades físicas de los materiales en estudio.

En la búsqueda a nivel internacional es gratificante ver que la investigación realizada en los depósitos de jales es algo que se está realizando de manera fructífera, en donde se han estado desarrollando diferentes trabajos como lo son estudios de impactos al ambiente, reutilización de jales en otras industrias, estudios geotécnicos, entre otras tantas. Algunos ejemplos de estudios que se encontraron son el de Rodríguez (2006), Shamzai *et al.* (2007), Flores *et al.* (2010), Flores *et al.* (2012) y Bernal (2016), por mencionar algunos.

La investigación desarrollada por Rodríguez (2006) presenta resultados de una caracterización mecánica realizada a una minera metalúrgica del Río Moa en Cuba. El material de trabajo que utilizaron tiene un tamaño de partícula en el cual predominan los limos, formados por minerales de níquel y cobalto. El depósito utiliza un método de disposición de espigoteo; el comportamiento de material es no plástico y presentó cero de cohesión y un ángulo de fricción de 36° . Las propiedades índices mostraron que de acuerdo con la distribución granulométrica que realizaron, se tiene un 99% de material inferior a 0.2 mm de diámetro. Una densidad relativa de sólidos entre 1.78 y 2.38, una relación de vacíos de entre 1.15 y 2.2, un límite líquido de entre 23 y 44%, mientras que, para el límite plástico se obtuvo entre 21 y 40%. De acuerdo con el SUCS se clasifica como una ML limo de baja compresibilidad y SC arena arcillosa.

Las pruebas triaxiales sin drenaje fueron realizadas por medio de una compactación estática, en donde se utilizaron muestras con tres diferentes pesos volumétricos secos de 1.32, 1.44 y 1.53 g/cm³. En la Figura 2-12b se puede observar el comportamiento dilatante obtenido en las muestras ensayadas por Rodríguez (2006), mientras que, en la Figura 2-12a se muestran las trayectorias de esfuerzo que reafirman el comportamiento dilatante.

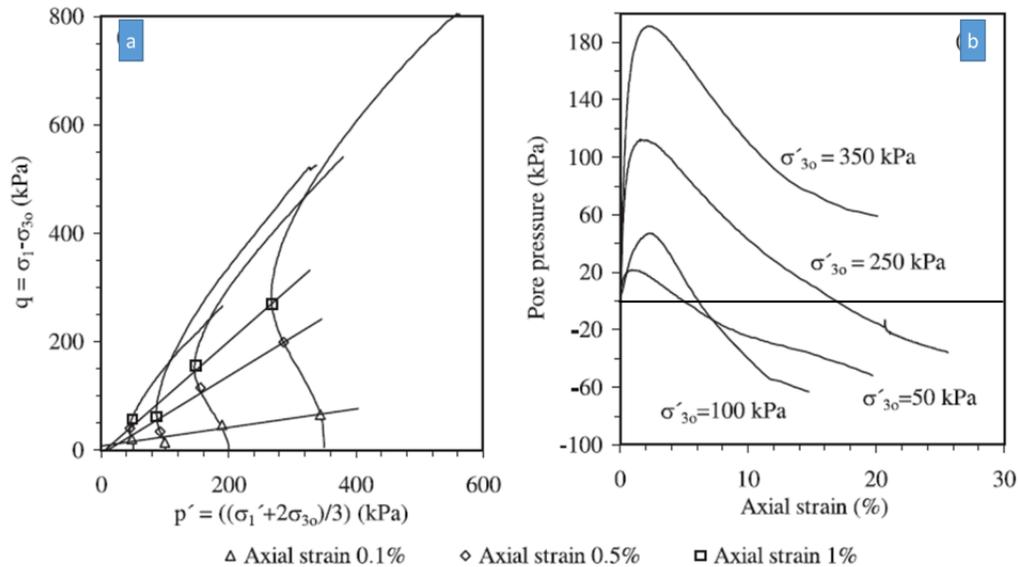


Figura 2-12 a) Trayectoria de esfuerzos p' - q y b) Relación entre el porcentaje de deformación unitaria axial y la presión de poro (Rodríguez, 2006).

Por otro lado, Shamzai *et al.* (2007) analizaron las propiedades de los residuos procedentes de una mina de cobre en Sarcheshmeh, Irán.

La caracterización geotécnica mostró que el tamaño general de las partículas era relativamente grueso, con un porcentaje de finos aproximadamente del 45%. De acuerdo con la clasificación del SUCS era considerado como una SL arena mal graduada. Presentaron un límite líquido de entre el 26 y 39% y un índice de plasticidad entre 4 y 12%. En lo que respecta a la densidad relativa de sólidos, obtuvieron un valor de 2.79, además de una variación de 0.4 a 1.0 en la relación de vacíos, mientras que para el peso volumétrico seco se encontró un valor de 1.78 g/cm^3 .

Para los parámetros de resistencia al corte se ejecutaron pruebas triaxiales del tipo CU y CD. Estas pruebas fueron realizadas con material no procesado y material producto del cicloneo. Los parámetros obtenidos por Shamzai *et al.* (2007) a partir de las pruebas CU del material no procesado se presentó una cohesión de 0.3 a 0.97 kg/cm^2 , mientras que el ángulo de fricción interna fue de entre 20° y 29° . Para el material procesado, el material cicloneado, se presentó una cohesión entre 0.08 y 0.21 kg/cm^2 , mientras que el ángulo de fricción interna se manejó de entre 24° y 37° . En la Tabla 2-1 podemos observar los resultados recabados y obtenidos por Shamzai *et al.*, (2007).

Tabla 2-1 Valores de cohesión y ángulo de fricción encontrados por Shamzai *et al.* (2007), para pruebas triaxiales tipo CU.

Material	Relación de vacíos inicial	Ángulo de fricción	Cohesión	Fuente
	e_0	ϕ	c_{CU} , (kg/cm ²)	
Jales de cobre	-	13-18	0-0.98	Volpe, 1979
arena de cobre	0.7	19-20	0.34-0.44	Wahler, 1974
limos de cobre	0.6	14	0.64	Wahler, 1974
limos de cobre	0.9-1.3	14-24	0-0.2	Wahler, 1974
Jales de cobre	0.5-1.1	8-29	0.30-0.97	Shamzai, 2007
limos de cobre	0.5-1.1	24-37	0.08-0.21	Shamzai, 2007

Flores *et al.* (2010) determinaron las propiedades índices de todo un sitio de estudio para el diseño geotécnico de una presa de jales en el estado de Hidalgo, México. Dentro de las propiedades índice de los jales se obtuvo que de acuerdo con el SUCS se tuvieron Arcillas arenosas de baja plasticidad (CL) con 66.9% de finos y 33.1% de arenas, con límites líquido de 31.2% y plástico de 25%, además de un índice de plasticidad de 6.2% y una densidad relativa de sólidos de 2.725. Para la elaboración de este diseño se utilizaron prueba inalteradas y reconstituidas de residuos mineros.

Para la formación de probeta se utilizó un método de compactación estática de amasado. Se formaron tres series de ensayos de tres muestras cada una. Una serie se ensayó en una prueba tipo UU y otras dos en pruebas tipo CU. En el caso de pruebas CU para la muestra más suelta, $e = 0.94$, ángulos de fricción en condición de esfuerzos totales y efectivos de 12.54° y 17.87°, mientras que para la cohesión, en esfuerzos totales se tuvo 0.227 kg/cm² y para esfuerzos efectivos 0.186 kg/cm². Para la muestra más densa, $e = 0.86$, el ángulo de fricción en condiciones de esfuerzos totales y efectivos fue de 14.05° y 20.33°, y cohesiones de 0.105 y 0.186 kg/cm², respectivamente. Para la serie parcialmente saturada, prueba UU, se obtuvo un ángulo de fricción de 20.67° y una cohesión de 0.13 kg/cm².

Flores *et al.* (2012) realizaron el análisis de estabilidad de un depósito de jales y obtuvieron residuos mineros de la parte superior de la cortina a los que les determinaron sus propiedades índices y reconstituyeron muestras para obtener propiedades mecánicas parcialmente saturadas y saturadas. Presentaron un porcentaje de finos de entre el 11 y 18% y una densidad relativa de sólidos de 3.52. De acuerdo con el SUCS, el suelo fue una SC-arena arcillosa. En lo que respecta al peso volumétrico, se registró un valor de entre 2.23 y 2.43 t/m³, obtenidos a partir de muestras inalteradas. Para las muestras reconstituidas se obtuvo un peso volumétrico de 1.63 t/m³, lo cual mostró una diferencia muy grande entre ambos pesos.

El método de reconstitución fue por medio de una compactación de amasado, se ejecutaron seis series de ensayos triaxiales en jales gruesos para la determinación de parámetros mecánicos, en donde tres fueron del tipo UU y los otros tres del tipo CU. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Resumen de los parámetros mecánicos en muestras reconstituidas (Flores *et al.*, 2012)

Sondeo mixto <i>SM</i>	Profundidad <i>m</i>	Ensaye tipo UU		Ensaye tipo CU			
		Esfuerzos totales		Esfuerzos totales		Esfuerzos efectivos	
		<i>c</i> <i>kg/cm²</i>	ϕ <i>grados</i>	<i>c</i> <i>kg/cm²</i>	ϕ <i>grados</i>	<i>c'</i> <i>kg/cm²</i>	ϕ' <i>grados</i>
Mezcla de 3				0.08	12.86	0.01	21.97
Mezcla de 3				0.19	12.94	0.14	18.22
Mezcla de 3				0.14	13.64	0.14	16.42
MSA-1		0.15	10.17				
MSA-1		0.15	19.56				
Densidad media		0.16	17.11				

ϕ Ángulo de fricción

c Cohesión

Bernal (2016) analizó la caracterización física y mecánica del residuo minero procedente del municipio de Topia en el estado de Durango. Realizó pruebas de compactación utilizando una técnica de amasado para determinar la relación de vacíos máxima y mínima, así como el comportamiento del suelo variando el contenido de agua entre 8 y 20% y el peso del pisón entre 0.1 y 3.0 kg; posteriormente, realizó pruebas triaxiales del tipo CU para evaluar los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos totales y efectivos.

El material de trabajo de acuerdo con el SUCS fue SM-arena limosa, con un contenido de finos no plásticos de aproximadamente el 31%, una densidad relativa de sólidos promedios de 2.86, además se obtuvo un límite líquido de 26.978%.

En la Tabla 2-3 se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de resistencia obtenidos por Bernal (2016), en términos de esfuerzos totales y efectivos en función del contenido de agua y el peso del pisón.

Tabla 2-3 Resultados de parámetros de resistencia obtenidos bajo el criterio de Mohr-Coulomb (Bernal, 2016).

PP=100g						
w	γ_{sat}	γ_d	c (TET)	c' (TEE)	ϕ (TET)	ϕ' (TEE)
%	g/cm ³	g/cm ³	kg/cm ²	kg/cm ²	grados	grados
8	1.908	1.395	0.000	0.030	13.210	23.200
16	1.901	1.386	0.075	0.065	10.110	19.470
20	1.912	1.402	0.000	0.000	10.810	19.650
PP=1500g						
w	γ_{sat}	γ_d	c (TET)	c' (TEE)	ϕ (TET)	ϕ' (TEE)
%	g/cm ³	g/cm ³	kg/cm ²	kg/cm ²	grados	grados
8	1.988	1.504	0.310	0.090	13.340	30.280
16	2.01	1.553	0.260	0.000	24.700	35.970
20	2.049	1.575	0.700	0.000	26.570	34.610
PP=3000g						
w	γ_{sat}	γ_d	c (TET)	c' (TEE)	ϕ (TET)	ϕ' (TEE)
%	g/cm ³	g/cm ³	kg/cm ²	kg/cm ²	grados	grados
8	2.004	1.526	0.310	0.000	19.650	36.500
16	2.047	1.571	0.550	0.000	26.570	34.990
20	2.088	1.623	1.400	0.000	24.230	35.940

González (2019) aborda un estudio experimental para la caracterización física y mecánica de residuos mineros, en donde unos de los propósitos generales de dicho trabajo es brindar una respuesta sobre si el uso de parámetros mecánicos obtenidos a partir de muestras reconstituidas puede ser comparable con los obtenidos de muestras inalteradas en donde ambas muestras tengan las mismas condiciones volumétricas (e.g., contenido de agua y peso volumétrico de la muestra). Para poder hacer esta comparación utilizó pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas, tipo UU, en probetas inalteradas y reconstituidas en donde comparó las curvas esfuerzo-deformación, y además los parámetros mecánicos de resistencia (e. g. ángulo de fricción aparente y cohesión).

González ensayó material proveniente de dos depósitos mineros (San Luis Potosí y Zacatecas). De las muestras utilizadas para su investigación se determinaron las siguientes propiedades índice: límite líquido entre 28 y 41%, densidad de sólidos entre 2.97 y 3.35, contenido de agua entre 5 y 29%, la granulometría que presentó un contenido de finos del 62 al 97%, y de acuerdo con el SUCS clasifica su material como ML Limo o Limo con arena de baja plasticidad.

El proceso de reconstitución que utilizó González fue por compactación estática, en donde el material era compactado en cinco capas, en donde los factores a considerar en la reconstitución eran el contenido de agua y peso volumétrico de la muestra.

Ensayó seis series de pruebas triaxiales en condiciones UU, debido principalmente a que encontró que no se podía realizar la reconstitución de probetas cuando las muestras inalteradas contaban con un contenido de agua mayor

al 21%. Dentro de los resultados obtenidos de este trabajo, tenemos que las muestras reconstituidas presentan un ángulo de fricción aparente menor cuando el contenido de agua se encuentra entre el 17 y 21%, mientras que en las muestras con un contenido de agua menor al 15%, tanto el ángulo de fricción como la cohesión presentan una pequeña variación.

El ángulo de fricción aparente obtenido por probetas inalteradas y reconstituidas es muy similar cuando el grado de saturación es menor al 70%, ya que cuando aumenta dicho valor el ángulo de fricción interna comienza a presentar variaciones entre las probetas inalteradas y reconstituidas, considerándose que los parámetros mecánicos de ambas muestras ya no son similares. En la Tabla 2-4 se muestran los resultados obtenidos por González (2019) de seis muestras ensayadas, en donde es posible observar los valores tan similares entre probetas inalteradas y reconstituidas (series 3 a 6) respecto a los parámetros mecánicos, en especial el ángulo de fricción interna.

Tabla 2-4 Parámetros mecánicos obtenidos por González (2019) a partir de ensayos UU en probetas inalteradas y reconstituidas.

Serie, Sondeo y Muestra	Localización	σ_c <i>kg/cm²</i>	Probetas inalteradas			Probetas reconstituidas		
			Sr <i>%</i>	ϕ <i>grados</i>	c <i>kg/cm²</i>	Sr <i>%</i>	ϕ <i>grados</i>	c <i>kg/cm²</i>
1 SS-2-1 M-7	ZAC	0.5	92.27	30.00	1.10	85.55	21.00	0.55
		1.5	90.02			-		
		2.88	94.92			92.34		
2 SS-1-1 M-3	SLP	0.5	82.15	36.00	0.15	79.78	24.00	0.28
		0.85	89.03			84.57		
		1.21	82.62			79.84		
3 SS-1-3 M-2	SLP	0.52	19.79	34.00	0.40	19.87	35.00	0.18
		1.92	21.09			21.66		
		4.88	20.75			21.00		
4 SS-3-2 M-1	SLP	0.5	26.73	35.00	0.15	26.73	35.00	0.05
		1.37	27.40			27.40		
		3.53	25.70			25.70		
5 SS-5-2 M-3	SLP	0.5	44.81	35.00	0.07	44.00	34.00	0.10
		1.32	41.82			41.31		
		3.14	42.24			44.30		
6 SS-1-2 M-3	SLP	0.5	71.58	32.00	0.10	72.04	33.00	0.02
		1.22	59.17			62.44		
		2.73	62.85			63.07		

3 METODOLOGÍA CONSIDERADA

Se seleccionaron tres muestras obtenidas de tres sitios distintos del país. La muestra 1 (COL) obtenida de la mina designada Cerro Náhuatl, ubicada en el municipio de Coquimatlán, en el estado de Colima. La muestra 2 (ZAC) es del depósito de jales de San Martín, ubicado en el municipio de Sombrerete, en el estado de Zacatecas. La muestra 3 (SLP) es del municipio de Charcas, en el estado de San Luis Potosí.

El propósito de este estudio es analizar las tres muestras obtenidas de estos tres sitios por medio de pruebas triaxiales estáticas tipo CU realizadas con ayuda de una cámara triaxial, a la cual se tuvo disposición dentro del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería (IIUNAM). En estas pruebas se busca observar el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación, con el fin de poder discutir si son comparables los resultados de las muestras inalteradas y reconstituidas, además de ver si es pertinente el uso de muestras reconstituidas en caso de no poseer muestras inalteradas. Asimismo, se considera que ambas muestras fueron sometidas a los mismos esfuerzos de confinamiento y similares relaciones volumétricas donde se busca verificar la influencia de la estructura del suelo en su comportamiento mecánico.

Para ello se realizaron las siguientes actividades:

1. Caracterización de las muestras, contenido de agua (w), densidad de sólidos (G_s), límite líquido (w_L), granulometrías y propiedades gravimétricas y volumétricas.
2. Extracción y elaboración de probetas inalteradas del mismo horizonte.
3. Elaboración de probetas reconstruidas con el mismo material de las muestras inalteradas, por medio del método de compactación estática, en donde se intentó igualar las propiedades de peso volumétrico seco de la probeta inalterada y la relación de vacíos.
4. Montaje, saturación, consolidación y falla de las probetas inalteradas y reconstituidas en una prueba triaxial consolidada no drenada.
5. Análisis de las curvas de esfuerzo desviador contra deformación unitaria axial para las probetas inalteradas y reconstituidas.
6. Comparación entre las muestras con base en los resultados obtenidos utilizando el criterio de los círculos de Mohr y trayectorias de esfuerzo.
7. Resultados obtenidos.
8. Conclusiones del trabajo.

A continuación, se presenta una breve descripción del equipo utilizado, su calibración, verificación y procedimientos de elaboración de probetas inalteradas y la reconstitución.

4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

En la actualidad, en el desarrollo de la ingeniería geotécnica el uso de equipos ha sido una herramienta básica, en donde además se cuenta con una amplia gama de los mismos, los cuales son utilizados para la obtención de parámetros mecánicos del suelo en campo y laboratorio. La cámara triaxial es el equipo más versátil y más utilizado en los laboratorios de mecánica de suelos para poder obtener parámetros mecánicos de los suelos.

Dentro del desarrollo del presente trabajo se realizaron pruebas triaxiales a las muestras de residuos mineros de los tres sitios antes mencionados (i.e., minas de jales de Colima, Zacatecas y San Luis Potosí) por medio del uso de probetas cilíndricas inalteradas y reconstituidas. Dentro de la prueba triaxial usualmente la probeta debe tener un diámetro medio de 3.6 cm y debe contar con una relación de esbeltez (longitud-diámetro) de 2 a 2.6, de acuerdo a la Norma ASTM –D 4767– 95. La prueba triaxial es uno de los métodos más confiables disponibles para la determinación de los parámetros mecánicos de resistencia cortante. Esta prueba proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo, deformaciones axiales, carga vertical, y presiones internas de la muestra, como es el caso de la presión de poro.

Como es bien sabido, las pruebas triaxiales de compresión someten al suelo a un confinamiento, el cual incrementará durante el desarrollo de la prueba y durante la consolidación el aumento de esta presión provocará que el suelo disminuya de volumen. Además, durante la etapa de falla es aplicado un esfuerzo axial que comprime a la muestra de suelo, la cual provoca una compresión en la probeta, a medida que este esfuerzo aumenta y por ende existe una deformación en la muestra, en donde si la deformación es lo suficientemente grande esto provocará que las partículas resbalen entre sí, formando un plano de falla de corte máximo. La mayor parte de las fallas del suelo suceden a fallas cortantes ya que los suelos sólo pueden soportar esfuerzos de tensión muy pequeños (Peck *et al.*, 1983).

En la Figura 4-1 se puede observar el equipo utilizado para la realización de las pruebas. Dentro del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería (IIUNAM) se contó con la disposición de la cámara triaxial 3 para el desarrollo de la presente investigación.



Figura 4-1 Cámara triaxial 3, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4.1 Cámara triaxial

Como se ha mencionado, uno de los objetivos principales de esta investigación es presentar la comparación de curvas esfuerzo-deformación obtenidas de muestras de jales saturados, a partir de pruebas triaxiales tipo CU para poder ver la influencia de la estructura del suelo en su comportamiento mecánico a partir de muestras inalteradas y reconstituidas. Un factor importante a considerar dentro de la realización de esta investigación es el equipo a utilizar. El Instituto de Ingeniería cuenta con diversas cámaras triaxiales de varias marcas y modelos, algunas con aditamentos especiales que las hacen únicas. El equipo triaxial está conformado de tres elementos indispensables, en primera instancia tenemos a la cámara triaxial, seguido por el sistema de presiones y por último el sistema de adquisición de datos, los cuales se describirán a continuación.

La cámara del equipo posee una camisa de acrílico con una base fija de acero inoxidable que además cuenta con varillas que permiten ajustar al sistema como un marco de acero y una tapa de aluminio que cuenta con un pistón neumático para la aplicación de la carga axial. La muestra de suelo o probeta es colocada sobre un pedestal de aluminio que conecta con el sistema de drenaje y bajo un cabezal móvil, el cual también está conectado al sistema de drenaje. El cabezal móvil o cabezal superior se empata con el cuerpo del pistón para formar el sistema de carga axial. En la Figura 4-2 se muestra un esquema muy general de los elementos que conforman una cámara triaxial.

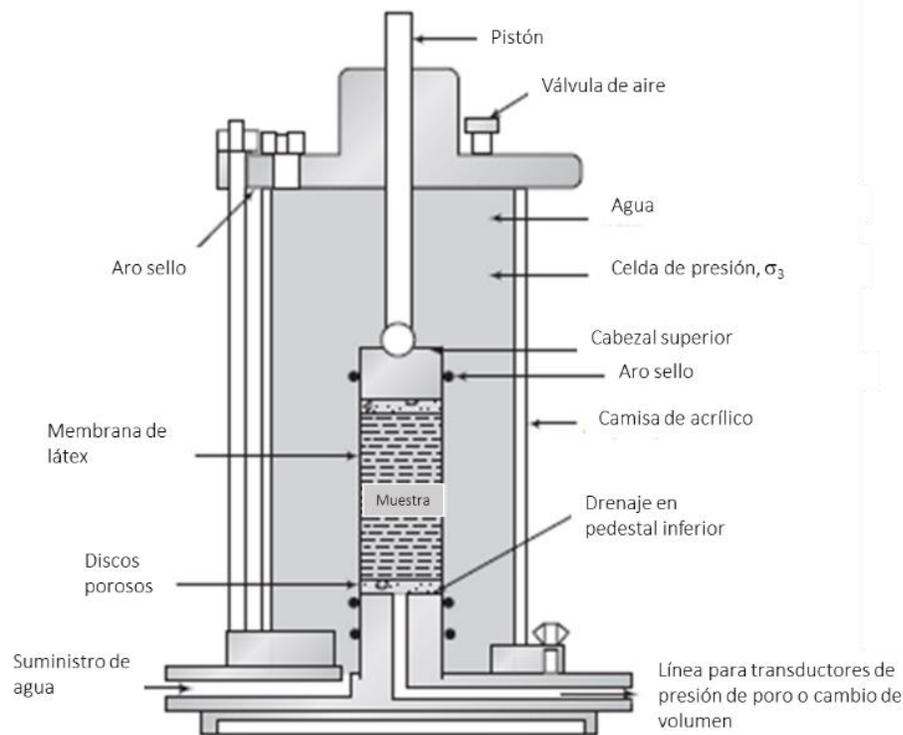


Figura 4-2 Esquema generalizado de Cámara triaxial con muestra de suelo (Modificado de Budhu, 2000).

La cámara es alimentada por el sistema de presiones, la cual proviene de una línea de conducción de aire presurizado de 7 kg/cm^2 , y proporciona las presiones que alimentan al esfuerzo de confinamiento, al esfuerzo de contrapresión y al sistema servo-neumático. El sistema servo-neumático es el encargado de regular la presión necesaria para que el pistón haga la aplicación de la carga axial.

Todo el monitoreo de la prueba es guardado gracias al sistema de adquisición de datos, el cual, por medio de transductores y reguladores nos brinda la información de lo que le sucede a la muestra de suelo durante todas las etapas de la prueba (e.g., desplazamiento, carga aplicada a la probeta, presión de poro, presión de confinamiento, presión de contrapresión y cambio volumétrico).

4.2 Instrumentación del equipo

Como ya se explicó, el monitoreo de pruebas y la adquisición o registro de lecturas de la cámara es por medio de sistemas electrónicos que transforman las magnitudes físicas en señales eléctricas llamados transductores. Estos transductores se encuentran en puntos cercanos a la cámara y son los encargados de brindar un monitoreo de los esfuerzos que se están aplicando, dichos transductores están conectados a un sistema de recepción de señales, el cual nos permite obtener el registro de la presión ejercida en la cámara por medio de los transductores. Con el uso de un software especializado es posible regular las presiones que entran a la cámara por medio de válvulas

(manómetros o reguladores), posteriormente la presión es registrada por el transductor, el cual manda una señal electrónica al sistema de recepción de señales por medio de voltaje, y dicho sistema nos permite leer la presión aplicada en el monitor.

Como se observa, el uso de traductores es de suma importancia en nuestro sistema; por lo tanto, tenemos que revisar que funcionen de manera correcta y eficiente. Es por ello que dichos sensores deben estar calibrados, en donde principalmente hagamos un registro del voltaje que le corresponde a cada variación de magnitud aplicada en la cámara. Esta calibración será detallada más adelante.

El Software utilizado para el monitoreo de las pruebas es un programa diseñado en LabVIEW, es un software desarrollado por personal de las coordinaciones de Geotecnia y Electrónica del IIUNAM, el cual cuenta con un acceso rápido al hardware e información de datos, por lo que podemos hacer uso del programa para su operación y para la calibración de los transductores. En la Figura 4-3 se observa un esquema de cómo se encuentran distribuidos los equipos de las tres cámaras disponibles el espacio de trabajo dentro del laboratorio.



Figura 4-3 Cámaras triaxiales cíclicas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Dentro de los elementos fundamentales del equipo tenemos componentes de gran importancia como lo son los transductores. A continuación, se presenta una breve descripción de sus características, marca y modelo. En las pruebas triaxiales del tipo CU, los factores más importantes de los cuales se debe tener un registro son: la carga axial, el desplazamiento axial, el cambio volumétrico de la probeta para saturación y consolidación, regulación de presiones de confinamiento, poro y contrapresión. Todos ellos cuentan con transductores que regulan su funcionamiento. A continuación, se describen dichos elementos (González, 2019). Además, en la Figura 4-4 se muestra un esquema de la distribución y ubicación de los transductores en torno a la cámara triaxial.

- *Carga axial:* El equipo cuenta con una celda de carga sumergible (hidrostáticamente compensada) con una capacidad de 150 kg (marca: OMEGADYNE, modelo: LCMUW).
- *Desplazamiento axial:* el transductor utilizado para la medición de deformación es un LVDT (Transductor de Desplazamiento Variable Lineal, marca Schaevitz y modelo: E1000), el cual registra el desplazamiento en una dirección a lo largo de un eje. En este caso se cuenta con un desplazamiento máximo de 50 mm y la ubicación del LVDT se sitúa en la parte superior del pistón.
- *Cambio volumétrico:* se trata de un transductor de presión diferencial (marca: VALIDYNE, modelo: DP15), con un rango de 30 cm³ de agua que opera con ayuda de una bureta graduada.
- *Presiones de confinamiento y de poro:* Son traductores con la capacidad de medir presiones de materiales líquidos y gaseosos (marca: VIATRAN, modelo 1182AH), con una capacidad de 7.5 kg/cm². El uso de confinamiento está regulado por un manómetro montado sobre un tablero.
- *Presión de contrapresión:* es un transductor apto para medir la presión de aire presurizado (marca: MEAS, modelo: MSP-300-100), con capacidad de 7.5 kg/cm².



- 1 Celda de carga sumergible
- 2 LVDT
- 3 Sensor de cambio volumétrico
- 4 Sensor de confinamiento
- 5 Sensor de presión de poro
- 6 Sensor de contrapresión

Figura 4-4 Transductores que conforman el sistema de la cámara triaxial cíclica. IIUNAM.

4.3 Calibración y verificación del equipo

El uso de software ingenieril, como lo es Lab VIEW en este caso, permite hacer uso de la operación del equipo, y de igual manera nos proporciona la opción de calibrar todos los transductores del equipo para un óptimo funcionamiento. El apartado que maneja el software para efectuar la calibración nos brinda un menú de calibración (Figura 4-5), en donde se pueden realizar diferentes acciones, principalmente la de calibración experimental de traductores y el ajuste del sistema servo.

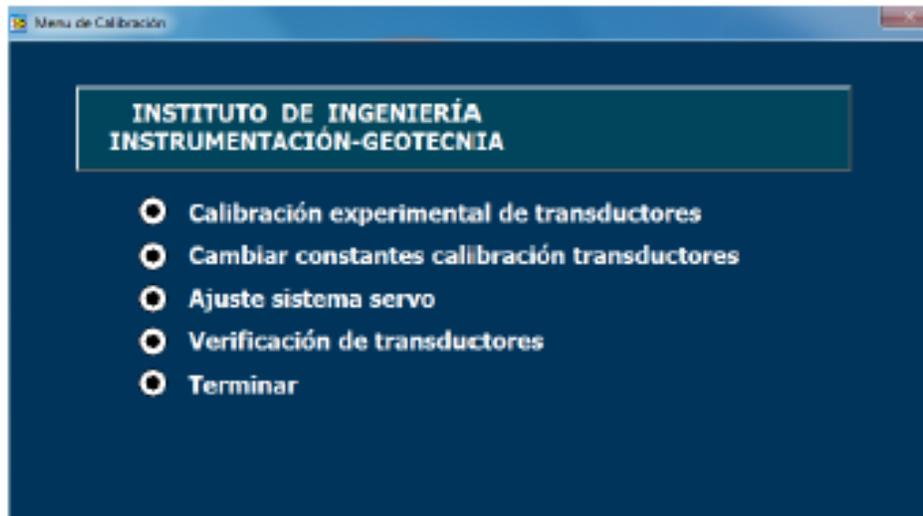


Figura 4-5 Menú del apartado de calibración del equipo, LabVIEW.

Una vez dentro del apartado de calibración habrá que seleccionar la opción de “Calibración experimental de transductores”, la cual despliega un nuevo menú (Figura 4-6), en donde se pueden observar diversos apartados de selección en el cual inicialmente se escoge la cámara y el transductor a calibrar. Posteriormente, se mostrarán los datos de la última calibración realizada, en donde se muestra la última fecha de la calibración registrada junto con su pendiente y ordenada de una función lineal que relaciona el Voltaje y la Unidad de medida del transductor seleccionado. Adicionalmente, se muestran los parámetros patrón que son las unidades de medida del sensor y la pendiente y ordenada de la misma. Los únicos casos en donde se llega a cambiar la pendiente de los parámetros patrón son en los transductores de presión que se calibran utilizando una columna de mercurio en donde la pendiente es la densidad del mercurio, y en el cambio volumétrico con el uso del área de bureta. Aclarado y seleccionado todos los puntos anteriores, se presiona “continuar” para comenzar con la calibración.

Cámara	Cámara 1	
Transductor	Carga 100%	
Datos de la última calibración		
Fecha de Calibración	viernes 22 de febrero de 2019	
Pendiente	15.161	Ordenada -2.761
Parámetros del patrón		
	Unidades	kg
Pendiente	1.00000	Ordenada 0.000

Continuar

Figura 4-6 Menú de calibración experimental de transductores.

Para los diferentes transductores existe un elemento patrón de calibración, el cual es necesario para poder realizar cada calibración experimental. En este caso se utilizan sólo tres elementos patrones que dependen del uso y medida que nos otorgue el sensor, dichos elementos son el tornillo micrométrico para calibración de LVDT, la columna de mercurio para calibración de sensores de presión y una bureta graduada con capacidad de 10 cm³ para poder tomar mediciones del sensor de cambio volumétrico.

A continuación se detallará el proceso de adquisición de datos del transductor de desplazamiento, LVDT. Primero que nada es necesario realizar el arreglo para la calibración de dicho sensor, como se observa en la Figura 4-7, conectando el núcleo del LVDT al tornillo micrométrico y colocando en el otro extremo el embobinado del LVDT. El núcleo debe estar nivelado y bien conectado al tornillo para evitar que se logre desconectar y perder la captura de datos.

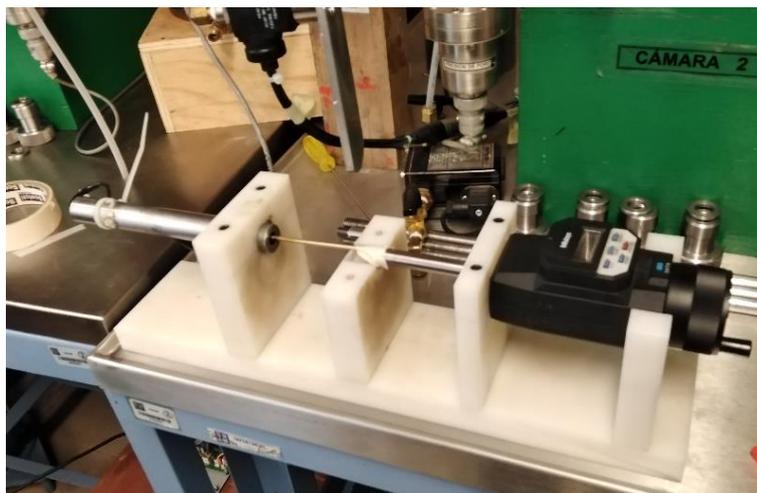


Figura 4-7 Arreglo de elemento patrón con transductor de LVDT.

Para realizar la calibración del elemento se debe considerar que cada transductor maneja un rango de voltaje. En el caso del transductor de desplazamiento se cuenta con un rango de voltaje de -10 a 10 volts, en donde para cada desplazamiento, medido en milímetros, se le otorga una unidad de medida en voltaje correspondiente, como se observa en la Figura 4-8. Se debe tener en consideración que al término de la calibración obtendremos un valor de pendiente y ordenada que se ajusta a la calibración previamente realizada. Para el caso de este sensor, se utilizaron medidas a cada 2 mm, comenzando desde 0 y hasta 46 mm, que es la capacidad del sensor.

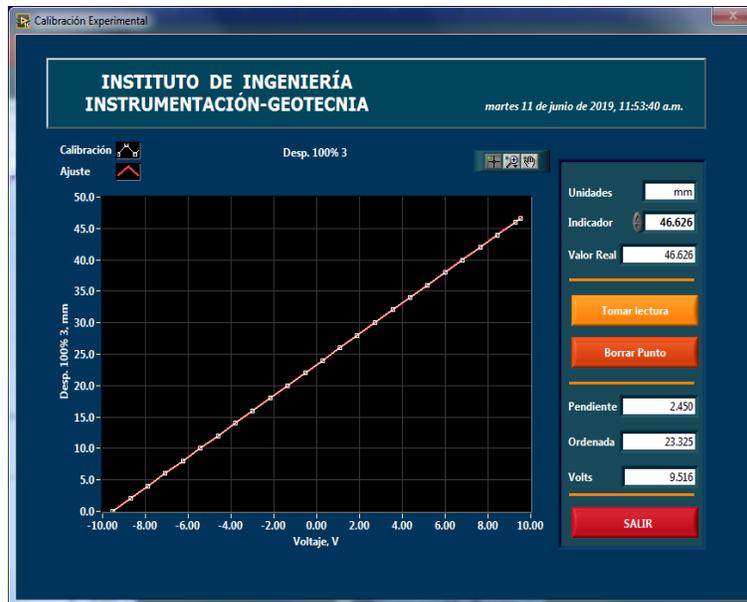


Figura 4-8 Curva de calibración experimental, con valores finales de pendiente y ordenada de la función lineal.

Al obtener la pendiente y la ordenada basta con presionar el botón “salir” para que el sistema guarde los cambios realizados y quede registrada la calibración.

Para la verificación de la calibración previamente realizada se utilizó el apartado de una etapa de prueba en donde se muestra la actividad del sensor en tiempo real. Esta verificación se realiza por medio de una hoja de Excel en donde se hace la comparación de la medición del elemento patrón contra lo que nos dice el sensor en tiempo real. A partir de la comparación del sensor y el elemento patrón podemos generar una curva en donde se observe la diferencia de valores entre ambas mediciones (Figura 4-9a). Además, se generó una curva de precisión del sensor en donde se pueda obtener el error parcial respecto al elemento patrón (Figura 4-9b).

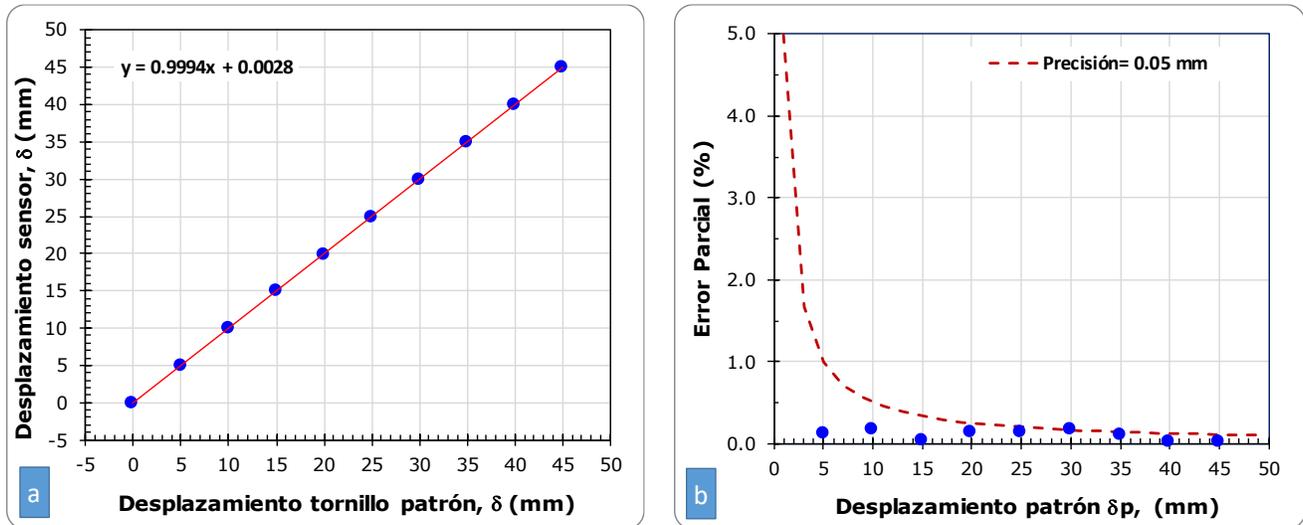


Figura 4-9 a) Curva de carga sensor contra carga patrón, además y b) curva de desplazamiento patrón contra error parcial, desplazamiento al 100%.

A continuación, se describen los factores más relevantes para calibración de cada transductor presente en el equipo:

- *Sensor de carga*: para la calibración de este sensor se tiene la consideración de que el sensor puede trabajar al 10, 20, 50 y 100% de su capacidad total correspondiente a 150 kg. Para cada calibración porcentual se deberá valorar el utilizar por lo menos el 50% de la capacidad del rango de medición. La calibración se realiza con pesas de varias medidas, en la cuales depende principalmente de la calibración porcentual a realizar; por ejemplo, para el caso del 100% se utilizan por lo general pesas de 4 y 3 kg hasta llegar a los 70 kg, y se realiza el arreglo de pesas como se muestra en la Figura 4-10.



Figura 4-10 Configuración para la calibración del sensor de carga al 100%.

- *Transductores de presión de confinamiento, contrapresión y presión de poro*: como se mencionó anteriormente, estos sensores necesitan del uso de la columna de mercurio como elemento patrón de medición, el arreglo para su calibración se hace por medio de una red de mangueras que conectan al

transductor con la columna de mercurio. Este es uno de los casos en donde previo a dar “continuar” en el menú de calibración experimental (Figura 4-6), se modifica la pendiente, utilizando la densidad del mercurio en kg/cm^3 , ya que por medio de esto lo único que habría de registrar en la ventana de calibración serían los centímetros de columna de mercurio que se generen para cada incremento de presión. Para la calibración de estos elementos se utiliza un 60% de la capacidad total de la línea de presurización.

- *Sensor de cambio volumétrico*: este es otro de los casos en donde previo a dar “continuar” en el menú de calibración experimental (Figura 4-6), se modifica la pendiente utilizando el área de bureta de la columna de agua en cm^2 , ya que por medio de esto lo único que habría que registrar en la ventana de calibración serían los centímetros de columna de agua. Para la calibración de este sensor es importante considerar el uso del elemento patrón para verificar la salida de agua del sensor, siendo así que para su calibración se habrá de hacer uso de la bureta que mantiene una columna de agua llena, e ir vaciando para cada lectura, aproximadamente 2 cm^3 de agua.
- *Sistema Servo*: la calibración de este sistema se realiza siempre y cuando el sensor de carga y de desplazamiento estén calibrados a los diferentes porcentajes de trabajo, cabe aclarar que cada vez que se realiza una calibración a estos transductores se deberá hacer la respectiva calibración del sistema servo. El sistema servo tiene como función principal alimentar de presiones al cuerpo del pistón en la parte superior de la cámara, la cual aplica la carga para la respectiva falla de las muestras. Hay dos modos de calibración del sistema servo y dependen principalmente del modo de falla al que se realice la muestra, siendo así, se presenta la calibración para el modo de falla por carga y la calibración para el modo de desplazamiento, en donde se puede ajustar la capacidad de dicho sensor dependiendo del esquema de pruebas. Se realiza armando el sistema con el uso de un elemento rígido en el caso de calibrar a carga, y en el caso de desplazamiento se utiliza un elemento deformable. El sistema aplicará un cierto porcentaje de la unidad de medida del modo al cual se calibre, y esto lo referenciará a un voltaje, posteriormente se deberá guardar dicha calibración para que se pueda utilizar el equipo de manera satisfactoria.

En la Tabla 4-1 se muestran las constantes de calibración y verificación de los sensores, además de la precisión con la que el sensor trabaja.

Tabla 4-1 Resumen de calibración y verificación de los transductores.

Calibración y Verificación de Transductores							
Sensor	Unidades	Capacidad	Porcentaje de calibración %	Constantes de calibración		Pendiente de verificación	Precisión
				Pendiente	Ordenada		
Celda de carga	kg	150	100	15.066	6.299	1.001	0.280
LVDT	mm	50	100	2.451	23.326	0.999	0.050
Confinamiento	kg/cm ²	7.5	-	0.446	2.843	1.010	0.020
Contrapresión	kg/cm ²	7.5	-	0.725	-0.021	1.005	0.030
Presión de Poro	kg/cm ²	7.5	-	0.421	2.696	1.001	0.030
Cambio Volumétrico	cm ³	33	-	9.403	7.743	1.005	0.210

5 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

5.1 Descripción de materiales

Las muestras fueron recibidas en tubos Shellby, las cuales se etiquetaron y registraron para su almacenamiento y correcto cuidado en el cuarto húmedo. En su mayoría son Sondeos Selectivos de diferentes profundidades obtenidas de depósitos de jales.

El material de estudio utilizado en la presente investigación es procedente de tres estados de la República Mexicana con diferentes características de sitio. Los residuos mineros de estudio son provenientes de las minas de:

- Cerro Náhuatl, ubicado en el municipio de Coquimatlán, en el estado de Colima.
- San Martín, ubicado en el municipio de Sombrerete, en el estado de Zacatecas.
- De un depósito minero del municipio de Charcas, en el estado de San Luis Potosí.

5.2 Propiedades índices

Los jales mineros estudiados presentan una clasificación por parte del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ASTM D 2487-11), en donde predominan los tamaños de partícula de limos. Para obtener la distribución ordenada de partículas por tamaño se utilizó una granulometría (ASTM D 422) por vía húmeda, en donde la principal razón de uso es debido al alto contenido de finos menores a 0.074 mm presentes en la muestra. Una de las limitaciones de esta investigación es que no fue posible realizar la distribución del tamaño de partículas con el uso de un hidrómetro para obtener la distribución de partículas finas. Para fines de ejemplificar el proceso de obtención de la caracterización geotécnica, únicamente se observa una muestra como ejemplo para el contenido de agua y límite líquido. En la Tabla 5-2 se muestra la caracterización obtenida de las tres muestras de estudio.

En la Figura 5-1 se muestra la curva granulométrica obtenida de los 3 depósitos mineros, donde se puede observar que la muestra con mayor presencia de arenas es la procedente de Colima. En la Figura 5-2 se presenta una comparativa de granulometrías obtenidas de diferentes depósitos mineros por parte de Blight (2010), en donde la granulometría predominante es de contenido de arenas y finos.

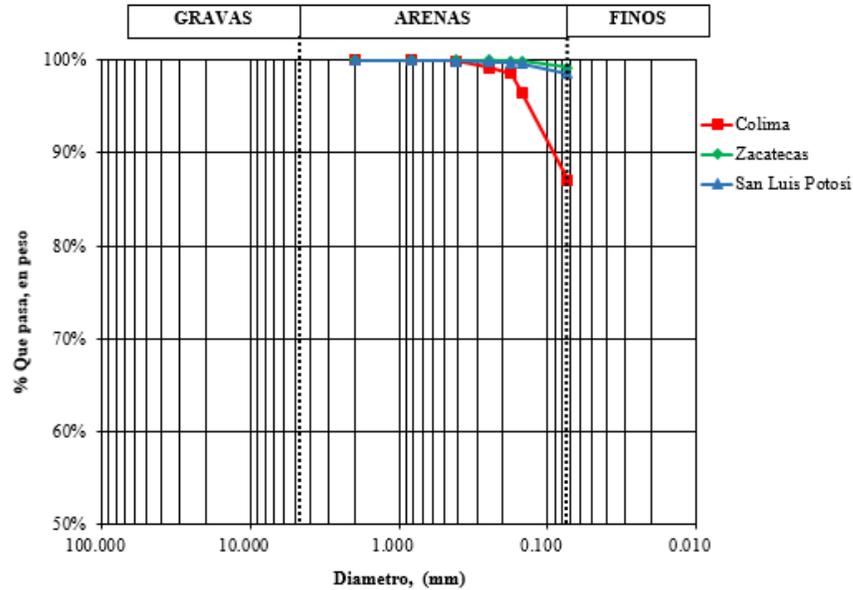


Figura 5-1 Curva granulométrica presentada para las tres muestras de estudio.

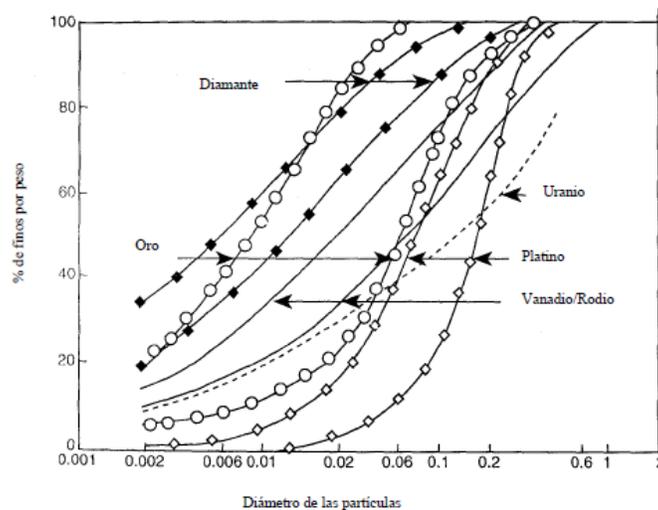


Figura 5-2 Análisis granulométrico típico para un intervalo de 1 a 0.001 mm obtenidos de diferentes procesos mineros (Blight, 2010).

Es evidente que la cantidad, tamaño y la forma de partículas de los jales depende del tipo de molienda a la que fue sometida la roca origen, y esto se debe principalmente a la optimización de los procesos de aprovechamiento y de la extracción de los minerales deseados con los menores costos (Fernandez & Ovando, 2018).

Para la densidad relativa de sólidos se utilizó la norma ASTM D 8545–20, la cual se siguió para cada muestra, en donde se utilizó el material remanente de cortes de probetas y sobrantes de la extracción del horizonte de tubo Shelby. Los valores obtenidos para cada sitio son: para el caso de Colima se obtuvo un valor de 3.12, para Zacatecas un valor de 3.32 y en la muestra de San Luis Potosí se obtuvo un valor de 2.98.

Respecto al contenido de agua, se utilizó la norma ASTM D 2216–10. En las muestras de jales de los tres sitios de estudio encontramos que su contenido de agua es mayor al 20%. El proceso de obtención del contenido de agua se puede observar con detenimiento en la Tabla 5-1, el cual fue obtenido por medio de 2 testigos de suelo procedentes de la extracción de la muestra del tubo Shelby.

Tabla 5-1 Contenido natural de agua de la muestra proveniente de San Luis Potosí.

Ensaye No.	Tara No.	Peso de tara+ suelo húmedo	Peso de tara + suelo seco	Peso del agua	Peso de la tara	Peso del suelo seco	Contenido de agua
		g	g	g	g	g	%
1	152	181.00	168.60	12.400	119.700	48.900	25.36
2	4	233.80	212.60	21.200	126.200	86.400	24.54

Para los límites de Atterberg o límites de consistencia, ASTM D 4318-10 se utilizó el método de cono penetrante (cono Sueco). Esto se debe principalmente a que en la muestra no fue posible obtener el límite plástico por medio de los rollitos (de 3 mm de diámetro) y tampoco el límite líquido con el uso del ranurador de arenas en la copa de Casagrande. Es evidente que el uso del ranurador de arenas debió de haber otorgado el límite líquido del material pero, debido a la incertidumbre que se puede manejar con la copa de Casagrande al obtener los límites líquidos, se prefirió usar conos penetrantes dada su facilidad y los resultados que brinda (Mendoza, 1998). Para la obtención de los límites líquidos se utilizó el cono sueco con características de un ángulo de 60° y 60 g de masa. Utilizando material remoldeado con diferentes contenidos de agua que nos brindarán cuatro penetraciones del cono, de las cuales dos de ellas deben quedar por debajo de los 10 mm de penetración y los otros dos restantes por arriba de dicha longitud, siendo que el límite líquido se encuentra a los 10 mm de penetración del cono, esto puede verse claramente en la Figura 5-3, donde se obtiene la curva de fluidez de la muestra de Zacatecas y su respectivo límite líquido. En lo que respecta al límite plástico, no se realizó el método convencional de los rollitos, ya que no se pudo hacer debido a la baja o nula plasticidad del material. Actualmente hay una relación en la que, por medio de conos penetrantes, en específico el cono inglés, podemos estimar el límite plástico. Dicho cono tiene las características de 30° y 80 g, y se obtiene con la penetración de 5 mm del mismo (Candelaria, 2018).

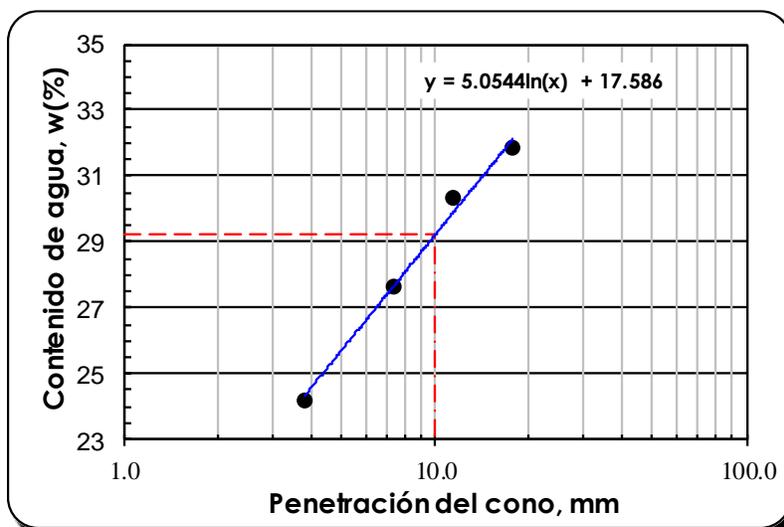


Figura 5-3 Curva de fluides de la muestra 2 de Sombrerete Zacatecas, con límite líquido de 29.22% de agua.

En la Tabla 5-2 se puede observar con mayor precisión los resultados del límite líquido, densidad de sólidos y clasificación de acuerdo al SUCS de las tres muestras para la realización de este trabajo.

Tabla 5-2 Resumen de propiedades de las muestras en esta investigación.

Localización	Sondeo	Muestra	Profundidad		Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Densidad de sólidos	Contenido de agua natural	Arenas	Finos	SUCS	
			Inicial	Final	w_L	w_p	IP	G_s	w	%	%		
			m	m	%	%	%	%	%	%			
Colima	BP-16	M-2	6.00	7.00	42.82	-	-	3.14	28.5	12.93	87.07	ML	Limo Arenoso
Zacatecas	SS-2-1	M-6	28.00	28.80	29.22	-	-	3.32	26.66	0.83	99.17	ML	Limo Arenoso
San Luis Potosí	SS-4-1	M-4	17.5	18.5	30.63	-	-	2.98	24.95	1.43	98.57	ML	Limo Arenoso

5.3 Labrado de probetas inalteradas

Para la elaboración de los ensayos de muestras inalteradas se utilizaron muestras obtenidas con tubo muestreador tipo Shelby. El manejo y conservación de las muestras fue de acuerdo a la Norma ASTM D 4220, grupo C (intacta, naturalmente formada o fabricada en campo). La preparación de la muestra se realizó de acuerdo con la Norma ASTM 4767 – 95, al igual que el montaje y el procedimiento de la prueba.

La extracción y labrado de la muestra se manejó cuidadosamente. Primero que nada se seleccionó la muestra del cuarto húmedo (Figura 5-4a) y se procedió con el corte del horizonte de aproximadamente 12 cm (Figura 5-4b), posteriormente se cortó el tubo utilizando un arco (en este paso se usa este medio manual ya que de utilizar medios mecánicos, como una sierra eléctrica, podríamos alterar a la muestra), el corte únicamente es del tubo, sin tocar a la muestra de suelo, puesto que la muestra es cortada por un alambre. Obtenido el horizonte se procedió a utilizar una broca para poder quitar fricción entre la muestra y el tubo (Figura 5-4c), y por ende que fuera más fácil su

extracción por medio de un sistema de pistón hidráulico (Figura 5-4d). Obtenida la muestra del tubo (Figura 5-4e), se debe tener el cuidado necesario para poder dividir la muestra en cuatro partes iguales (Figura 5-4f), de las cuales se obtuvieron las tres probetas inalteradas del mismo horizonte para la realización de las pruebas.

El labrado de la probeta fue de forma cilíndrica, haciendo una previa selección de uno de los cuatro pedazos de horizonte obtenidos de la división de la extracción (Figura 5-5a), al seleccionar una muestra esta debía carearse en caso de tener irregularidades en sus extremos que pudieran impedir el poder colocarla en el torno de labrado (Figura 5-5b). Una vez colocada en el torno, se procedió de manera manual a labrar la probeta (Figura 5-5c y d), la cual debía de conservar las restricciones de 3.3 cm de diámetro mínimo y una relación de esbeltez de 2 a 2.5, de acuerdo con la normatividad de la ASTM.

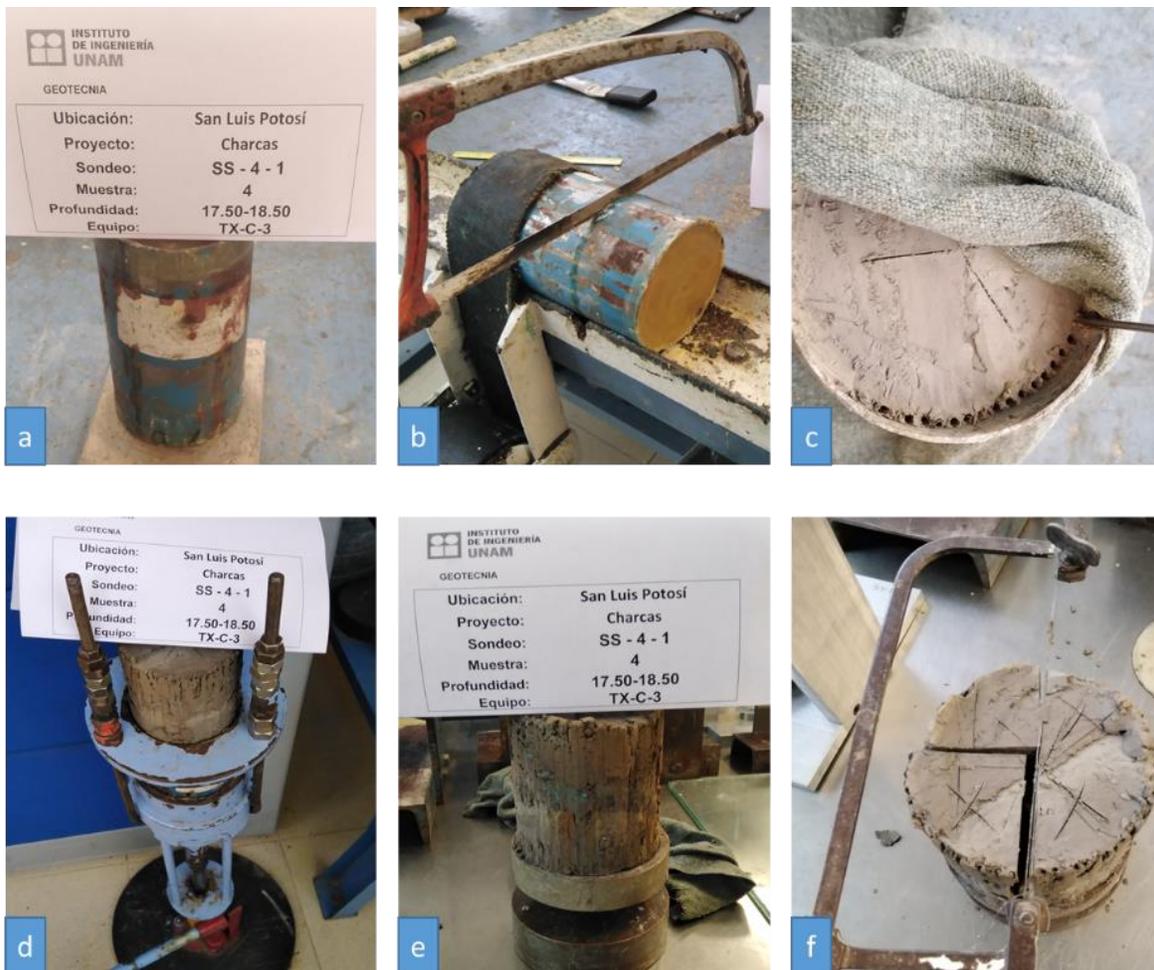


Figura 5-4 Proceso de extracción y corte de probetas inalteradas.



Figura 5-5 Labrado de probeta inalterada.

En la Figura 5-6 se puede observar una probeta labrada y colocada de cada muestra sobre el pedestal, lista para su montaje, en donde se aprecia que el material se ve prácticamente homogenizado en las muestras de Colima y Zacatecas (muestras 1 y 2) mientras que en la muestra de San Luis Potosí (muestra 3) se logra ver una clara estratificación, además de la presencia de un estrato arenoso. Únicamente se muestra una sola probeta, puesto que las tres probetas de ensayos son prácticamente similares.

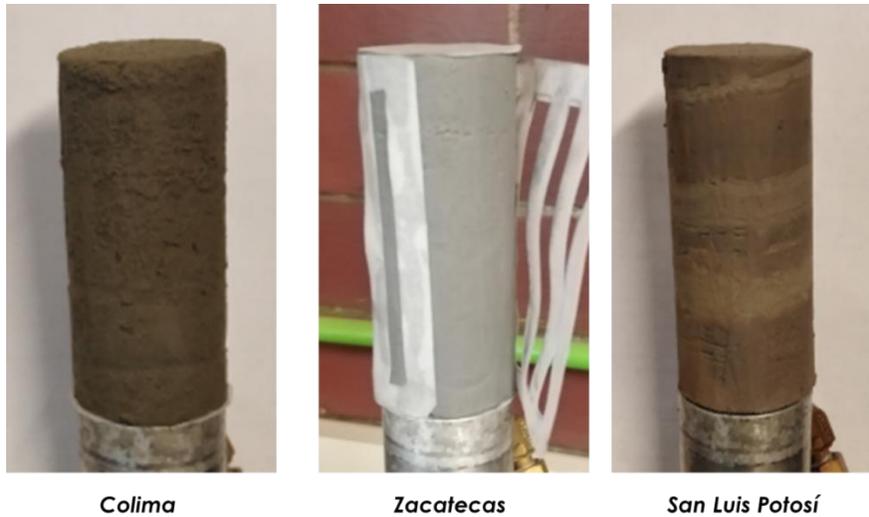


Figura 5-6 Probetas de cada sitio de estudio, en estado inalterado.

5.4 Formación de probetas reconstituidas

La mayoría de las pruebas realizadas en laboratorio de materiales granulares son realizadas por medio de probetas reconstituidas, debido principalmente a que su recolección en campo resulta ser sumamente difícil. Para el caso de esta investigación, el alto contenido de finos presente en las muestras nos permite obtener muestras inalteradas de campo, lo que permite un buen manejo de las mismas.

Uno de los factores más importantes dentro de la presente investigación es el método de reconstitución. Dentro de la historia de la ingeniería se han registrado diversos métodos para la reconstitución de probetas en laboratorios, en donde todas muestran particularidades que las hacen únicas. El método de reconstitución estática para esta investigación es un método sencillo, práctico, de rápida elaboración y que utiliza equipo básico.

De acuerdo con el tipo de disposición del material en campo, como se comenta en los antecedentes de este trabajo, el proceso de disposición de los residuos mineros genera que éstos se sedimenten de forma lenta, es evidente que el proceso de formación de las probetas reconstituidas para ésta investigación no es similar al proceso de formación en campo, ya que se utiliza un método más rápido y fácil para poder reconstituir probetas con las mismas características volumétricas que las de campo, aunque también hay que considerar la existencia de otros métodos de reconstitución (e.g. compactación por amasado y pluviación). El método de pluviación conlleva un proceso complejo para la reconstitución de probetas, aunque dicho método presenta ligeras ventajas frente a los métodos vibratorios y de apisonamiento para la formación de probetas de arena, siendo que se presenta una menor segregación y mayor reproducibilidad. Al mismo tiempo que las probetas son relativamente homogéneas y su microestructura se asemeja a la de un suelo depositado naturalmente por sedimentación (González & Romo, 2015).

Sin embargo, uno de los problemas más grandes respecto a los fundamentos de esta investigación es que el método de pluviación no maneja relaciones volumétricas controladas, lo cual no permite obtener una similitud en las propiedades respecto a su homóloga, en este caso la probeta inalterada. Aunque el método de pluviación demuestra ser el método más adecuado para poder reproducir en laboratorio una sedimentación de campo; en la presente investigación queda aún lejano su uso, por esta razón mostramos que su aplicación no puede ser posible, aunque la realización de ello nos brinde probetas ligeramente más homogéneas. El uso de métodos de pluviación no queda descartado para futuras investigaciones, pero podría ser utilizado siempre y cuando se haya realizado un estudio previo del arreglo adecuado para su uso, el tiempo estimado de consolidación (i.e, semanas o meses de duración) o la aplicación de una carga axial inducida para acelerar el proceso de consolidación. En donde con el uso de esta información podríamos obtener probetas que tengan un tratamiento similar a un proceso de sedimentación, pero lo cual no garantizaría que se obtuviera una similitud de propiedades volumétricas a las de probetas inalteradas, y con ello no se podría tener un punto de partida para su comparación. Con lo antes expuesto, mostramos que el uso del método de compactación elegido queda restringido al usuario y a la investigación previa realizada. Es por ello que en esta investigación se utiliza un método de compactación estática, en donde los resultados son muy similares respecto a las propiedades volumétricas de muestras reconstituidas e inalteradas y, además, el tiempo de ejecución es menor comparado con el método de pluviación.

El uso de la compactación de suelos por diferentes métodos tiene la principal función de reducir la relación de vacíos a través de una expulsión de aire por medio de la aplicación de energía mecánica, lo cual permite que ésta se densifique y experimente un incremento en su resistencia (Budhu, 2000). Las técnicas usadas en laboratorio con métodos basados en el uso de martillos y apisonadores presentan particularidades que nos permiten observar su efectividad. Al momento de considerar los criterios de esta investigación, y como ya se mencionó antes, encontramos que las propiedades más importantes a asemejar con la muestra inalterada son la relación de vacíos y el peso volumétrico seco de la muestra.

El hecho de que se utilicen únicamente las dos propiedades antes mencionadas se debe a que el uso del peso volumétrico seco no cambia con la variación del contenido de agua en la estructura del suelo; es decir, se dice que se mantiene constante bajo diferentes grados de saturación. El peso volumétrico de la muestra no se usó puesto que si se utiliza habría que usarse el mismo contenido de agua de la muestra inalterada y de acuerdo a González (2019) si se usa un contenido de agua mayor al 20% las probetas no se pueden reconstituir. La relación de vacíos es una propiedad intrínseca de los suelos, en donde se determina la cantidad de volumen de vacíos por la cantidad de volumen de suelo.

Por otro lado, el método de apisonamiento puede dividirse en dos métodos, el método de amasado y el de compactación estática, dichos métodos consisten en compactar aplicando una carga cuasi-estática en capas

sucesivas del material. En donde el peso volumétrico de la probeta está preestablecido y puede ser controlado por un ajuste de peso y volumen del material que se le aplique en cada capa. Estos métodos de compactación tienen la ventaja de ser un método en donde su sencillez es su particularidad más grande, y además se puede tener el control de la densidad en la probeta, incluso para condiciones sueltas. Es evidente que estos métodos no simulan la sedimentación natural del suelo, pero garantizan una mejor distribución de partículas.

Las formaciones de estas probetas generan una estructura diferente del suelo, ya que al aplicar la carga por el método de amasado generamos una presión por cargas puntuales, mientras que por el método estático generamos una carga uniformemente distribuida, lo cual evidentemente tiene repercusiones directas en la densificación del material. En segunda instancia, tenemos el procedimiento de reproducción, en donde para las pruebas de amasado se necesita un trabajo previo, en el cual se debe realizar una calibración del equipo de apisonamiento respecto a una variación del contenido de agua, lo cual requeriría hacer un esquema de trabajo mucho más elaborado; mientras que para las probetas reconstituidas estáticamente encontramos que sólo necesitamos un contenido de agua definido por el usuario y hacer los cálculos necesarios para obtener las relaciones volumétricas solicitadas.

Debido a estas razones, es que el método de reconstitución estática es presentado como un método de fácil elaboración y alta practicidad respecto a otros métodos, además, de reproducir las condiciones volumétricas de las muestras inalteradas. Aunque también dentro de esta investigación se busca encontrar si el uso de probetas de suelo obtenidas con este método nos muestra una mejor similitud en el comportamiento esfuerzo-deformación de la probeta inalterada.

Para la formación de las probetas reconstituidas se utilizó un molde bipartido con dimensiones de 3.6 cm de diámetro y 9 cm de altura (Figura 5-7). Para la elaboración de la probeta fue necesario contar con el peso volumétrico seco de la probeta inalterada y su relación de vacíos, puesto que éstas son las condiciones más importantes para la reconstitución de las probetas en esta investigación y debido también a las razones que ya se explicaron con anterioridad. Las probetas son formadas por la aplicación de carga distribuida sobre cinco capas de material, el cual es colocado en el molde bipartido y compactado con el uso de un pisón. Para poder reconstituir una probeta de suelo, es necesario tener las relaciones volumétricas de la muestra homóloga inalterada, para poder realizar la cuantificación de suelo y agua a utilizar, que se muestra a continuación.

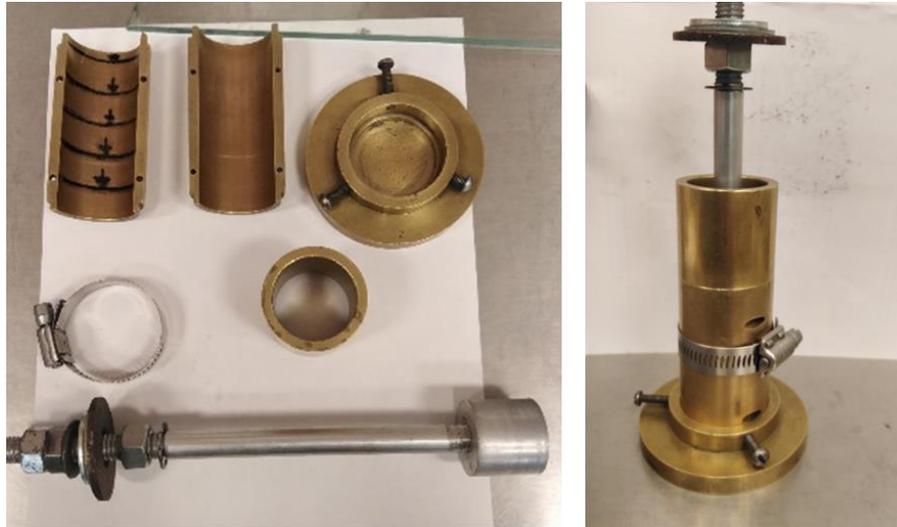


Figura 5-7 Piezas para el molde bipartido y su conjunto.

Siendo así, se procedió a hacer los cálculos necesarios de agua y material seco para la conformación de la nueva probeta. A continuación, se presentan los cálculos con los cuales se pasó a hacer la cuantificación del material, además de la cantidad del material correspondiente a cada capa de la probeta.

Primero que nada, se debe obtener el peso volumétrico seco de la probeta:

$$\gamma_{d\text{inalterado}} = \frac{W_{ss}}{V_m} \quad (5.1)$$

El volumen del molde a partir de los 3.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura de probeta:

$$V_{molde} = \frac{(D)^2 * \pi}{4} \quad (5.2)$$

Sustituyendo el volumen de la muestra de la ecuación de peso volumétrico seco por el volumen del molde, tenemos:

$$\gamma_{d\text{inalterado}} = \frac{W_{ss}}{V_{molde}} \quad (5.3)$$

Donde los valores de $\gamma_{d\text{inalterado}}$ y V_{molde} son valores determinados, por lo tanto esto nos brinda el peso del suelo seco:

$$W_{ss} = \gamma_{d\text{inalterado}} * V_{molde} \quad (5.4)$$

Para la reconstitución de la probeta se utiliza el peso del suelo seco y además un peso de agua equivalente al 10% de contenido de agua de la probeta, el uso de contenido del 10% tiene la principal función de brindar probetas que

nos generen un buen manejo del material durante el desarrollo de la reconstitución. Siendo así que el paso siguiente consta de obtener el peso del agua y el peso de la muestra total.

$$W_{ss} = \frac{W_m}{1 + W_w} \quad (5.5)$$

Donde el contenido de agua será de 10%. Para obtener el peso total de la muestra tenemos que:

$$W_m = W_{ss} * (1 + 0.1) \quad (5.6)$$

En donde, al obtener el peso de la muestra y tener el peso del suelo seco, el peso del agua se obtiene por medio de una resta:

$$W_m = W_{ss} + W_w \quad (5.7)$$

Así, se obtienen los pesos de suelo seco y el agua a utilizar, además de tener el peso de la muestra final.

Al obtener el peso de la muestra bastará con dividir entre las cinco capas de su formación para saber el peso correspondiente a cada capa. Además, se sabe que la altura de cada capa es la quinta parte de la altura total de la probeta al final (8.5 cm), es entonces, que cada capa deberá de considerar una altura de 1.7 cm. Siendo así, al final de los cálculos obtenemos el peso necesario para cubrir el volumen por capa, el peso de la probeta y su volumen, para así poder obtener el peso volumétrico seco de la muestra, el cual deberá ser muy similar al de la probeta inalterada. Posteriormente a la cuantificación del material se procede a realizar la preparación del mismo.

5.4.1 Preparación del material

La muestra inalterada al ser fallada y retirada de la cámara pasa por un proceso de secado en el horno y posteriormente es reutilizada para la formación de las probetas reconstituidas. Primero se debe disgregar el material por medio del uso de un pisón con base de caucho en una charola (Figura 5-8a) únicamente aplicando el peso propio del pisón, teniendo la cuantificación del material a utilizar se procede a obtener el peso del suelo y del agua necesarios para la reconstitución (Figura 5-8a y b); para la presente investigación se utilizó un mortero como recipiente de base para poder realizar la mezcla homogénea del material (Figura 5-8d y e). Posteriormente, se procede a llenar cinco cápsulas con el peso del material homogéneo que se calculó previamente, al término de la distribución de material en las cápsulas, éstas deben ser protegidas con el uso de un trapo húmedo, con el fin de que no se tenga pérdida de humedad por parte del material (Figura 5-8f). Además, se debe obtener un primer registro de testigo de la muestra para poder corroborar el contenido de agua que se calculó.



Figura 5-8 Proceso de homogenización y separación por capas del material para reconstitución.

5.4.2 Compactación del material

Para dar paso a la compactación debemos tener en cuenta que habrá ciertos materiales y herramientas a utilizar, siendo así, previamente se debió de haber colocado un poco de aceite de silicón al molde bipartido utilizado (Figura 5-7), esto se debe hacer principalmente por la aplicación de la carga a la muestra, ya que, el material puede tener una adherencia a la pared del molde y su extracción sería muy difícil al grado de que la probeta podría romperse. Teniendo las cápsulas con material, se disgrega el material húmedo nuevamente para que no queden grumos de gran tamaño y posteriormente se vierte al molde la primera cápsula, enseguida se procede a aplicar una carga con el pisón y la pesa en uso (Figura 5-9a). Es importante mencionar que se utilizó un tiempo de 25 s de aplicación de carga, pero además para corroborar, al retirar la pesa y el pisón se observó que el material compactado quedara del tamaño que debía (i.e., cercano a 1.7 cm de altura) (Figura 5-9b), esto se puede observar con ayuda de las franjas que el molde presenta en su interior (Figura 5-7) y así proceder con la siguiente capa de la probeta. El

proceso termina cuando las cinco capas se han colocado y verificado que su tamaño sea cercano a los 8.5 cm de altura predefinidos (Figura 5-9c), para poder proceder con la extracción de la probeta reconstituida con el uso del vástago y con sumo cuidado. Al término de ello se deben obtener mediciones de la probeta, en donde se consideran la altura, diámetros superior, inferior y medio, además del peso de la probeta para poder obtener sus relaciones volumétricas (Figura 5-9d). Por último, la probeta es resguardada en una jerga semi-húmeda para que no pierda humedad y poder continuar con su montaje en el equipo triaxial. En la Figura 5-10 se pueden apreciar las muestras obtenidas de la reconstitución de los sitios de estudio.



Figura 5-9 Proceso de compactación de probeta reconstituida.

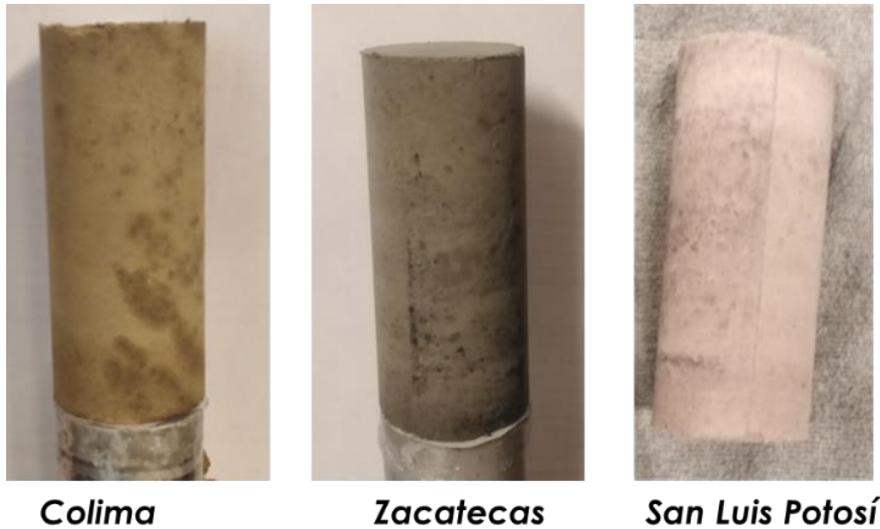


Figura 5-10 Muestras reconstituidas a punto de ser montadas.

5.5 Procedimiento del ensaye

La prueba consiste en colocar una muestra de suelo representativa de forma cilíndrica en un equipo triaxial, a la cual se le induce un esfuerzo de confinamiento y una variación de esfuerzo axial hasta lograr su falla, en donde la diferencia de ello da como resultado el esfuerzo desviador, siendo este último la razón principal de la realización de la prueba, y en el cual inferimos la falla por corte de la muestra, para poder obtener la curva esfuerzo desviador-deformación unitaria, en una prueba a deformación controlada.

En este trabajo de investigación y de acuerdo con la Norma ASTM D 4767 95, es importante recalcar que previo a la etapa de montaje se debe realizar el acondicionamiento adecuado del sistema, que a continuación se describe:

- Limpieza de la cámara triaxial, asegurando que no existan residuos de material que puedan comprometer la prueba.
- Lavado de discos porosos, por medio de agua caliente por lo menos 10 minutos y limpieza con aire a presión.
- Saturación de líneas de drenaje o líneas de conducción de agua.
- Mantener los discos porosos húmedos, previos a la prueba, al igual que los papeles filtro, Figura 5-11c. El uso de la rejilla de papel filtro que marca la norma se utilizó únicamente en pruebas inalteradas debido a que en las pruebas reconstituidas no se mantenía fija y provocaba problemas al momento del montaje.
- Tener la membrana de látex adecuada y preparada junto con el sistema para su montaje, sin perforaciones y en buen estado.

- Previo al montaje, deberá estar listo el sistema de membrana en el tubo de media caña para la colocación en la probeta de suelo, en donde tendremos cuatro aro-sellos colocados en el tubo de media caña, dos por arriba y dos por debajo; posteriormente, se colocará la membrana que por medio de vacío será replegada a la pared del tubo, Figura 5-11a y b. Y además, ya deberán estar colocados los discos porosos, Figura 5-11d.



Figura 5-11 Acondicionamiento del equipo previo a la prueba.

Cabe aclarar que este proceso de acondicionamiento se hace previo al labrado de muestra inalterada y también antes de la reconstitución de probetas, debido a que en ocasiones puede tomar un tiempo considerable.

Posteriormente, con el uso del programa se procede con la configuración de la prueba que se quiera realizar. En donde el programa en primera instancia proporciona un panel de control de uso, como el que se muestra en la Figura 5-12. El menú principal de configuración proporciona la visualización de varias etapas que se pueden encontrar en una prueba triaxial, (i.e., configuración de la prueba, transductores, esfuerzo de confinamiento, saturación por contrapresión, medición del parámetro B de Skempton, consolidación y por último la falla).



Figura 5-12 Menú de etapas de pruebas triaxiales, Instituto de Ingeniería.

Para comenzar con la prueba triaxial se tendrá que configurar la prueba para poder realizarla, Figura 5-13. Dentro de la configuración de la misma encontramos apartados como:

- Datos generales de la prueba (e. g. sondeo, muestra, profundidad y observaciones etc.) (Figura 5-13).
- Dimensiones de la probeta (e. g. peso de la probeta, diámetro promedio y altura de la probeta).
- Características del suelo (e. g. densidad de sólidos, granulometría, límite líquido etc).
- Carpeta para almacenamiento de los datos de cada etapa, que tiene una relación con la pestaña con el archivo.
- Falla, dentro de las opciones que encontramos en este apartado se puede observar que podemos elegir entre dos modos de falla, Carga controlada y Deformación controlada, en donde el primer modo de falla tiene de límite una cierta aplicación de carga máxima y el segundo modo de falla tiene el límite de desplazamiento del pistón, esto quiere decir que la probeta se deforma a una cierta dimensión. Además, encontramos un periodo o intervalo de tiempo en el cual la prueba fallará, este dependerá de cada usuario y del tipo de prueba a realizar (Figura 5-14).
- Vector de tiempo, el cual consta de un archivo preseleccionado que asigna en qué intervalos de tiempo se hará la asignación de datos y el tiempo máximo de duración que pueda utilizarse para que pueda tomar registros de los datos.
- Además, en este apartado se determina el tipo de prueba que se puede realizar: UC, UU, CU o CD.

Al término de la configuración de la prueba se podrán actualizar los datos y continuar con el proceso de la prueba. Habrá que considerar que esta etapa de configuración se hace previo al montaje de la prueba.

Figura 5-13 Configuración del ensayo, Generales.

Figura 5-14 Configuración del ensayo, Falla.

5.5.1 Montaje

Esta etapa tiene una importante relevancia dentro del proceso de la prueba, ya que, de cometer un error, podría tener repercusiones en las siguientes etapas y hasta en los resultados. Previo a este montaje se debe cerciorar que el acondicionamiento realizado al equipo fue elaborado de manera correcta y que esto no comprometerá al equipo ni a su trabajo. Acondicionado el equipo y configurada la prueba se puede dar paso al montaje de la misma, la probeta inalterada o reconstituida se coloca y apoya en el pedestal (Figura 5-16a), en donde, por medio del arreglo de tubo de caña y la membrana (Figura 5-11b) se pone a la misma altura de la probeta (entre el pedestal y el cabezal superior), una vez colocada se quita el vacío y la membrana de látex quedará replegada a la probeta.

Posteriormente, se acomoda la membrana a lo largo de la muestra y se colocan los aro-sellos que están en el tubo de media caña (dos en el pedestal y dos en el cabezal superior), lo cual funcionará como un medio de restricción para que el agua que confina la muestra no logre entrar a la probeta (Figura 5-16b). A continuación, se acondiciona la camisa de acrílico, la cual deberá llevar grasa de silicón en su base y en el extremo superior, a fin de que funcione como un empaque para que no existan posibles fugas de agua. Se colocará la camisa de acrílico, cuidando que los aro-sellos de la base de la cámara no estén mal colocados. Revisado esto, se puede levantar el pistón y el sistema neumático para su colocación (Figura 5-16c), embonando perfectamente la camisa con el cuerpo del pistón. Ahora bien, como se tiene el cuerpo del pistón y además el cabezal superior, es necesario asegurarse que la unión de estos dos elementos sea correcta para que funcione como uno solo al momento de la aplicación de carga axial en la etapa de falla de la prueba. Es por ello que se debe hacer empatar el pistón y el cabezal por medio del uso de un aro-sello entre ellos y también grasa de silicón, además de usar un sistema de vacío que nos permita observar si existe un contacto entre ellos (Figura 5-16d). Considerado lo anterior y listo el sistema pistón-cabezal en unión, es posible dar paso a la colocación de las varillas y de las tuercas de seguridad, las cuales constan de cuatro barras de acero que sujetan el cuerpo del pistón a la base de la cámara y son retenidos por las tuercas (Figura 5-16e), todo esto se debe hacer teniendo sumo cuidado de no aplicarle carga a la muestra, debido a que el cuerpo del pistón baja y esto podría dañar a la muestra (e.g., fracturando o dañando el cuerpo de la misma), esto se puede revisar por medio de la pantalla de transductores, en donde si se llegase a mover el sensor de carga, se observaría una aplicación de carga a la muestra; sin embargo, esto se puede arreglar subiendo un poco el pistón (Figura 5-15). Una vez colocado todo en su lugar de manera correcta, se puede dar paso al llenado de la cámara triaxial con agua destilada, que será el líquido confinante que aplicará un esfuerzo isotrópico al presurizarla. En este proceso se utilizan aproximadamente 3.5 litros de agua (Figura 5-16f).



Figura 5-15 Sistema de transductores en tiempo real.



Figura 5-16 Etapa de montaje.

5.5.2 Saturación por contrapresión

El uso de saturación por contrapresión es un mecanismo utilizado para inyectar agua a presión sobre la probeta, mientras se encuentra comprimida en la cámara, el uso de la contrapresión hace fluir el agua que se encuentra en la bureta hacia la probeta. El objetivo de la saturación de la probeta es reducir el volumen de aire, llenando los espacios vacíos con agua des-aireada. El procedimiento consiste en aplicar un esfuerzo confinante a la muestra, seguido de un esfuerzo de contrapresión, en el cual exista una diferencia de presiones, llamada esfuerzo efectivo de saturación. Para el presente trabajo de investigación se manejaron esfuerzos efectivos de 0.03 a 0.10 kg/cm², el uso de este valor se debe principalmente a que el material utilizado presentó bastantes dificultades para saturar en casi todas las pruebas (principalmente probetas inalteradas); además, se consideró también la precisión de los sensores, lo cual es una variable muy importante puesto que si los transductores no permiten dentro de su precisión el valor solicitado de esfuerzo efectivo de saturación, se tendría que aumentar dicho valor. Al aplicar los esfuerzos,

la línea de conducción que va directo a la probeta comienza a inyectar agua a presión, esto provoca un aumento de volumen de agua. Dentro del procedimiento se van haciendo incrementos de presiones, los cuales tendrán un registro del agua des-airada que entra en la probeta (Figura 5-17). De igual manera, este registro se mantiene con el uso de la bureta, permitiendo hacer una comparación en lo que registra el sensor de cambio volumétrico y lo que se registra por medio de la bureta, ambos volúmenes de entrada se comparan y deberán empatar con un valor aproximado. El término de la etapa llega cuando se cumple con el parámetro de la B de Skempton.

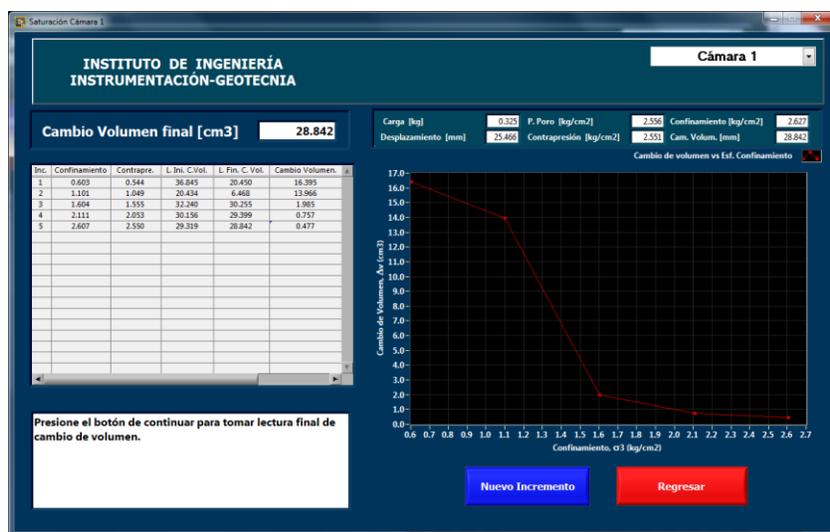


Figura 5-17 Proceso de saturación y registro de datos de acuerdo a cada incremento realizado en una prueba.

5.5.3 Parámetro B de Skempton

De acuerdo con la norma ASTM-D 4767 95, la etapa de saturación termina cuando el parámetro B de presión de poro es mayor o igual a 0.95. El parámetro B está determinado por una relación entre el incremento de la presión de poro (Δu) y un incremento de presión de confinamiento ($\Delta \sigma_3$) que se aplica a la muestra, sin permitir el drenaje:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (5.8)$$

Para proceder con ello es necesario cerrar las válvulas de drenaje, tanto del pedestal como del cabezal superior, donde con ello aseguramos que no exista una consolidación de la muestra. Posteriormente, se cierra la llave de confinamiento y se toma lectura inicial de este confinamiento, después se aplica un incremento en la presión de confinamiento, para este caso se utilizaron incrementos de presión de 1 kg/cm² para todas las pruebas, y se toma su lectura, hasta este momento la llave de confinamiento sigue cerrada. Para el caso de la presión de poro, la lectura inicial se toma en el instante en que se dejó de saturar la probeta, y posteriormente, solo se deja la llave del sensor de presión de poro abierta para poder leer su incremento respecto al cambio de confinamiento. Hecho esto, se

puede abrir lentamente la llave de confinamiento, lo cual provocará que la presión de poro incremente como se muestra en la Figura 5-18, cuando la presión haya experimentado un incremento y llegue a un límite en donde se estabilice y no se presenten cambios en la presión de poro, se dice que terminó la medición y se revisa el valor obtenido (Figura 5-19). En caso de no sea igual o mayor de 0.96 (valor establecido como mínimo para este proyecto), se tendrá que dar otro incremento de saturación. Para el caso en donde se cumpla con un registro igual o mayor a 0.96, se podrá proceder a la consolidación.

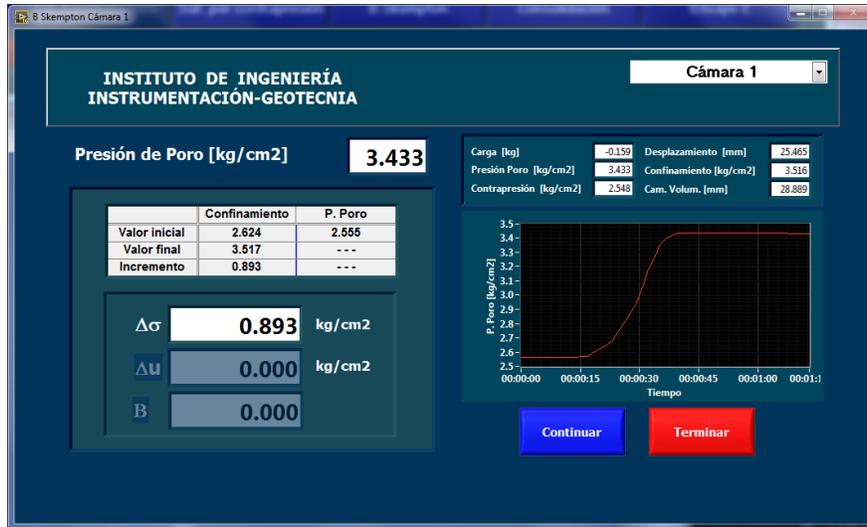


Figura 5-18 Incremento de presión de poro respecto al tiempo, al abrir la llave de confinamiento.



Figura 5-19 Medición del parámetro B de Skempton.

5.5.4 Consolidación

Una vez obtenido el parámetro B de Skempton superior al 0.96, se procede con la etapa de consolidación. Este proceso tiene como objetivo permitir que la muestra alcance un estado de equilibrio en una condición drenada con la aplicación de un esfuerzo efectivo de consolidación, en donde la muestra presentará inicialmente un incremento de presión de poro y, al estar en una condición drenada, se producirá un cambio de volumen a causa de la expulsión de agua.

El esfuerzo efectivo de consolidación se determina por medio de la diferencia del esfuerzo de confinamiento y el esfuerzo de contrapresión aplicado en la probeta. Para ello, lo único que se realiza es el incremento del esfuerzo de confinamiento a fin de obtener el esfuerzo efectivo de consolidación.

$$\sigma'_{consolidación} = \sigma_{confinamiento} - \sigma_{contrapresion} \quad (5.9)$$

Cabe aclarar que el esfuerzo efectivo de consolidación es el esfuerzo que se aplica a la probeta y el cual se mantendrá hasta el término de la falla. Una vez obtenida la diferencia, es aplicado el confinamiento en la cámara, lo cual provoca un aumento en la presión de poro, es entonces cuando se toma registro de la máxima presión de poro a la que el agua dentro de la probeta llega. Al obtener el registro de la presión de poro máxima alcanzada y al estabilizarse, se procede a abrir una llave de drenaje, en este caso se abre la llave del drenaje superior, con la abertura de esta llave es evidente la expulsión de agua de la estructura de la muestra y un decremento del exceso de presión de poro, hasta que ambas se estabilizan (Figura 5-20). Esta disminución del volumen de agua en la probeta es registrada por medio del sensor de cambio volumétrico. Las muestras utilizadas en esta investigación se consideraron consolidadas cuando la presión de poro es similar a la presión de contrapresión, lo cual indica que se ha disipado el exceso de presión de poro, y además cuando ya no hay expulsión de agua de la muestra. Los jales tienen un tiempo de consolidación de presión de poro de aproximadamente de entre 30 minutos y 4 horas (dependiendo del porcentaje de finos que tenga la muestra), aunque las muestras fueron consolidadas 24 horas, para estandarizar esta etapa en todos los ensayos.



Figura 5-20 Registro del proceso de consolidación, en donde se muestra la curva de consolidación y la curva de disipación de presión de poro.

5.5.5 Falla

En la etapa de falla el sistema aplica un esfuerzo desviador axial por medio de la aplicación de carga, lo cual provoca una compresión y la falla por cortante de la probeta.

Debido a que en la etapa de falla es negado el drenaje por ser una prueba tipo CU, al término de la consolidación se tendrán que cerrar las líneas de drenaje. Para comenzar la falla, primeramente, se tiene que realizar un ajuste del sistema cabezal superior con el pistón, de tal manera que este sistema quede en contacto con la probeta, esto se hace ya que, en ocasiones, por la aplicación de confinamiento en la cámara, el pistón puede ser ligeramente levantado y esto podría implicar que no se tenga contacto entre el pistón y la probeta, evitando ejercer carga a la probeta. El sistema está configurado para aplicar una deformación controlada de 18 mm en 6 horas, lo cual nos brinda una tasa de cambio (velocidad de deformación) de 0.05 mm/min (Figura 5-21). Previo a la falla, se debe verificar que el sensor de presión de poro se encuentre listo para registrar las lecturas durante toda la prueba, esto al igual que el confinamiento.

Durante la etapa de falla se puede observar un comportamiento lineal de la curva tiempo-desplazamiento (cuya pendiente corresponde a la velocidad de aplicación del desplazamiento), lo cual explica que el ensaye se está ejecutando a desplazamiento controlado, también se observa el comportamiento de la aplicación de carga, y la variación de la presión de poro, esto es con el propósito de poder observar lo que sucede con la prueba durante la falla, donde se puede apreciar si el comportamiento es contractivo o dilatante (Figura 5-22).



Figura 5-21 Configuración de la falla estática de una prueba Triaxial del tipo CU.



Figura 5-22 Término de la falla estática, donde se muestra la variación del desplazamiento, carga y presión de poro; muestra inalterada de Zacatecas con $\sigma' = 2.00 \text{ kg/cm}^2$.

En la Figura 5-23 se pueden observar diversas probetas en el proceso de culminación de la etapa de falla, probetas aún dentro de la cámara y después de la falla. Es importante resaltar que en las muestras inalteradas de Colima (Figura 5-23a) y Zacatecas (Figura 5-23b, c, d) se observa una forma abarrilada de la probeta durante la falla y, en consecuencia, se tiene una mayor disipación de la presión de poro. Para el caso de probetas reconstituidas (Figura 5-23a, d), se observa que la forma abarrilada de las probetas no es tan notoria como en las muestras inalteradas (Figura 5-23b, c, e, f), por lo cual esto podría provocar que la presión de poro sea mayor. Esto es una simple observación con respecto a lo que se puede ver en las imágenes obtenidas, puesto que no se tienen archivos fotográficos de todas las pruebas en la etapa de falla.



Figura 5-23 Probetas previo a culminar la etapa de falla o ya falladas.

6 PRESENTACIÓN DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se expone el análisis de los datos obtenidos a partir de las pruebas triaxiales, en donde se muestran las características de las probetas ensayadas, el proceso de saturación y consolidación realizados, en las que se puede observar la variación del cambio volumétrico y la disipación de presión de poro. Además, se presentan los resultados obtenidos en la falla de las probetas, mostrando las curvas de esfuerzo desviador - deformación unitaria axial y las curvas de presión de poro - deformación unitaria axial. También, se exponen los parámetros mecánicos derivados de las pruebas realizadas por medio del criterio Mohr-Coulomb en esfuerzos totales y efectivos. De igual forma, se explican las curvas de trayectorias de esfuerzos p' - q y la relación que tienen con el ángulo de fricción efectivo.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, las series ensayadas en la presente investigación son procedentes de diferentes sitios. Para el estudio se obtuvieron tres probetas del mismo horizonte, consideradas como probetas Inalteradas (Inalt), después de su ensaye el material pasó por un proceso de secado por medio de un horno en donde el material se volvió a utilizar para hacer las probetas reconstituidas (Rec). Cabe recalcar nuevamente que se buscó que probetas reconstituidas tuviesen una relación de vacíos y peso volumétrico seco muy similar al de su homóloga inalterada, ya que se ensayaron bajo las mismas condiciones de esfuerzo de confinamiento.

6.1 Determinación de los esfuerzos de confinamiento

Los esfuerzos de confinamiento para las muestras se determinaron bajo el criterio que se muestra a continuación. Primeramente, se utilizó un esfuerzo de confinamiento de 0.5 kg/cm^2 de manera arbitraria para la primera probeta de cada serie ensayada, mientras que para el siguiente esfuerzo de confinamiento (i.e., para la segunda y tercera probeta), se consideró la suma del esfuerzo de confinamiento de la prueba antecesora más el esfuerzo cortante máximo soportado por la misma prueba. Siendo así que:

$$\sigma_1 = 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (6.1)$$

en donde, σ_1 representa el esfuerzo de confinamiento que se calcula para primer probeta de la serie. Considerando que sólo se realizan dos cálculos del esfuerzo de confinamiento adicionales para las tres probetas, ya que, el primer esfuerzo de confinamiento ya es considerado, tenemos que el cálculo de los esfuerzos de confinamiento de la segunda y tercera probeta quedan mostradas por las ecuaciones 6.2 y 6.3, donde se tiene que:

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \tau_1 \quad (6.2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_2 + \tau_2 \quad (6.3)$$

Los valores de confinamiento obtenidos únicamente se calculan para las probetas inalteradas, ya que para el caso de probetas reconstituidas lo que se hace es ocupar el mismo esfuerzo confinante que el de las probetas inalteradas. Esto quiere decir que no se hace un nuevo cálculo de esfuerzos de confinamiento, sino que se manejan los mismos esfuerzos de confinamiento entre las probetas inalteradas y reconstituidas. Además, dentro de los esfuerzos de confinamiento aplicados no se considera la aplicación del esfuerzo efectivo de campo ya que los valores obtenidos con este criterio los abordan.

Dentro de la presente investigación se debe aclarar de manera importante que hubo ciertas consideraciones que se presentan en casos únicos o especiales de las muestras ensayadas, debido a que tuvieron modificaciones de acuerdo con el criterio mostrado anteriormente. Primeramente, el caso de las muestras de Colima, puesto que para el primer esfuerzo de confinamiento se considera un valor de 0.7 kg/cm^2 , esto se debe principalmente a que ese valor de confinamiento se propuso posteriormente de haberse realizado la prueba con un esfuerzo confinante de 1.5 kg/cm^2 . Esta condición se debe principalmente a que al inicio de esta investigación el esquema de trabajo se modificó, y el valor de 0.7 kg/cm^2 se propuso para que los círculos de Mohr de las probetas pudieran quedar empatados entre ellos, esto es, que el esfuerzo principal mayor de la probeta uno logrará quedar en el centro del círculo número dos. Evidentemente el valor de 0.7 kg/cm^2 se utiliza para el ensaye inalterado y el reconstituido.

Por otro lado, únicamente para el caso de la segunda probeta inalterada de Zacatecas se consideró que el esfuerzo de confinamiento fue calculado con la suma del esfuerzo confinante de la primera muestra más el 150% del esfuerzo cortante de la primera muestra. Para la tercera probeta se consideró el criterio explicado anteriormente. Siendo así que esta consideración sólo aplicó a la probeta números dos, pero este valor de esfuerzo confinante se respetó para la probeta inalterada y reconstituida, lo cual permitió hacer la comparación de las curvas esfuerzo-deformación sin ningún inconveniente.

Para el caso de los ensayos de San Luis Potosí, específicamente en los ensayos reconstituidos, por consecuencias del error humano, hubo una variación del esfuerzo de confinamiento en la probeta reconstituida número dos, en donde dicho valor se aumentó 0.25 kg/cm^2 , más del que se consideró y que era de 2.25 kg/cm^2 , por lo cual habrá que aclarar que la probeta números dos inalterada no se sometió al mismo esfuerzo confinante que la probeta reconstituida, lo cual provocó que las curvas de esfuerzo-deformación no se pudieran comparar puesto que no cumplen con lo especificado en este trabajo (i.e., la aplicación del mismo esfuerzo de confinamiento para probetas inalteradas y reconstituidas). Además, debido a que solo se realizó un ensaye reconstituido de la serie inalterada

no se muestran resultados de parámetros mecánicos para el caso de ésta serie, puesto que no se puede obtener una ley de resistencia con el resultado de una sola prueba.

6.2 Relaciones Volumétricas iniciales de las muestras

Como se mencionó en el capítulo 5, la formación de probetas, tanto inalteradas como reconstituidas, fueron registradas para poder obtener sus relaciones gravimétricas y volumétricas.

En la Tabla 6-1 se presentan las relaciones gravimétricas y volumétricas iniciales (i.e., previo al montaje de las probetas), en donde se observan las características principales de las probetas: el sitio de la muestra, tipo de muestra, esfuerzo efectivo de consolidación, peso (W_m), contenido de agua inicial ($w_{inicial}$), volumen (V_m), peso volumétrico seco (γ_d) y relación de vacíos (e); obtenidos en muestras inalteradas y reconstituidas.

Tabla 6-1 Relaciones gravimétricas y volumétricas iniciales de las pruebas realizadas.

RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS							
Sitio	Muestra	σ' consolidación	W_m	$w_{inicial}$	V_m	γ_d	e
		kg/cm ²	g	%	cm ³	g/cm ³	-
Colima	Inalteradas	0.700	152.500	29.259	79.679	1.481	1.121
		1.500	145.800	25.397	78.711	1.477	1.126
		2.000	151.100	30.971	77.893	1.481	1.120
	Reconstituidas	0.700	139.700	9.877	86.415	1.471	1.134
		1.500	141.300	8.741	85.343	1.523	1.062
		2.000	142.800	8.446	87.028	1.513	1.075
Zacatecas	Inalteradas	0.500	181.700	27.041	83.726	1.708	0.942
		2.000	184.000	26.766	86.385	1.680	0.975
		3.500	182.700	26.658	83.677	1.724	0.925
	Reconstituidas	0.500	166.000	9.752	87.674	1.725	0.923
		2.000	163.000	9.176	87.249	1.711	0.939
		3.500	165.800	8.310	88.209	1.735	0.912
San Luis Potosí	Inalteradas	0.500	160.800	27.666	79.946	1.575	0.889
		1.250	169.000	27.820	84.496	1.565	0.902
		2.240	172.000	27.543	85.388	1.579	0.884
	Reconstituidas	0.500					
		1.500	148.500	8.574	86.504	1.581	0.882
		2.240					

En la Tabla 6-1 podemos observar algunas de las relaciones volumétricas y gravimétricas de las probetas, sin embargo, hay que recordar que se debe buscar una similitud de peso volumétrico seco y de relación de vacíos entre las probetas inalteradas y reconstituidas.

Además, como dato adicional los valores que se reportaron respecto al contenido de agua de las muestras inalteradas de los tres sitios de estudio son superiores al 25%, por lo cual, tenemos grados de saturación mayores al 70%.

De acuerdo con las propiedades obtenidas en la Tabla 6-1, y si se hiciera una relación del valor obtenido entre el peso volumétrico seco y la relación de vacíos de las muestras, obtendríamos lo que se muestra en la Figura 6-1 y Figura 6-2 y en donde se puede observar la relación existente entre las muestras y su similitud. Si nos concentráramos en la diferencia de los resultados entre ambas muestras (inalteradas y reconstituidas) y obtuviéramos un porcentaje de error, este valor sería menor al 5%, lo cual nos brinda una alta tasa de confiabilidad de los resultados.

De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 6-1, se puede decir que la muestra más ligera es la procedente de Colima, mientras que la más densa es la de Zacatecas. Asimismo, de la Figura 6-2 se corrobora lo anterior, ya que las muestras de San Luis Potosí muestran menor relación de volumen de vacíos respecto al volumen de suelo, caso contrario con las muestras de Colima que son las que muestran una relación de vacíos mayor.

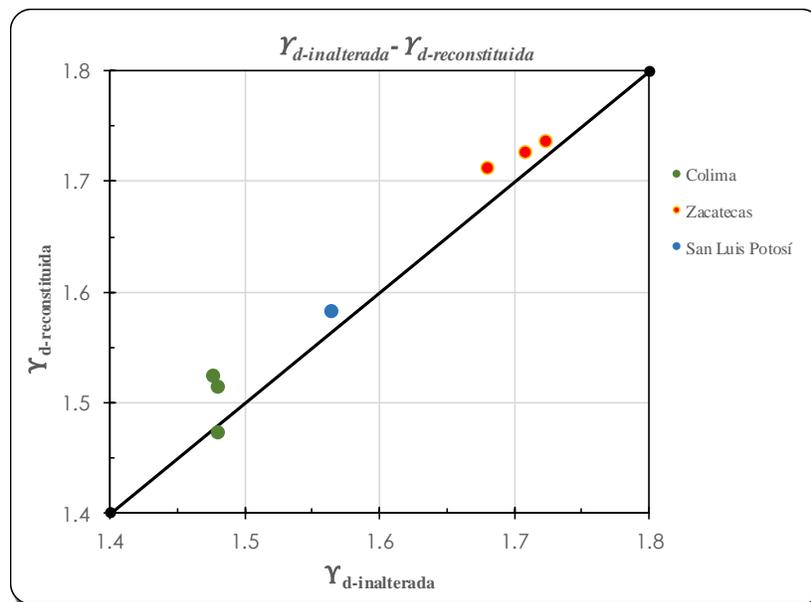


Figura 6-1 Pesos volumétricos de probetas inalteradas vs reconstituidas.

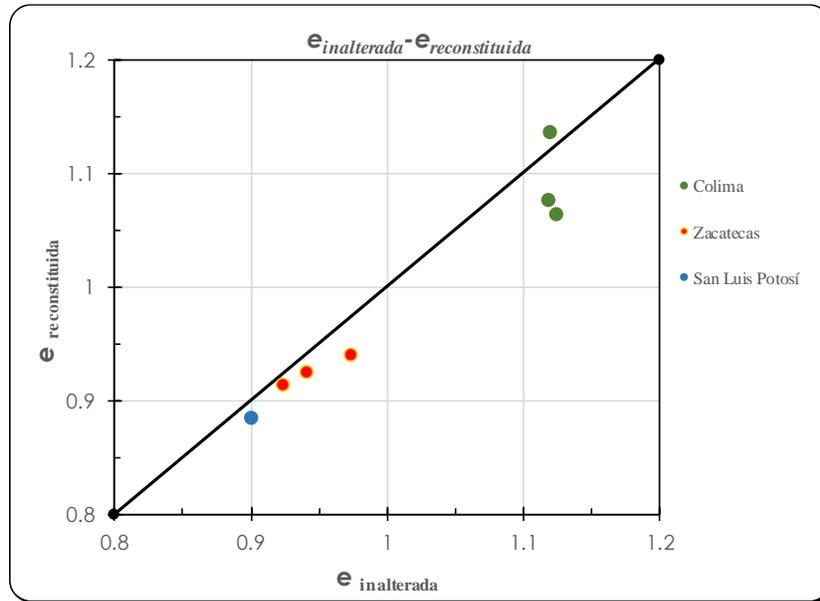


Figura 6-2 Relaciones de vacíos de probetas inalteradas vs reconstituidas.

6.3 Saturación y consolidación de ensayos

Dentro del esquema de trabajo de una prueba triaxial CU, la saturación es una etapa sumamente importante puesto que es donde se asegura que la probeta tenga todos sus vacíos ocupados con agua, con lo cual pasa a ser un suelo saturado. Dentro de esta investigación esta etapa mostró ser difícil y larga, puesto que para algunas probetas la saturación era más tardada que en otras, con una variación de tiempo de entre 3 y 12 días, ya que las probetas reconstituidas presentaron menores tiempos durante el proceso de saturación respecto a las inalteradas. Es bien sabido que las muestras reconstituidas al momento de su montaje presentaron un grado de saturación menor (cercano al 30%) respecto a las inalteradas (aproximado al 70%); la condición de tiempo de saturación puede verse influenciada principalmente a que las probetas reconstituidas presentan una mayor uniformidad y homogenización que las probetas inalteradas, siendo que éstas últimas al no saber cómo está distribuida su estructura podría implicar un mayor tiempo en la etapa de saturación.

Con el uso de las propiedades iniciales fue posible saber cuál era el volumen de la muestra y también el volumen de suelo presente, es claro que la diferencia de estos dos volúmenes da como resultado el volumen de vacíos que es una propiedad que se mantiene constante durante este proceso, y la cual la conforman el volumen de aire y volumen de agua. El proceso de saturación tiene la misión de llenar de agua la probeta por medio de una inyección de la misma a presión, es por ello que fue necesario tener registrado cuánta agua entraba a la probeta por incremento

de presión, con lo cual fue posible saber cuál era el volumen de agua y de aire en la probeta tras cada incremento y, además por consiguiente también el grado de saturación de la probeta.

En la Figura 6-3 se presentan las gráficas de cambio de volumen de aire durante la etapa de saturación de las muestras reconstituidas de Zacatecas, en donde se puede observar cómo decrece el volumen de aire en las probetas, conforme se incrementa la presión de confinamiento y contrapresión. Mientras que en la Figura 6-4 se exponen las mismas muestras de Zacatecas en las cuales se aprecia cómo al decrecer el volumen de aire en la probeta el grado de saturación tiende a incrementar, esto se debe principalmente a la entrada de agua en la probeta por la aplicación de mayores esfuerzos. De acuerdo a las gráficas, se puede resaltar que no hay un límite en la aplicación de los esfuerzos de confinamiento y contrapresión que se utilicen para la saturación, sino que esto varía de acuerdo con el criterio del usuario, ya que al no cumplir con el parámetro de la B de Skempton no se puede considerar como un suelo saturado y proceder con la etapa de consolidación, es por ello que algunas probetas muestran incrementos de presión altos en la etapa de saturación. Cabe aclarar que como se mencionó anteriormente, durante la etapa de saturación se utilizaron esfuerzos efectivos que variaron de 0.04 a 0.10 kg/cm².

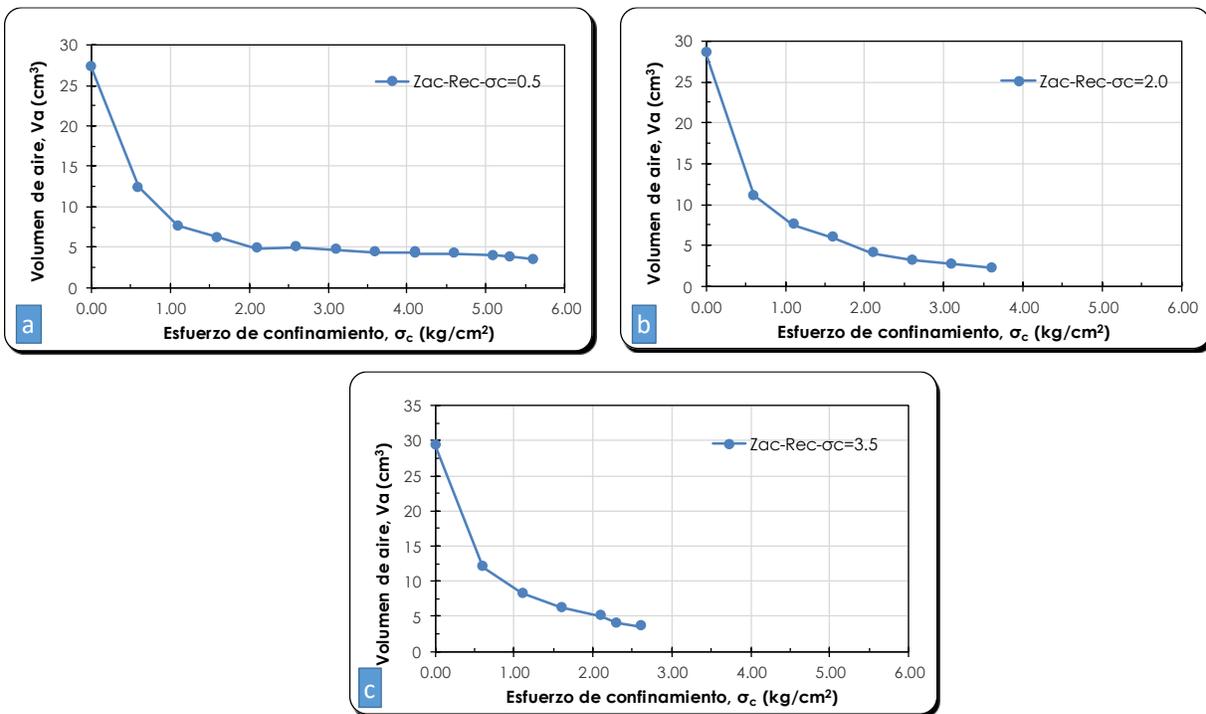


Figura 6-3 Relación entre el esfuerzo de confinamiento y el volumen de aire en la etapa de saturación, muestras reconstituidas de Zacatecas a) $\sigma_c=0.5 \text{ kg/cm}^2$, b) $\sigma_c=2.0 \text{ kg/cm}^2$ y c) $\sigma_c=3.5 \text{ kg/cm}^2$.

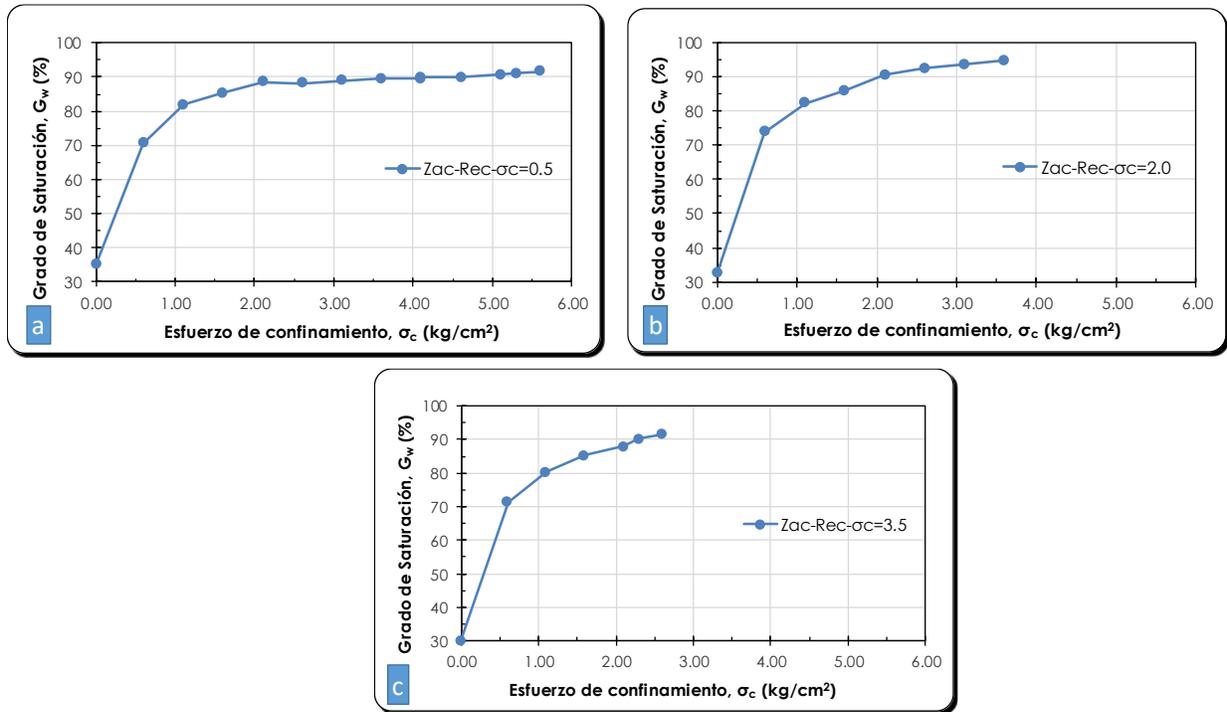


Figura 6-4 Relación del esfuerzo de confinamiento con el grado de saturación en la etapa de Saturación, muestras reconstituidas de Zacatecas a) $\sigma_c=0.5$ kg/cm², b) $\sigma_c=2.0$ kg/cm² y c) $\sigma_c=3.5$ kg/cm².

La etapa de consolidación, como se mencionó en el capítulo anterior, procede a realizarse cuando en la probeta de suelo se obtiene una B de Skempton mayor al 96% y posteriormente es aplicado el esfuerzo efectivo de consolidación. Por medio de la consolidación existe una expulsión de agua de la probeta, hasta llegar a un punto constante en donde ya no se presentan cambios de volumen, esto se hace por medio del dren superior que se conecta con el sensor de cambio de volumen para poder registrarlo; además, cabe aclarar que al aplicar el esfuerzo efectivo de consolidación ocurre un aumento súbito de la presión de poro, la cual se disipa y estabiliza conforme al paso del tiempo, en donde esto se hace por medio del dren inferior y es registrado por el transductor de presión de poro. El resultado de los registros de la consolidación presenta un desfase en la geometría de las curvas, donde los quiebres de éstas se observan primero en el cambio de volumen y luego en la presión de poro. Aunque el tiempo de consolidación total es, aproximadamente, el mismo.

En la Figura 6-5 se muestran las gráficas de consolidación, cambio de volumen y presión de poro respecto al tiempo, en las cuales únicamente se presentan las muestras reconstituidas del estado de Colima, a fin de ejemplificar los resultados debido a que el comportamiento que se exhibe es muy similar en todos los ensayos realizados. En estas gráficas se puede observar un mejor comportamiento de las curvas de presión de poro en comparación con las curvas de cambio volumen.

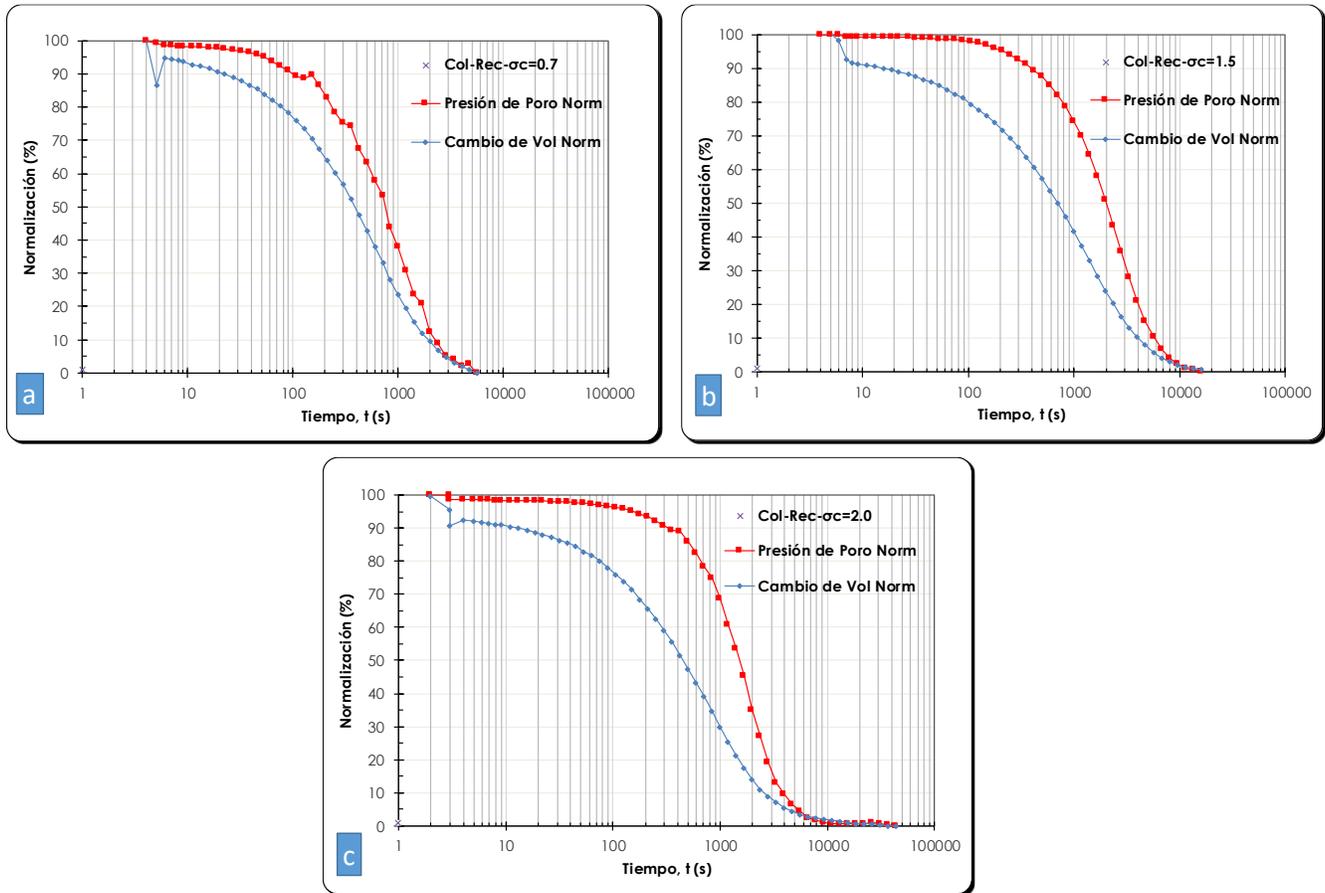


Figura 6-5 Curvas de disipación (presión de poro y cambio de volumen) de las muestras reconstituidas de Colima, a) $\sigma_c=0.7$ kg/cm², b) $\sigma_c=1.5$ kg/cm² y c) $\sigma_c=2.0$ kg/cm².

En la Figura 6-2 se puede observar un resumen de las propiedades, durante la etapa de saturación y consolidación, de las muestras. Dentro de esta tabla se presenta en el apartado de saturación las propiedades volumétricas de las muestras, estrictamente las de volumen de vacíos, agua y aire, además del volumen de agua que ingresó en la probeta. Como se comentó anteriormente, podemos ver que el volumen de vacíos es constante durante la etapa de saturación para todas las probetas y lo que realmente provoca una variación en las relaciones volumétricas es la entrada de agua. En esta tabla se muestran los valores volumétricos finales previos a la consolidación, en donde los valores obtenidos para el grado de saturación van del 91 al 100%. Es evidente que de acuerdo a la Norma ASTM D 4767 95 se debe de respetar el valor de la B de Skempton mínimo de 0.95, para el caso de este proyecto se adoptó de 0.96, para proceder con la etapa de consolidación. Es claro que si las muestras no alcanzan el 100% del grado de saturación se podrían considerar no saturadas totalmente; sin embargo, lo que sucede realmente es lo siguiente, es evidente que en la etapa de saturación el agua llena los espacios vacíos de la probeta y también los espacios que ocupa el aire provocando una reducción de su volumen pero no su salida de la probeta, por lo cual dicho volumen de aire, aun siendo muy pequeño puede influir en el grado de saturación final de la muestra,

provocando que no se obtenga el 100% de saturación aunque se haya cumplido con el parámetro de la B de Skempton. Además hay que considerar que la Normatividad de la ASTM permite que para fines prácticos pueda existir un 5% de consideración para una probeta saturada.

Para la etapa de consolidación se muestra el cambio de volumen presentado por la expulsión de agua. Por otro lado, previo a la etapa de consolidación con la aplicación del esfuerzo efectivo de consolidación se provoca un exceso de presión de poro, la cual se disipada durante la consolidación.

Tabla 6-2 Resumen de las condiciones volumétricas en las etapas de saturación y consolidación, a partir de las mediciones directas de cambio de volumen.

Sitio	Muestra	Montaje		Saturación					Consolidación		
		W_m	$W_{inicial}$	Volumen de agua ingresado	Volumen de vacíos	Volumen de agua	Volumen de aire	Gw	$\sigma'_{consolidación}$	Cambio de volumen	Disipación de presión de poro
		g	%	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	%	kg/cm ²	cm ³	kg/cm ²
Colima	Inalteradas	152.500	29.259	8.062	41.828	41.700	0.128	99.694	0.700	3.197	0.600
		145.800	25.397	12.790	41.388	41.385	0.003	99.993	1.500	3.753	1.401
		151.100	30.971	6.120	40.850	40.850	0.000	100.000	2.000	6.811	1.828
	Reconstituidas	139.700	9.877	31.092	45.930	43.650	2.280	95.036	0.700	8.771	0.620
		141.300	8.741	30.510	43.964	41.869	2.095	95.235	1.500	10.703	1.384
		142.800	8.446	33.775	45.100	44.900	0.200	99.557	2.000	14.060	1.970
Zacatecas	Inalteradas	181.700	27.041	2.800	40.220	40.220	0.000	100.000	0.500	2.800	0.407
		184.000	26.766	4.590	42.230	42.210	0.020	99.953	2.000	4.309	1.903
		182.700	26.658	1.810	39.800	39.050	0.750	98.116	3.500	7.298	3.400
	Reconstituidas	166.000	9.752	23.830	42.090	38.580	3.510	91.661	0.500	4.514	0.470
		163.000	9.176	26.340	42.250	40.040	2.210	94.769	2.000	7.506	1.928
		165.800	8.310	25.908	42.070	38.630	3.440	91.823	3.500	9.001	3.423
San Luis Potosí	Inalteradas	160.800	27.666	2.780	37.630	37.630	0.000	100.000	0.500	1.529	0.425
		169.000	27.820	1.460	40.070	38.240	1.830	95.433	1.250	3.336	1.159
		172.000	27.543	0.690	40.080	37.840	2.240	94.411	2.240	3.058	2.096
	Reconstituidas	148.500	8.574	27.978	40.550	39.700	0.850	97.904	1.500	10.352	1.453

6.4 Comparación de Curvas Esfuerzo desviador – Deformación unitaria axial y Presión de Poro – Deformación unitaria axial de muestras inalteradas y reconstituidas

El comportamiento de las muestras inalteradas y reconstituidas ante una deformación axial se presenta a continuación, en donde se observa una sola gráfica de dicho comportamiento para las dos series de probetas procedentes del mismo sitio de estudio, resaltando que el proceso de formación es diferente. En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de los tres sitios de estudio, además, se explican las variaciones del esfuerzo desviador y presión de poro respecto a la deformación unitaria axial.

Se presentan las gráficas del comportamiento de la presión de poro y el esfuerzo desviador de los ensayos realizados. Inicialmente se encuentran los resultados de las series de Colima, en donde se explica el contenido de las gráficas expuestas y el análisis correspondiente, además de describir los detalles más específicos del comportamiento de las curvas. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos de la muestra de Zacatecas y San Luis Potosí. Finalmente, se presentan algunas observaciones generales del comportamiento y una tabla resumen de los resultados obtenidos.

En la Figura 6-6 se exhibe la variación de la presión de poro durante la etapa de falla de las probetas inalteradas y reconstituidas, las líneas punteadas representan el comportamiento de las probetas inalteradas y las líneas continuas el comportamiento de las reconstituidas, además, cada incremento de confinamiento está variado por algún color, siendo así que, las curvas de color verde representan a las probetas con 0.7 kg/cm^2 , las curvas de color azul muestran el comportamiento con un confinamiento de 1.5 kg/cm^2 y las curvas de color rojo un confinamiento de 2 kg/cm^2 . De acuerdo con los resultados mostrados, es evidente que las muestras inalteradas presentan menores valores de presión de poro que las reconstituidas.

En la Figura 6-7 se muestra la historia del esfuerzo desviador aplicado a las probetas procedentes del estado de Colima, en donde para la primera probeta inalterada presentó una mayor resistencia a la carga axial, comparada con la muestra reconstituida, mientras que para la segunda y tercer probeta inalterada se observó lo contrario. Lo anterior es debido a que las muestras reconstituidas presentaron una mayor capacidad de carga axial en comparación a su homóloga, este comportamiento se pudo deber al proceso de consolidación, en donde se consiguió una reestructuración de la probeta por la aplicación del esfuerzo efectivo de consolidación, provocando una mayor rigidez y, a su vez, una mayor resistencia. Este comportamiento fue respaldado y verificado con una segunda prueba con las mismas características, la cual mostró una gran similitud con los resultados obtenidos.

considerarse contractivos. Para el comportamiento del esfuerzo desviador se observa que las muestras inalteradas tienen una mayor capacidad a la carga axial.

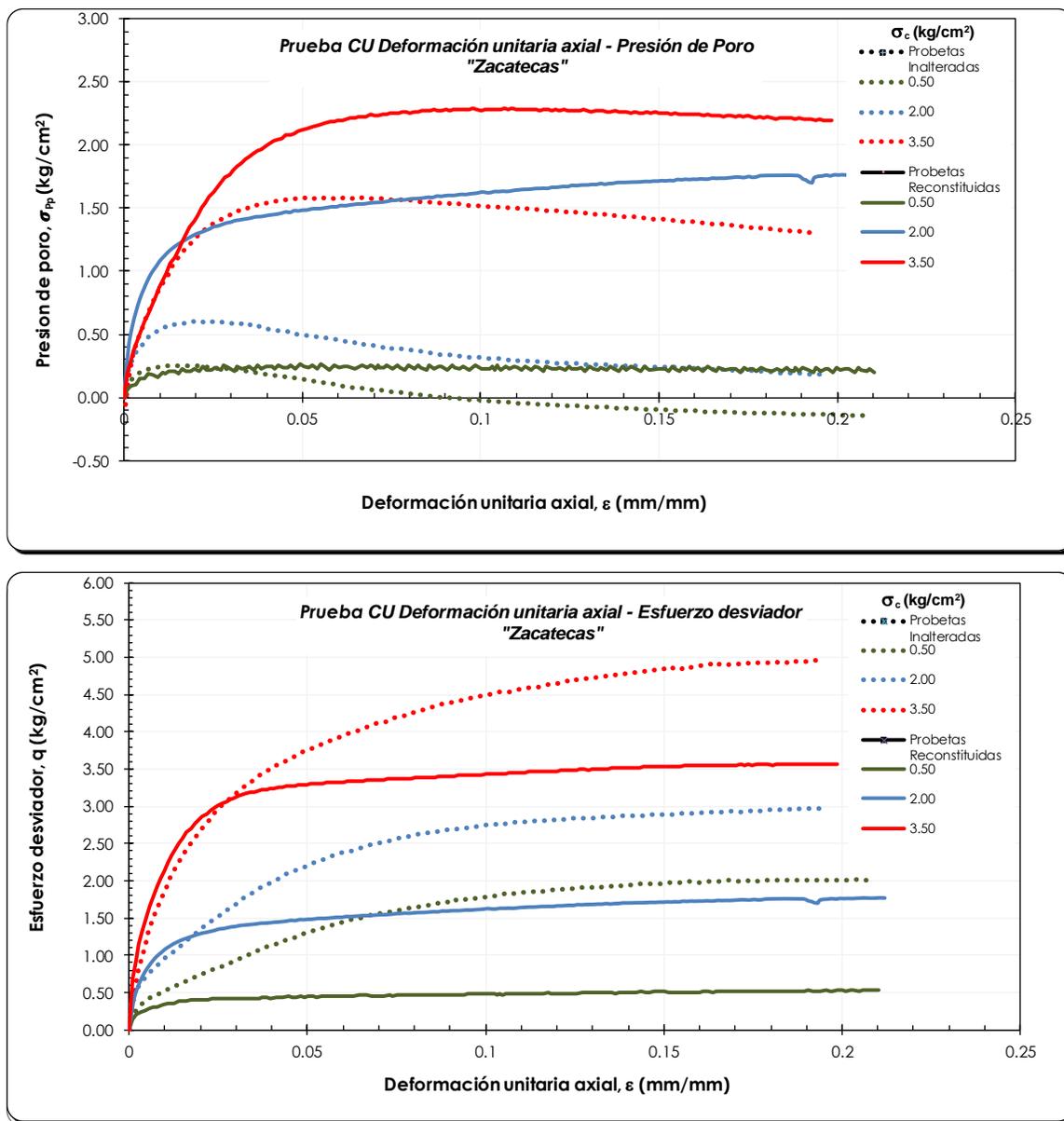


Figura 6-8 Comportamiento de la presión de poro y esfuerzo desviador de las muestras de Zacatecas.

En la Figura 6-9 se exhibe el comportamiento de las muestras procedentes de San Luis Potosí. Considerando que la muestra reconstituida de este sitio no tiene una homóloga inalterada con la misma condición de esfuerzo confinante, no es posible hacer una comparación, aunque se puede observar que esa prueba presenta una presión de poro considerablemente alta, ya que se aproxima al valor obtenido en el tercer ensaye de probetas inalterada. Además, las muestras inalteradas y reconstituida de acuerdo con la teoría poseen un comportamiento dilatante.

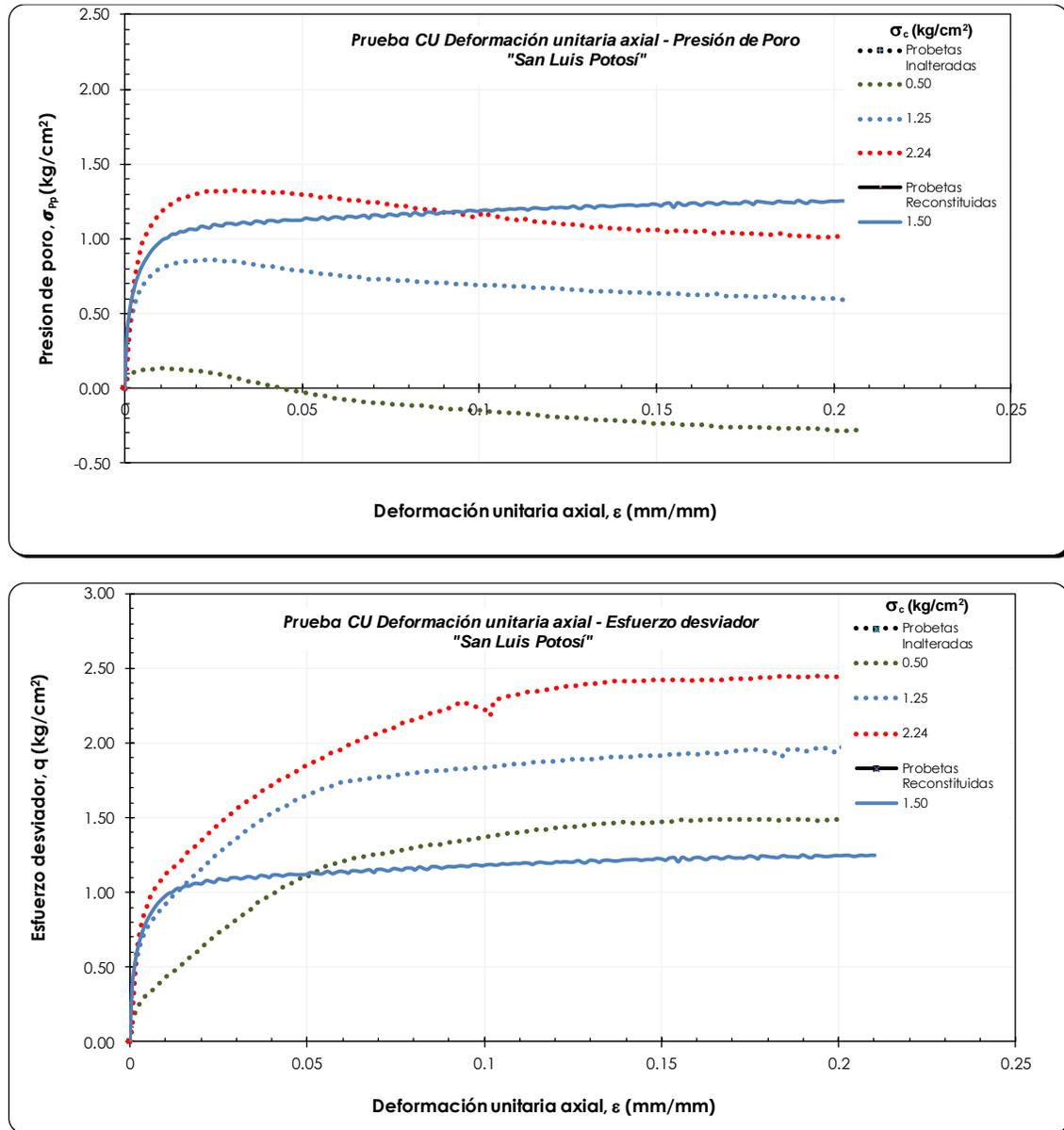


Figura 6-9 Comportamiento de la presión de poro y esfuerzo desviador de las muestras de San Luis Potosí.

En resumen, se puede decir que en general las probetas reconstituidas de los tres sitios presentan una mayor presión de poro respecto a las inalteradas, en la mayoría de los ensayos se exhibe un comportamiento idéntico o muy similar al de un material dilatante, mientras que para algunas muestras reconstituidas el comportamiento podría llegarse a asociar a un material contractivo (i.e., el segundo ensayo reconstituido de la muestra de Colima y Zacatecas), esto se comprueba de manera más explícita en el apartado de trayectorias de esfuerzos $p'-q$.

Asimismo, si se generaliza en el aspecto de la variación del esfuerzo desviador, se puede decir que las probetas inalteradas tienen una mayor capacidad de carga axial que las reconstituidas y por el comportamiento presentado

en las muestras reconstituidas se puede decir que al llegar a un esfuerzo desviador máximo, tienden a mantenerse constantes hasta el final de la falla.

En la Tabla 6-3 se presenta un resumen de valores obtenidos de las curvas de esfuerzo desviador y presión de poro respecto a la deformación unitaria axial, en donde los valores presentados están referidos a una deformación del 10% de la probeta. Se determina que, para ese valor de deformación, las presiones de poro en las probetas reconstituidas son mayores que en las inalteradas, mientras que el esfuerzo desviador en ensayos inalterados es mayor que en los reconstituidos.

Tabla 6-3 Tabla resumen de valores obtenidos de las curvas de presión de poro y esfuerzo desviador

Sitio	Muestra	σ' consolidación	Desplazamiento	Esfuerzo desviador	Presión de poro
			ϵ	q	σ_{pp}
		kg/cm ²	mm/mm	kg/cm ²	kg/cm ²
Colima	Inalteradas	0.700	0.100	0.800	0.123
		1.500	0.100	1.179	0.459
		2.000	0.100	1.485	0.724
	Reconstituidas	0.700	0.100	0.623	0.425
		1.500	0.100	1.417	0.877
		2.000	0.100	1.796	1.274
Zacatecas	Inalteradas	0.500	0.100	1.786	-0.022
		2.000	0.100	2.740	0.316
		3.500	0.100	4.504	1.514
	Reconstituidas	0.500	0.100	0.487	0.227
		2.000	0.099	1.621	1.313
		3.500	0.100	3.428	2.276
San Luis Potosí	Inalteradas	0.500	0.100	1.370	-0.150
		1.250	0.100	1.836	0.696
		2.240	0.100	2.219	1.153
	Reconstituidas	0.500			
		1.500	0.100	1.186	1.117
		2.240			

A continuación, en las Figura 6-10 a Figura 6-12 se presenta la normalización de la presión de poro respecto al esfuerzo efectivo, en donde para valores cercanos a 1 de la normalización se dice que el material presenta una licuación estática. De las tres muestras en estudio, podemos observar que las muestras reconstituidas presentan valores de normalización mayores que las inalteradas.

En la Figura 6-13 se presentan las envolventes de falla en estados de esfuerzos totales y efectivos de la muestra inalterada procedente de Colima, mientras que en la Tabla 6-4 se exponen los valores de los parámetros mecánicos (i.e., ángulo de fricción interna y cohesión) obtenidos para esfuerzos totales y efectivos.

Tabla 6-4 Parámetros mecánicos totales y efectivos de la muestra inalterada de Colima.

Muestra Inalterada de Colima						
Esfuerzo efectivo de consolidación	Esfuerzo cortante	Presión de poro	Ángulo de fricción		Cohesión	
			Esf. totales	Esf. efectivos	Esf. totales	Esf. efectivos
σ_c	$\tau_{m\acute{a}x}$	u	ϕ	ϕ'	c	c'
kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	grados	grados	kg/cm^2	kg/cm^2
0.70	0.40	0.13	12.41	18.78	0.160	0.100
1.50	0.61	0.45				
2.00	0.75	0.73				

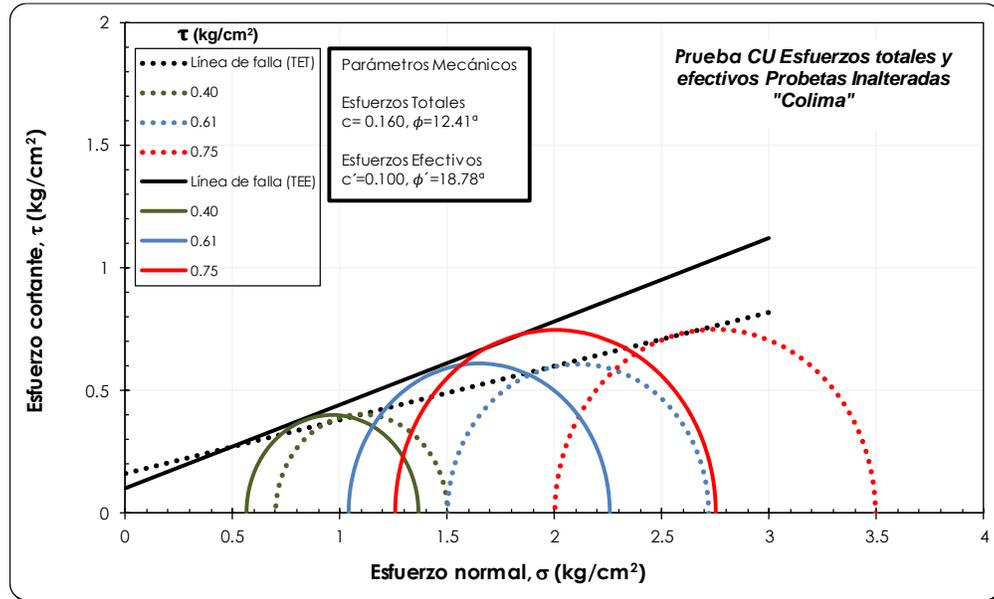


Figura 6-13 Envolvente de falla por el criterio Mohr Coulomb para la muestra inalterada de Colima.

Asimismo, para las probetas reconstituidas procedentes de Colima se obtuvieron los resultados que se pueden observar en la en la Figura 6-14, donde se muestran las envolventes de falla de las trayectorias de esfuerzos totales y efectivos, mientras que en la Tabla 6-5 se exhiben los valores de parámetros mecánicos de dicha muestra:

Tabla 6-5 Parámetros mecánicos totales y efectivos de la muestra reconstituida de Colima.

Muestra Reconstituida de Colima						
Esfuerzo efectivo de consolidación	Esfuerzo cortante	Presión de poro	Ángulo de fricción		Cohesión	
			Esf. totales	Esf. efectivos	Esf. totales	Esf. efectivos
σ_c	$\tau_{\text{máx}}$	u	ϕ	ϕ'	c	c'
kg/cm^2	kg/cm^2	kg/cm^2	grados	grados	kg/cm^2	kg/cm^2
0.70	0.32	0.41	18.43	33.69	0.000	0.000
1.50	0.73	0.86				
2.00	0.93	1.27				

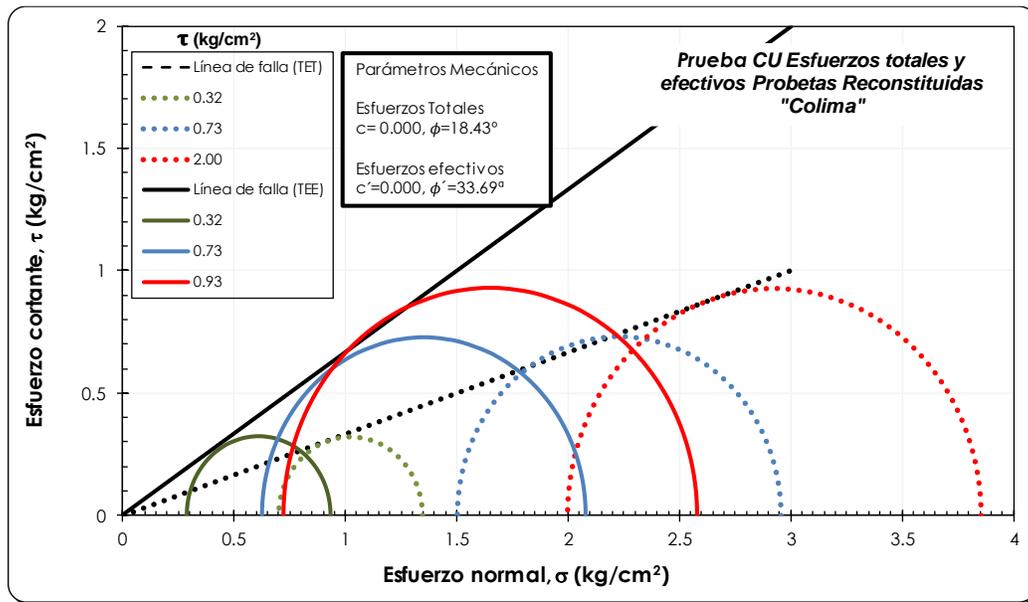


Figura 6-14 Envoltente de falla por el criterio Mohr Coulomb para la muestra reconstituida de Colima.

El uso de las gráficas mostradas en las Figura 6-15 y Figura 6-16 exhiben la variación de los parámetros mecánicos en los mismos estados de esfuerzos para probetas inalteradas y reconstituidas de la muestra de Colima. En estas gráficas es posible observar que los parámetros mecánicos obtenidos en esfuerzos totales no difieren demasiado, ya que solo se presenta una diferencia de 6° respecto al ángulo de fricción interna de ambas series, mientras que, para la cohesión sólo se presenta una diferencia mínima de 0.160 kg/cm^2 .

En ambos casos podemos decir que las probetas inalteradas presentan un valor muy pequeño de cohesión, pero para las probetas reconstituidas se observa que existe nula cohesión para esfuerzos totales y efectivos. Para el caso de la comparación de esfuerzos efectivos se observa que el segundo y tercer círculo de probetas reconstituidas son más grandes que las inalteradas, este patrón es reflejo de las curvas de esfuerzo-deformación que presentaron una mayor resistencia axial, aun estando bajo los mismos valores de confinamiento.

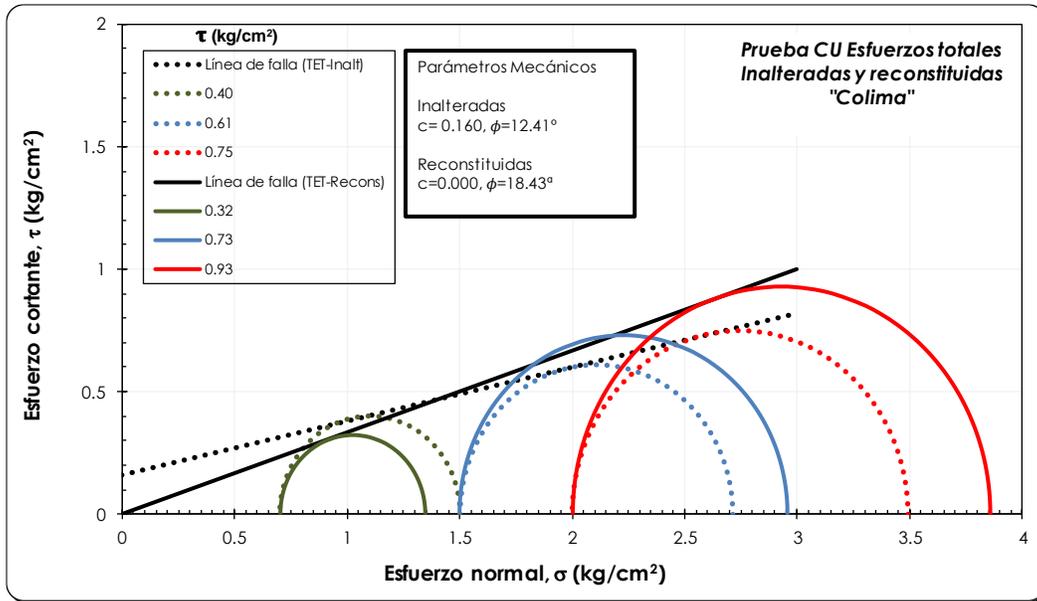


Figura 6-15 Comparación de esfuerzos totales de probetas inalteradas y reconstituidas de Colima.

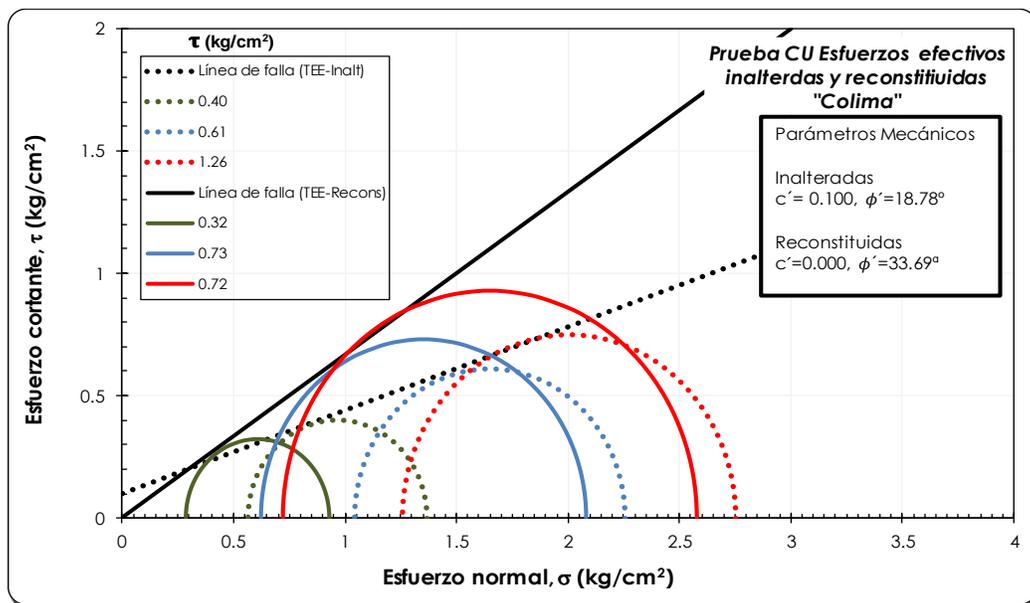


Figura 6-16 Comparación de esfuerzos efectivos de probetas inalteradas y reconstituidas de Colima.

El criterio Mohr-Coulomb de los ensayos restantes se muestra a continuación, en donde se seguirá el esquema de comparación de parámetros mecánicos de ambas series (inalteradas y reconstituidas) en una sola gráfica, y únicamente se apreciarán los estados de esfuerzos totales o estados esfuerzos efectivos.

Para la series procedentes de Zacatecas, los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 6-17, en donde para los estados de esfuerzos totales de probetas inalteradas y reconstituidas no existe una gran variación en los parámetros mecánicos, puesto que para los ángulos de fricción interna se tiene una diferencia menor a un grado, y la única diferencia significativa sería la cohesión con un valor de 0.6 kg/cm^2 entre ambas series. Asimismo, en la Figura 6-18 se presentan los estados de esfuerzos efectivos de ambas series, en donde estos parecen ser muy similares, aunque realmente para ser precisos, existe una diferencia de cuatro grados en el ángulo de fricción interna entre la serie inalterada y la reconstituida.

Para este sitio, nuevamente se exhibe una diferencia exclusivamente en la cohesión de la muestra inalterada, ya que las muestras reconstituidas presentan un valor nulo para dicho parámetro. En este caso es muy evidente que el valor de cortante presentado en la serie reconstituida es mucho menor que el de la inalterada, sin embargo, a pesar de esto, los resultados obtenidos en relación con los parámetros mecánicos entre ambas series son muy similares.

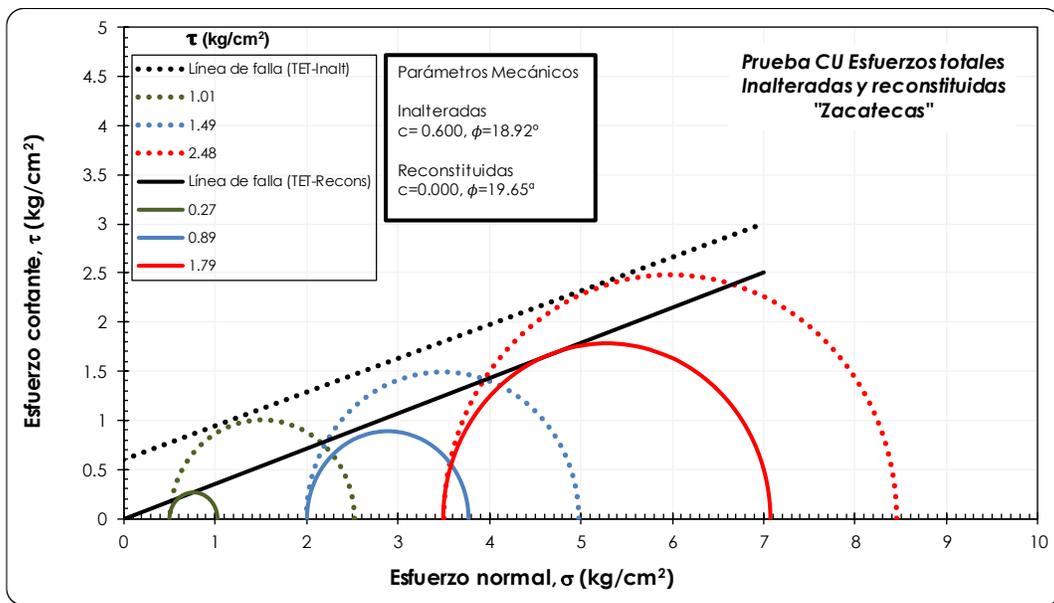


Figura 6-17 Comparación de esfuerzos totales de probetas inalteradas y reconstituidas de Zacatecas.

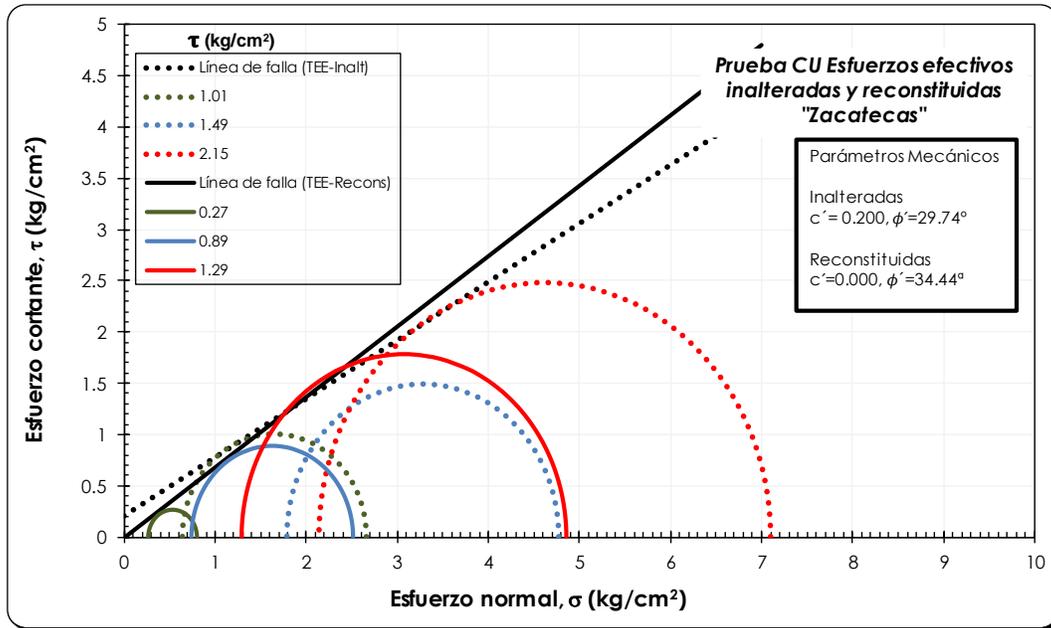


Figura 6-18 Comparación de esfuerzos efectivos de probetas inalteradas y reconstituidas de Zacatecas.

Para las serie procedente de San Luis Potosí se pueden observar los resultados obtenidos en la Figura 6-19, en donde se muestra que para los estados de esfuerzos totales de probetas inalteradas se obtuvo un valor de cohesión de 0.5 kg/cm^2 y un ángulo de fricción de 12.49° . Asimismo, también se exhibe que para estados de esfuerzos efectivos inalterados, la serie presenta valores de cohesión de 0.4 kg/cm^2 y un ángulo de fricción de 21.31° . Como se menciona anteriormente no se puede determinar una envolvente de falla, o la ley de resistencia, con la existencia de un solo círculo, es por eso que la muestra reconstituida de éste sitio no es considerada. Como dato adicional, la primera probeta inalterada durante la falla genera presión de poro negativa, lo cual provoca que el círculo de Mohr de dicha prueba se mueva hacia la derecha en lugar de la izquierda, como se ha observado en los casos anteriores.

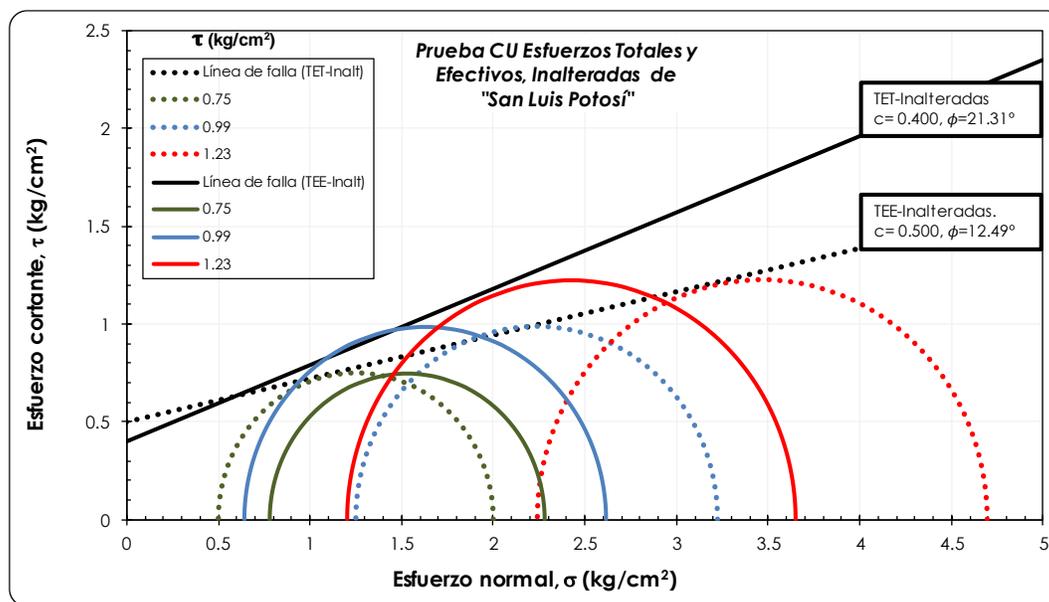


Figura 6-19 Comparación de esfuerzos totales y efectivos de probetas inalteradas de San Luis Potosí.

De manera general, podemos decir que la muestra procedente de Zacatecas presentó una similitud en valores de ángulos de fricción totales y efectivos entre las ensayos inalterados y reconstituidos, mientras que la muestra de Colima no presenta esta particularidad, el caso de San Luis Potosí queda descartado en la comparación de parámetros mecánicos de muestras inalteradas y reconstituidas. De acuerdo con lo observado en la muestra de Colima, la segunda y tercera probeta de la serie reconstituida sufrió un reordenamiento de partículas al momento de la aplicación del esfuerzo efectivo de consolidación, lo cual provocó que se rigidizara la probeta afectando su resistencia, y por ende el valor de cortante, incitando a que los esfuerzos en probetas reconstituidas fueran mayores que en las inalteradas. Además, se aclara que esta es la única muestra que presenta dicho comportamiento. Un punto importante dentro de lo observado, es que a pesar de que en los círculos los valores de cortantes entre muestras homólogas bajo los mismos esfuerzos de confinamiento son menores en muestras reconstituidas que en inalteradas, se puede decir que los valores de cohesión y ángulos de fricción son similares en el caso de Zacatecas.

En la Tabla 6-6 se muestran los parámetros mecánicos obtenidos de las muestras. En el caso de estados de esfuerzos totales se tiene que el ángulo de fricción interna se encuentra en un rango que va de los 11° a los 20°, mientras que, en el caso de los efectivos encontramos que el rango oscila entre los 18° y 35°. Estos valores entran dentro del rango de valores presentados por Bernal (2016). Donde se puede aclarar que en las series en las que existe una mayor diferencia es en las de esfuerzos efectivos, tal es el caso de la muestra Colima, la cual exhibe valores muy diferentes, mientras que las muestras de Zacatecas tiene valores relativamente similares. Respecto al parámetro de cohesión entre ambas muestras, se presenta un valor más grande en las series inalteradas lo cual se puede atribuir a la afectación de un posible envejecimiento debido principalmente por el tiempo de depositación y consolidación

realizado en campo, que al compararse con las series reconstituidas no se presenta un tiempo prolongado como para poder generar dicho efecto de envejecimiento.

Tabla 6-6 Resumen de parámetros mecánicos obtenidos en estados de esfuerzos efectivos y totales.

Sitio	Muestra	Ángulo de fricción		Cohesión	
		Esf. totales	Esf. efectivos	Esf. totales	Esf. efectivos
		ϕ	ϕ'	c	c'
		grados	grados	kg/cm ²	kg/cm ²
Colima	Inalteradas	12.41	18.78	0.16	0.10
	Reconstituidas	18.43	33.69	0.00	0.00
Zacatecas	Inalteradas	18.92	29.74	0.60	0.20
	Reconstituidas	19.65	34.44	0.00	0.00
San Luis Potosí	Inalteradas	12.49	21.31	0.40	0.40
	Reconstituidas				

6.6 Trayectorias de esfuerzo p' - q

Para esta investigación se revisaron adicionalmente las trayectorias de esfuerzos p' - q cuyos resultados obtenidos se presentan a continuación.

Para el caso de las muestras de Colima, se presentan en una misma gráfica los valores de esfuerzos octaédricos y esfuerzos desviadores. En la Figura 6-20 se observa que no existe una relación entre las muestras inalteradas y reconstituidas; sin embargo, al obtener el ángulo de fricción efectivo por medio de la pendiente M (Ecuación 2.18), se presentan valores muy similares respecto a los obtenidos en los círculos de Mohr para los esfuerzos efectivos. Asimismo, cuando se analizó el comportamiento de las curvas de presión de poro respecto a la deformación unitaria axial se determinó un comportamiento dilatante para las muestras inalteradas y reconstituidas. De acuerdo con lo que se presenta en las trayectorias de esfuerzos, se puede decir con toda seguridad que las probetas inalteradas tienen un comportamiento dilatante, mientras que las reconstituidas muestran un comportamiento semi-dilatante.

Para las muestras procedentes de Zacatecas, en la Figura 6-21 se muestran los valores obtenidos de ángulos de fricción interna efectiva, los cuales son muy similares a los obtenidos en los círculos de Mohr de estados de esfuerzos efectivos. Además, se observa que las muestras inalteradas muestran un comportamiento dilatante, mientras que, las muestras reconstituidas presentan un comportamiento contractivo-dilatante.

Para los ensayos del estado de San Luis Potosí se pueden observar en la Figura 6-22 los valores que se obtuvieron para el ángulo de fricción interna efectiva, los cuales no son similares a los obtenidos en los círculos de Mohr en

estados de esfuerzos efectivos. Esto se puede deber principalmente a una característica particular de la muestra procedente de este sitio, ya que si se realiza una comparación de la normalización de la presión de poro respecto al esfuerzo efectivo de consolidación (Figura 6-12) refleja que la muestra procedente de este depósito tuvo los valores más altos, lo cual podría provocar que la presión de poro que actuó en estas muestras tuvo un exceso mucho mayor en comparación de los otros dos sitios de estudio. Además, se agrega la muestra reconstituida que muestra el comportamiento semi-contractivo que presenta ese ensaye y no dilatante como se había mencionado anteriormente. Para este sitio a pesar de los detalles presentados, se puede observar un comportamiento dilatante para el caso de las probetas inalteradas.

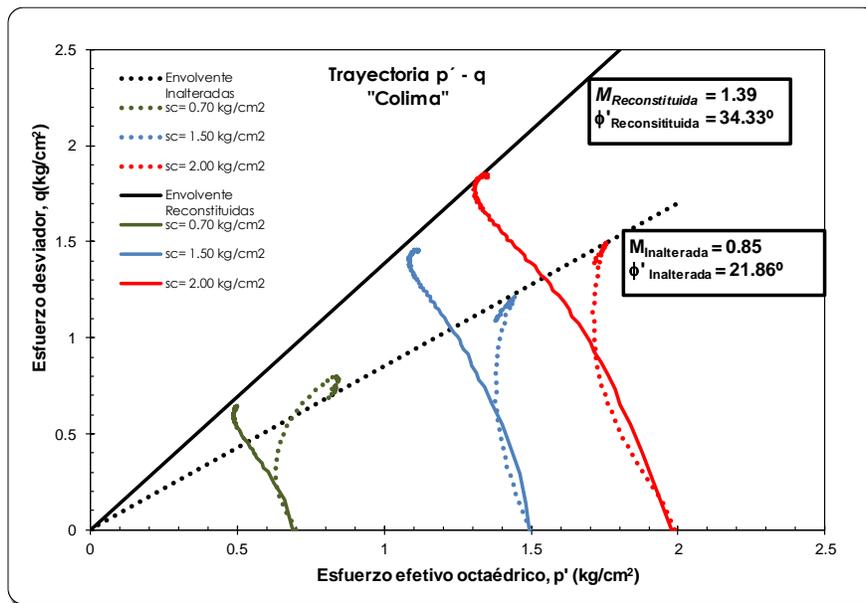


Figura 6-20 Trayectorias de esfuerzos p'-q del estado de Colima.

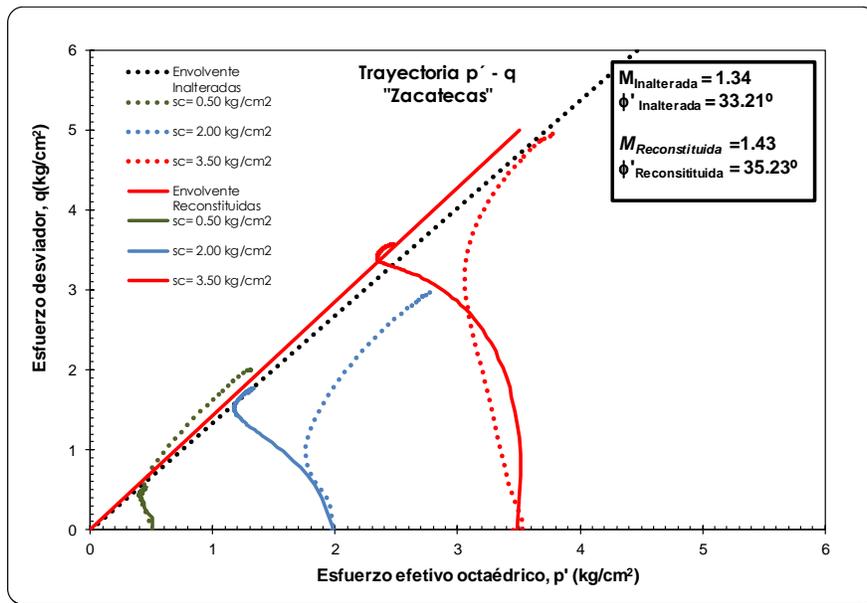


Figura 6-21 Trayectorias de esfuerzos p'-q del estado de Zacatecas.

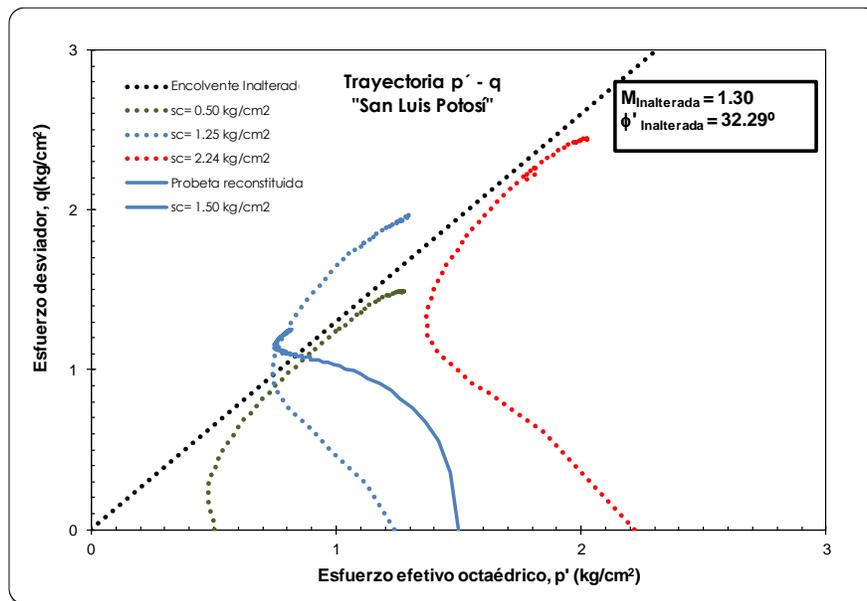


Figura 6-22 Trayectorias de esfuerzo p'-q del estado de San Luis Potosí.

Con respecto al comportamiento de los materiales antes presentados, se puede observar que para las probetas inalteradas se tiene un comportamiento dilatante, lo cual es respaldado por la disminución de la presión de poro durante la prueba. Mientras que las probetas reconstituidas presentan un comportamiento contractivo-dilatante.

La relevancia de las trayectorias de esfuerzos se refleja en que proporcionan el ángulo efectivo de fricción interna efectivo, con el cual se pueden comparar los resultados obtenidos con el criterio Mohr-Coulomb, tal y como se muestra en la Tabla 6-7.

Aunque cabe aclarar que existe una consideración importante, ya que los círculos de Mohr para la realización de su análisis (i.e., aplicación de la “Ley de Resistencia”) únicamente consideran el punto del esfuerzo desviador máximo para la falla, mientras que el criterio obtenido en las trayectorias de esfuerzo considera todo el comportamiento de los esfuerzos durante toda la etapa.

Tabla 6-7 Comparación del ángulo de fricción interna.

Sitio	Muestra	Ángulo de fricción		
		Esf. efectivos	M	ϕ' de trayectoria
		ϕ'		p'-q
		grados	-	kg/cm ²
Colima	Inalteradas	18.78	0.85	21.86
	Reconstituidas	33.69	1.39	34.33
Zacatecas	Inalteradas	29.74	1.34	33.21
	Reconstituidas	34.44	1.43	35.23
San Luis Potosí	Inalteradas	21.31	1.3	32.29
	Reconstituidas			

6.7 Observaciones generales de la investigación

- Los jales utilizados en esta investigación presentaron valores muy similares en su caracterización respecto a las investigaciones precedentes mostradas en este trabajo Bernal (2016) y González (2019), como los son: el límite líquido, peso volumétrico del material, contenidos de agua y densidad de sólidos.
- En el aspecto de la compactación, es una parte del trabajo sencilla y práctica, en la cual no se necesita un estudio previo que demande mucho tiempo. En un punto en el que hay que poner atención se encuentra en la aplicación de carga, ya que como se menciona en el procedimiento, se cuenta con el peso volumétrico a alcanzar. El método, como está planteado, no determina el peso de carga de aplicación para la compactación a diferencia de otros métodos como lo es el de amasado; prácticamente la aplicación de carga es por medios visuales hasta que se verifica el peso de la probeta al término de la formación con respecto a lo calculado. Por lo que habría que profundizar en mejoras para el método de compactación, en la cual se muestre una mejor estandarización.

- Se puede observar con respecto a las muestras inalteradas de Colima y Zacatecas que durante la falla se presentó una forma abarrilada de la probeta, lo cual pudo deberse posiblemente a la estructura del material y esto en consecuencia ocasionar una mayor disipación de la presión de poro. Mientras que en las muestras de San Luis Potosí para el mismo caso de probetas inalteradas, se exhibe que se generó una posible falla frágil, la cual podríamos atribuir a los estratos presentados en la muestra. Para el caso de probetas reconstituidas, se observó que la forma de barril durante la falla no fue tan notoria como en las inalteradas, por lo cual esto pudo provocar que la presión de poro fuera mayor. Esto es una simple observación con respecto a lo que se puede ver en las figuras obtenidas de algunas fallas (e.g., Figura 5.23), puesto que no se obtuvo un archivo fotográfico de todas las pruebas.
- Respecto a los parámetros mecánicos obtenidos entre las muestras reconstituidas e inalteradas, se pudo observar que existe una similitud de resultados en las muestras de Zacatecas y San Luis Potosí, las cuales son las muestras con mayor contenido de finos, aunque para ser exactos necesitaríamos hacer más pruebas de investigación para verificar este hecho, en el cual el contenido de finos tenga una relación con los parámetros mecánicos. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación son muy similares a los mostrados en los estudios precedentes, lo cual es un indicio de que los valores que se obtuvieron están bien, pero habría que realizar una línea de investigación aún más específica. De manera general, se tiene que el ángulo de fricción interna oscila entre los 18 y 35°.
- Una de las conclusiones más importantes a recalcar tiene que ver con uno de los trabajos precedentes mostrados, específicamente el de González (2019), en donde el autor utilizó el mismo método de compactación y muestras de residuos mineros, donde encontró que el comportamiento esfuerzo-deformación de muestras inalteradas y reconstituidas en pruebas triaxiales tipo UU es muy semejante, y por ende mostrar los mismos parámetros mecánicos; obviamente los resultados presentados en este trabajo tienen ciertas restricciones. La aportación principal del trabajo que aquí se presenta es que, a diferencia de González (2019), se logró trabajar con muestras saturadas, o con un alto grado de saturación como se muestra en este trabajo, es por ello que este trabajo podría ser considerado como la continuación, en donde se obtuvo que las curvas esfuerzos deformación de las muestras no son parecidas, pero los parámetros mecánicos presentan algunas similitudes.
- En el aspecto de las trayectorias, se presentó una tendencia clara de materiales dilatantes en el caso de las probetas inalteradas, mientras que para las reconstituidas se pudo observar un comportamiento semi-contractivo dilatante, en donde la presión de poro se hizo notar y esto se mostró en las muestras reconstituidas que son menos dilatantes que las muestras inalteradas. Por ello, se observó una mayor similitud entre los resultados obtenidos de los círculos de Mohr y las trayectorias de esfuerzo para las muestras de Colima y Zacatecas.

Se recomienda ampliar la investigación realizando una comparativa más amplia con materiales de otros sitios y bajo diferentes condiciones de compacidad y porcentaje de finos del material inalterado.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presentó la caracterización geotécnica de tres muestras de residuos mineros (i.e., jales) procedentes de minas ubicadas en los estados de Colima, Zacatecas y San Luis Potosí, las cuales se determinan de acuerdo al SUCS como ML (i.e., limo arenoso de baja compresibilidad) con un contenido de finos mayor al 87% de la muestra total. Además, se reportan 16 ensayos triaxiales tipo CU realizados entre muestras inalteradas y reconstituidas. Para la ejecución de estas pruebas fue necesario labrar probetas inalteradas y evaluar su comportamiento esfuerzo-deformación y parámetros mecánicos. Adicionalmente, se reconstituyeron probetas con el material utilizado en los ensayos inalterados mediante un método de compactación estática, buscando reproducir las condiciones volumétricas (i.e., relación de vacíos y peso volumétrico seco) de los ensayos inalterados. El propósito principal de la realización de estas pruebas fue la comparación del comportamiento esfuerzo desviador-deformación unitaria axial en muestras inalteradas y reconstituidas para suelos procedentes de depósitos mineros.

Se observó en dicha comparación que no se presenta un comportamiento similar, ya que al parecer en las probetas inalteradas se observó una mayor resistencia respecto a las reconstituidas, para las mismas condiciones iniciales. Además, para las pruebas realizadas en cada una de las muestras, en series de tres, se compararon los parámetros mecánicos (i.e., cohesión y ángulo de fricción interna) en esfuerzos totales y efectivos tanto para las muestras inalteradas y reconstituidas. De esta comparación se encontró que sólo en un sitio (i.e., muestra de Zacateca) los parámetros mostraron resultados muy parecidos en esfuerzos totales y efectivos, mientras que en el caso de Colima posiblemente se presentó una restructuración de las probetas reconstituidas durante el desarrollo del ensaye provocando una variación en los resultados. Es importante mencionar que la estructura del suelo entre muestras inalteradas y reconstituidas, es totalmente diferente de acuerdo a su proceso de formación, esto influye en el comportamiento esfuerzo-deformación, pero no afecta significativamente a los parámetros mecánicos.

Por otro lado, se concluyó que la saturación de las probetas es una de las etapas más importantes en el procedimiento de ensaye, puesto que ésta etapa de la prueba es la que consume mayor tiempo en el desarrollo de la prueba, dado que podría tardar de 3 a 12 días. Las probetas en donde mayor problema hubo fue en las inalteradas, ya que lograr su saturación en ocasiones representaba una gran labor. Es un hecho que se debe mejorar el proceso de saturación para este tipo de material, en donde se recomienda la saturación por medio del paso de agua por gravedad o por inyección para incrementar el grado de saturación y permitir la salida de aire de la probeta.

Una de las razones más importantes de la realización de este trabajo es mostrar las implicaciones que conlleva utilizar muestras reconstituidas en lugar de inalteradas, puesto que éstas últimas en ocasiones no se pueden obtener en el sitio por diferentes razones (i.e., por la extracción y por la inexistencia de depósitos para el caso de nuevos

proyectos), y es entonces que se podría considerar el uso de probetas reconstituidas si éstas tuvieran parámetros mecánicos muy similares a los que se obtienen en probetas inalteradas. Lo anterior con la finalidad de proporcionar la caracterización del jal de un depósito minero. Sin embargo, este estudio demuestra que esto es posible siempre y cuando se tengan ciertas condiciones (como se muestra en el caso de Zacatecas específicamente el peso volumétrico seco que es relativamente más alto), ya que como se menciona, los resultados no son comparables para todos los depósitos.

Las muestras utilizadas en este trabajo son jales con un alto contenido de finos y, además, se reconoce que la cantidad de pruebas realizadas no es suficiente para dar por sentado que los resultados que se presentan en este trabajo. Por otro lado, esta tesis busca orientar futuros estudios para complementar esta línea de investigación, ya que el diseño de los depósitos de jales es importante para diversos ámbitos ambientales y sociales.

Se recomienda ampliar la investigación al estudio de más muestras provenientes de estas y otras unidades mineras, donde se incluyan muestras de diferente porcentaje de finos, compacidad y roca de origen.

REFERENCIAS

- AIMMGM, A. d. (2015). *Mi México es minero*. México: AIMMGM.
- Arriaga, A. G. (2019). Aspectos de Construcción. *V Seminario sobre Depósitos de Jales*.
- ASTM. (2003). D 4767-95 Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. *Annual Book of ASTM standards*, 924-934.
- ASTM. (2007). D 422 Standard test method for particle size analysis of soils.
- ASTM. (2010). D 2216-10 Laboratory Determination of water (moisture) Content of soil and rock by mass.
- ASTM. (2011). D 2487-11 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM. (2014). D 4318-10 Standard tests methods for Limit liquid, Plastic limit and Plasticity index of soils.
- ASTM. (s.f.). D 4220/ D4220M-14 Standard practices for preserving and transporting soil samples .
- Bard, E., Campaña, J., Torres, P., Valenzuela, L., & Cifuentes, L. (2014). Comportamiento de Arenas a altas presiones de confinamiento: Comparacion entre arenas de relaves y naturales. *Sociedad Chilena de Geotecnia* .
- Bernal, M. (2016). Influencia de la compacidad relativa y el esfuerzo efectivo en el comportamiento esfuerzo-deformación de jales saturados. *Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería*, 155.
- Bernal, M., & Flores, O. (2016). Influencia de la compacidad relativa y contenido de agua en el comportamiento esfuerzo deformación de jales parcialmente saturados. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- Bernal, M., Hernandez, V., Flores, O., Hernandez, S., Gúzman, A., & Candelaria, J. (2018). Determinación del ángulo de fricción interna por medio de pruebas triaxiales tipo UU y CU en jales. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- Blight, (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. *CRC Press*.
- Briseño, O. M. (2010). La normatividad ambiental en materia de presa de jales . *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Budhu, M. (2000). *Soils Mechanics and Foundations* . New York: John Wileys & Sons Inc. .

- Candelaria, J., Bernal, M., Flores, O., Guzmán, A., & Hernandez, S. (2018). Determinación de límites de consistencia en jales usando conos penetrantes. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- Deméneghi, A., & Puebla, C. (2001). *Apuntes de Mecánica de Suelos Vol. I*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Economía. (11 de Enero de 2020). *Secretaría del Gobierno de México*. Obtenido de Secretaría de Economía, Acciones y Programas: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Fell, R., MacGregor, P., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Fernandez, A. A., & López, N. (2016). Fuerzas de filtración en depósitos de relaves mineros. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- Fernandez, A., & Ovando, E. (2018). Redondez y esfericidad de partículas de relaves mineros, utilizando programas automáticos. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 6.
- Flores C., O., Aguilar B., R., Reyes, S., & Orozco, R. (2010). Diseño geotécnico de una presa de jales en el estado de Hidalgo. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Flores, O. (2019). Parámetros mecánicos e hidráulicos en campo y laboratorio de jales. *XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Flores, O., Santos, J., & Rodríguez, B. (2012). Análisis de estabilidad para la sobrelevación del depósito de jales número 5, unidad minera La Negra. *XXVI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- González, C. M., & Romo, P. (2015). Nueva técnica de pluviación para formar depósitos de arena en laboratorio. *Serie Instituto de Ingeniería de la UNAM*, 1-2.
- González, H. F. (2019). *Comparación del comportamiento esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales tipo UU de muestras de residuos mineros (jales) inalteradas y reconstituidas*. CDMX, Mexico.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1972). *Mecánica de Suelos*.
- Mendoza, M. J. (1998). Técnicas alternativas para la determinación del límite líquido de suelos. *Serie del Instituto de Ingeniería*.
- Orozco, R. V. (2010). La ingeniería geotécnica en las presas de jales mexicanas. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.

- Ovando, E., & Segovia, J. (1996). *Luciación de arenas*. CDMX: TGC publicaciones.
- Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1983). *Ingeniería de cimentaciones*. Limusa.
- Pérez, P. F. (2019). Norma Oficial Mexicana de Presas de Jales. *V Seminario sobre Depósitos de Jales* .
- Ramírez, E. R. (2001). Tailings Dams in México. *Almacenamiento de Residuos mineros en México Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 111-114.
- Rodriguez, R. (2006). Hidrogeotechnical characterization of a metallurgical waste. *Canadian Geotechnical journal Vol.43*.
- Sanabria, J. (2018). *Aspectos geotécnicos y ambientales en operaciones mineras*. CDMX: UNAM .
- Santos, J. (2012). Estudios ambientales como instrumentos para garantizar la seguridad de los depósitos de residuos mineros. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Santos, J., Guzmán, H., & Chacón, W. (2010). *La importancia de incorporar temas relacionados con las presas de jales en los planes de estudio de las carreras de Ingeniería de Minas y Metalurgia*. Acapulco, Guerrero: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- SEMARNAT. (2003). *Norma Oficial NOM-052-SEMARNAT-2003*. México .
- SEMARNAT. (2003). Norma Oficial NOM-141-Semarnat-2003. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- SEMARNAT. (2009). *NOM-157-SEMARNAT-2009 " Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros"*. Mexico, D.F.
- Shamzai, A., Park, A., S., Bateni, M., & Ayatollahi, A. (2007). Geotechnical characteristics of copper mine Tailings: A case study. *Geotechnical and geological engineering*.
- Skempton, A. W. (1954). The pore pressure coefficients A and B . *Géotechnique*, 5.
- Urdangaray, E. (11 de enero de 2020). *Archivo Historico Minero* . Obtenido de http://www.archivohistoricominer.org/portfolio_page/interior-de-la-mina-de-hierro-orconera-iii-de-ybarra-hermanos-la-arboleda-valle-de-trapaga-vizcaya-2019-9/

Valdez, A. (13 de mayo de 2019). *La Jornada*. Obtenido de <https://www.jornada.com.mx/ultimas/estados/2019/05/13/profepa-confirma-derrame-de-jales-mineros-en-arroyo-de-zacatecas-5555.html>