



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**Comparación del comportamiento esfuerzo-deformación
en ensayos triaxiales tipo UU de muestras de residuos
mineros (jales) inalteradas y reconstituidas**

T E S I N A

Que para optar por el grado de:

Especialista en Geotecnia

P R E S E N T A:

Ing. Hazel Fernando González Rendón

Director de Tesina: **Dr. Osvaldo Flores Castrellón**

México, Cd. Mx.

Septiembre 2019

Dedicatoria

A Dios por permitirme concluir esta meta.

A mi padre, José Luis López Guerrero, por todas sus enseñanzas que me han ayudado a alcanzar objetivos y seguir proponiéndome más metas.

Agradecimientos

Al Doctor Osvaldo Flores Castrellón, por su apoyo, paciencia y disposición, en toda la elaboración del trabajo presente, además de tener siempre un trato amable y respetuoso.

A la UNAM y al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de realizar mis estudios, asimismo, de disponer de sus instalaciones. A la M. en I. Zayra Hernández Flores y al laboratorista Javier Hernández por transmitirme sus conocimientos en laboratorio para concluir con la etapa experimental de esta tesina.

Al Doctor Raúl Aguilar Becerril, por guiarme en la búsqueda de tema de titulación, por sus consejos y por siempre estar atento en mis avances.

A Dayna Zúñiga Torres por acompañarme en esta aventura, por sus consejos, su apoyo incondicional, por darme aliento para seguir siempre adelante y buscar nuevos retos, por su confianza y amor.

A mi madre Claudia Rendón Zarco, por su cariño, comprensión y apoyo en todos los objetivos que me propongo. A mis hermanas Araceli, Rubí y Nicole por siempre recibirme con una sonrisa. Gracias a mis abuelos José Rendón y Petra Zarco, porque sé que están conmigo.

Al entrenador Javier Vázquez Fernández, que me ha enseñado el valor de la disciplina y la constancia; buscar ganar siempre y perseguir metas más altas.

A mis compañeros de laboratorio Mario, Rosario, Montse, Alan, Eduardo, Mauricio, gracias por compartir sus consejos y enseñanzas. En especial a Bryan Uriel, por su apoyo en la realización de la etapa experimental, además de ser un buen amigo.

Contenido

Índice de Figuras	I
Índice de Tablas	II
Resumen	IV
Justificación	V
Alcances	V
Objetivos	V
1 Introducción y estudios previos	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Marco legal en los residuos mineros	2
1.2 Jales	2
1.2.1 Fuentes de los jales	3
1.2.2 Clasificación de jales	4
1.3 Depósitos de jales	4
1.3.1 Estructura fundamental de una presa de jales	5
1.3.2 Métodos para la construcción de presas de jales	6
1.3.3 Tipos de disposición de jales	7
1.3.4 Operación y cierre de los depósitos mineros.	8
1.4 Comportamiento geotécnico de los jales	8
1.4.1 Relación de vacíos	9
1.4.2 Resistencia al esfuerzo cortante	9
1.4.3 Permeabilidad	9
1.5 Modelos hiperbólicos de comportamiento esfuerzo-deformación	9
1.6 Estudios previos	12
1.6.1 Granulometría	12
1.6.2 Contenido de agua	12
1.6.3 Densidad de sólidos y peso volumétrico	12
1.6.4 Límites de consistencia	12
1.6.5 Ángulo de fricción interna	13
1.6.6 Muestra reconstituida	17
2 Descripción del equipo	21

2.1	Descripción de la prueba.....	21
2.2	Cámara triaxial cíclica	22
2.2.1	Instrumentación del equipo.....	23
2.2.2	Calibración del equipo	25
3	Descripción de materiales y procedimientos de ensaye.....	29
3.1	Descripción de materiales	29
3.1.1	Propiedades índice	29
3.2	Formación de probetas inalteradas.....	32
3.3	Formación de probetas reconstituidas	33
3.3.1	Preparación de material.....	33
3.3.2	Compactación del material	35
3.4	Procedimiento de ensaye	36
3.4.1	Montaje	36
3.4.2	Ensaye y etapa de falla	37
4	Presentación y análisis de resultados	40
4.1	Reconstitución de probetas.....	40
4.2	Comparación de resultados de muestras inalteradas y reconstituidas.....	42
4.2.1	Análisis de las curvas esfuerzo-deformación y círculos de Mohr.....	45
4.2.2	Mecanismo de falla.....	48
4.3	Análisis de resultados en función del grado de saturación.....	49
4.4	Análisis de resultados en función del módulo tangente inicial y carga máxima	50
4.5	Modelo propuesto para curvas esfuerzo-deformación	52
4.5.1	Ajuste teórico.....	53
4.5.2	Normalización de parámetros	55
4.5.3	Comparación de curvas experimentales y curvas predictivas	57
5	Conclusiones y recomendaciones.....	60
	Referencias	62
	Anexo A.....	65
	Anexo B.....	68
	Anexo C.....	73

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Proceso de conminución y beneficio de minerales. Modificado de Dold (2010).	3
Figura 1.2 Estructura de una presa de Jales. Modificada de Moreno (2017).	5
Figura 1.3 Método Aguas Arriba. (Bernal,, 2016)	6
Figura 1.4 Método Aguas Abajo. (Bernal, 2016).	6
Figura 1.5 Método línea central. (Bernal, 2016)	7
Figura 1.6, Curva hiperbólica esfuerzo-deformación (Álvarez, 2019)	10
Figura 1.7 Definición de términos involucrados en la ecuación, (Álvarez, 2019).	11
Figura 1.8 Límite líquido con penetración de 20 mm y límite plástico con 5mm, (Candelaria, et al., 2018)	13
Figura 1.9 Ángulo de fricción interna obtenido en pruebas triaxiales tipo UU, en función del grafo de saturación, (Bernal et al., 2018).	14
Figura 1.10 Ángulo de fricción interna obtenido en pruebas triaxiales tipo UU, en función del contenido de finos, (Bernal et al., 2018).	14
Figura 1.11 Sondeo con ficómetro (Hernández et al., 2018).	Error! Bookmark not defined.
Figura 1.12 Ángulos de fricción obtenidos por ficómetro vs Número de golpes, (Hernández et al., 2018).	16
Figura 1.13 Ángulos de fricción obtenidos por pruebas triaxiales tipo UU vs Número de golpes, (Hernández et al., 2018).	16
Figura 1.14 Curvas esfuerzo-deformación para un $\sigma_c=1.0 \text{ kg/m}^3$, (Hernández V., 2016)	17
Figura 1.15 Variación de la q_{max} vs el grado de saturación para un $\sigma_c=1.0 \text{ kg/m}^3$, (Hernández V., 2016)	18
Figura 1.16 Correlación entre peso volumétrico seco y ángulo de fricción interna, (Bernal, 2016).	18
Figura 1.17 Comparación entre los resultados obtenidos y los calculados para el ángulo de fricción interna en TET (Bernal, 2016).	19
Figura 1.18 Comparación entre los resultados obtenidos y los calculados para el ángulo de fricción interna en TEE (Bernal, 2016).	19
Figura 1.19 Permeabilidad en función de la relación de vacíos para muestras inalteradas y remoldeadas de jal, con diferentes contenidos de finos, (García, 2019)	20

Capítulo 2

Figura 2.1 Cámara triaxial cíclica en prueba. Instituto de Ingeniería de la UNAM	21
Figura 2.2 Esfuerzos principales, (Hernández, 2016)	22
Figura 2.3 Componentes generales del equipo triaxial cíclico, Instituto de Ingeniería de la UNAM	23
Figura 2.4 Esquema de transductores de la CTC, Instituto de Ingeniería de la UNAM	24
Figura 2.5 Menú de Calibración, Lab View	25
Figura 2.6 Calibración experimental de transductores, Lab View.	25
Figura 2.7 Curva de calibración de la celda de carga al 100%, Lab View	26
Figura 2.8 Curvas carga sensor vs carga patrón y error parcial vs precisión, carga al 100%; Instituto de Ingeniería de la UNAM	26
Figura 2.9 Pesas colocadas encima del pedestal y celda de carga, Instituto de Ingeniería de la UNAM	27
Figura 2.10 Tornillo micrométrico, Instituto de Ingeniería de la UNAM	27
Figura 2.11 Columna de mercurio y sensor de confinamiento, Instituto de Ingeniería de la UNAM	28

Capítulo 3

Figura 3.1 Cono sueco, Instituto de Ingeniería de la UNAM	31
Figura 3.2 Curva de fluidez, Instituto de Ingeniería de la UNAM	32
Figura 3.3 Procedimiento de labrado, Instituto de Ingeniería de la UNAM	33
Figura 3.4 Disgregación del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM	33
Figura 3.5 Cantidad de sólido y agua para formar probeta, Instituto de Ingeniería de la UNAM	34
Figura 3.6 Homogenización del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM	34
Figura 3.7 Molde y pisón, Instituto de Ingeniería de la UNAM	35
Figura 3.8 Escarificado y Compactado del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM	35
Figura 3.9 Probeta reconstituida, Instituto de Ingeniería de la UNAM	36
Figura 3.10 Probeta montada en la CTC 1, Instituto de Ingeniería de la UNAM.	37
Figura 3.11 Configuración de prueba, Lab View.	38
Figura 3.12, Configuración del esfuerzo confinante, Lab View	39
Figura 3.13 Curvas del ensaye triaxial. Lab View.	39

Capítulo 4

Figura 4.1 Formación y montaje de probeta con un $w > 21\%$, Instituto de Ingeniería de la UNAM	41
Figura 4.2 Peso volumétrico de inalteradas vs reconstituidas	41
Figura 4.3 Contenido de agua de inalteradas vs reconstituidas	42
Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación de Serie 1.	45
Figura 4.5 Círculos de Mohr de Serie 1.	46
Figura 4.6 Curva esfuerzo deformación Serie 4.	46
Figura 4.7 Círculos de Mohr de Serie 4	47
Figura 4.8 Probetas falladas, inalterada y reconstituida respectivamente.	49
Figura 4.9 Ángulo de fricción aparente en función del grado de saturación	50
Figura 4.10, Determinación de E_0 y $q_{máx}$	51
Figura 4.11 S_r vs E_0	51
Figura 4.12 S_r vs $q_{máx}$	52
Figura 4.13 Parámetros de la ecuación	53
Figura 4.14 Curvas esfuerzo-deformación, experimental y teórica de Serie 4(Inalterada).	54
Figura 4.15 Curvas esfuerzo-deformación, experimental y teórica de Serie 4 (Reconstituida).	54
Figura 4.16 Parámetro “a” en función del S_r	55
Figura 4.17 Parámetro “b” en función del grado de saturación	56
Figura 4.18 Parámetro “c” en función del grado de saturación	56
Figura 4.19 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 0.5 kg/cm^2	57
Figura 4.20 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 1.37 kg/cm^2	58
Figura 4.21 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 3.53 kg/cm^2	58

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Clasificación de Jales (Moreno, 2017)	4
Tabla 1.2 Tipos de disposición de Jales	7

Capítulo 2

Tabla 2.1 Marca, modelo y capacidad de los sensores del equipo	25
Tabla 2.2 Calibración de sensores	26

Capítulo 3

Tabla 3.1 Propiedades índice de las muestras ensayadas	29
Tabla 3.2 Calculo para determinar el Gs, Instituto de Ingeniería de la UNAM.	30
Tabla 3.3 Calculo del contenido de agua, Instituto de Ingeniería de la UNAM	31

Capítulo 4

Tabla 4.1 Resultados de pruebas triaxiales UU en muestra inalterada	43
Tabla 4.2 Resultados de pruebas triaxiales UU en muestra reconstituida	44
Tabla 4.3 Parámetros mecánicos obtenidos de ensayos UU en probetas inalteradas y reconstituidas	45

Resumen

La industria minera ha tenido una presencia muy fuerte en México de manera importante desde la época colonial, actualmente existe una gran cantidad de minas que operan en el país, además de nuevas técnicas de minado para producciones de mayor volumen, debido a esto se genera una cantidad de residuos mineros (jal), lo que se requieren obras para su almacenamiento, éstas son comúnmente construidas con el mismo jal.

Garantizar estabilidad estructural de un depósito de jales es indispensable para la buena operación de una unidad minera. La revisión de este tipo de estructuras implica llevar a cabo, un análisis geotécnico para determinar las propiedades mecánicas del material (módulo de elasticidad, ángulo fricción interna y cohesión), el estudio de las condiciones mecánicas y geológicas del basamento donde se desplanta el depósito y las condiciones hidrológicas de la zona para el diseño o revisión de las obras hidráulicas, entre otros.

En el presente trabajo se aborda un estudio experimental de laboratorio para la caracterización física y mecánica de un residuo minero. Se trata de dar respuesta a la inquietud de si los parámetros mecánicos obtenidos en muestras reconstituidas pueden ser comparables con los obtenidos en muestras inalteradas que tengan las mismas condiciones volumétricas y granulométricas iniciales. Para estos se ejecutaron pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas (tipo UU) en probetas inalteradas, para evaluar parámetros de resistencia (ángulo de fricción aparente, cohesión y módulo de elasticidad secante). Posteriormente con el mismo jal de la muestra inalterada se reconstituyen probetas con las mismas condiciones volumétricas y de humedad, con el fin de comparar el ángulo de fricción aparente obtenido en ambas condiciones.

Se comparan los parámetros mecánicos obtenidos con ambos tipos de muestras y se define la pertinencia de poder utilizar muestras reconstituidas cuando no sea posible obtener inalteradas.

A partir de las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas se plantea un modelo hiperbólico de ajuste, se analizan los valores que mejor ajustan el modelo numérico a los resultados experimentales y la relación que éstos guardan con parámetros índice del jal (grado de saturación y porcentaje de finos).

Justificación

Al ser México un país con una importante actividad minera la generación de residuos provenientes de los procesos de beneficio de minerales ha aumentado, por eso se requiere contar con depósitos de jales con una revisión estructural confiable, debido a esto se debe conocer las propiedades físicas y mecánicas del material que los componen. No siempre es posible obtener muestras inalteradas de las presas de jales, por lo que es importante saber si los datos experimentales obtenidos por muestra reconstituida en el laboratorio son del mismo orden al valor de las inalteradas.

Alcances

- 1- Realizar una recopilación bibliográfica que contenga conceptos claves de los depósitos de residuos mineros, normativa en México para presas de jales y características físicas y geotécnicas de estos materiales.
- 2- Caracterizar por medio del SUCS las muestras de jales utilizadas en este trabajo.
- 3- Calibración y operación del equipo experimental.
- 4- Reconstitución, con contenido de agua y peso volumétrico correspondiente al de las inalteradas.
- 5- Obtención del ángulo de fricción interna aparente de muestra inalterada y reconstituida por medio de pruebas triaxiales tipo UU.
- 6- Comparación de resultados de muestra inalterada y reconstituida (se considera que las muestras obtenidas a través de tubos Shelby provenientes de sondeos selectivos son inalteradas).
- 7- Obtener un modelo de comportamiento que se ajuste a las curvas esfuerzo desviador- deformación unitaria de los materiales ensayados.

Objetivos

- 1- Realizar pruebas triaxiales tipo UU en muestras inalteradas y reconstituidas, con las mismas condiciones iniciales de peso volumétrico y contenido de agua.
- 2- Discutir los resultados sobre la veracidad de obtener parámetros mecánicos en muestras reconstituidas en laboratorio.
- 3- Proponer un modelo de comportamiento esfuerzo-deformación que se ajuste a las curvas obtenidas de manera experimental del material ensayado.

1 Introducción y estudios previos

En la Industria Minera Mexicana comúnmente el producto final es un concentrado de mineral con valor económico, para llegar a él, el proceso se divide en dos partes, la primera es donde se extrae la roca del subsuelo, se mina; la siguiente es la fase metalúrgica, que a su vez se divide en dos operaciones, una dedicada a la reducción de tamaño y otra a la concentración de minerales. En la última se generan una gran cantidad de residuos, los cuales se almacenan cerca de la unidad, estos depósitos son comúnmente llamados “depósitos de jales o presas de jales”.

En el almacenamiento de los jales se debe tener un control, tomando en cuenta las características que posee, es decir, cantidad, impacto, riesgos, propiedades físicas y propiedades mecánicas; con base en las condiciones geotécnicas del sitio de la obra se realiza el diseño de la presa. En caso de que no exista un manejo adecuado de dichos residuos puede desembocar en un daño ambiental y estructural del depósito (Espino J., 2015).

1.1 Antecedentes

La minería en México comenzó en la época prehispánica, principalmente con la explotación de cobre, oro y plata. En el periodo de la colonia las zonas de Taxco, Real del Monte y Guanajuato adquieren una importante actividad minera, convirtiéndose en la principal actividad económica de la Nueva España, donde el principal recurso era la plata. Como resultado de esta industria se comienza a tener desarrollos tecnológicos en el territorio, como el método de patio, en el que por medio del mercurio se lograba el beneficio de la plata, estos procedimientos dejaban residuos, los cuales se almacenaban cerca de la unidad, sin ninguna medida de control (Muñoz, 1986; PRISA, 2011).

Después del periodo de Independencia hasta el inicio del Porfiriato, la minería mexicana tuvo una etapa turbulenta, no obstante, después de este lapso, la extracción y beneficio de minerales preciosos perdió importancia; sin embargo, los metales industriales retomaron mucho camino, lo cual trajo una revolución en la industria metalúrgica, principalmente en las plantas de beneficio (PRISA, 2011).

La minería ha sido de gran importancia en el país para su desarrollo, un factor clave en la modernización y avance de las industrias siderúrgicas, químicas y electrónicas, pero no es hasta mediados del siglo pasado que se comienza a realizar estudios para el diseño geotécnico de los depósitos de residuos mineros (Vidal, 1988).

1.1.1 Marco legal en los residuos mineros

En México se ha desarrollado una legislación, que permite regular el manejo de los jales, está compuesta por leyes y normas, continuando con las primeras se encuentra el artículo 17 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, (LGPGIR), menciona que los residuos productos de la actividad minera -metalúrgica son de asunto federal. En el artículo 34 del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuo, señala que la regulación de los residuos mineros será llevada por las Normas Oficiales Mexicanas que competen en ellos (Moreno, 2017).

Como se ha mencionado antes, México es considerado un país con tradición minera, sin embargo, no fue hasta la década de los años setenta que por primera vez se establecen bases para prevenir impactos ambientales por dicho sector, en 1988 se expidió la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), fue el punto de partida para la emisión de instrumentos regulatorios, no solo para el ámbito minero (Briseño, 2010).

La LGEEPA por primera vez introduce obligatoriamente a presentar una manifestación de impacto ambiental para obras relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de minerales. En el año 2003 se publica la LGPGIR en la que se señala una regulación directa para las presas de jales, debido a su peligrosidad para el entorno. En los últimos años la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), estableció un marco normativo para regular distintos depósitos de residuos minero-metalúrgicos, con especificaciones basadas en estándares internacionales (Briseño, 2010).

El marco normativo se refiere a la expedición de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) específicas para el sector minero, las cuales contemplan medidas que deben asegurar la estabilidad física y química de los depósitos, la NOM-141-SEMARNAT-2003 menciona procedimientos, criterios y especificaciones para caracterizar jales, también puntualiza sobre la preparación del sitio destinado al almacén de los residuos mineros, norma la construcción, operación y cierre.

1.2 Jales

Los jales son los residuos producto de los procesos de molienda; se denominan suelos con comportamiento viscoelástico y susceptibles a fenómenos como la erosión pluvial, tubificación y la licuación. Por las características químicas que poseen deben cumplir exigencias medioambientales, por lo que es necesario conocer las características del sitio destinado para su depósito, tales como, geología, sismicidad, condición pluvial, además de un conocimiento profundo de las propiedades mecánicas inmersas en el material (Orozco, 2010; Jaime, 2018).

El nombre de jal proviene de “Xali”, palabra de origen náhuatl, cuyo significado es arena, en Sudamérica es conocido con el nombre de relaves. El tamaño de su partícula se divide en dos grupos: arenas, mayores de 0.074 mm; lamas, menores a 0.074 mm (Martínez, 2014).

1.2.1 Fuentes de los jales

Después de la etapa de extracción del mineral pasa por un proceso de conminución que se divide en trituración y molienda. En la trituración la roca es reducida a un tamaño menor de 5 in; sin embargo, no tiene la granulometría suficiente para su beneficio, es donde entra la segunda fase, molienda, cuyo objetivo es reducir el grano hasta un producto fino, menor a 0.2 mm. En esta etapa el material se trabaja en pulpa, para facilitar la reducción de éste y obtener una mezcla heterogénea de sólido y agua.

La pulpa descargada de los molinos es clasificada por un sistema de hidrociclones, los cuales a través del principio de fuerza centrípeta separan la fracción gruesa de la fracción fina, el primero es enviado a un proceso de flotación, que se realiza por medio de reactivos químicos los cuales funcionan como colectores y depresores. En éste se lleva a cabo la división de los materiales con valor económico (mena) y del residuo (ganga).

La ganga es enviada a tanques espesadores, para recuperar parte del agua y reutilizarla en el proceso, posteriormente el residuo es dirigido y descargado en los depósitos de almacenamiento de residuos mineros, depósitos de jales.

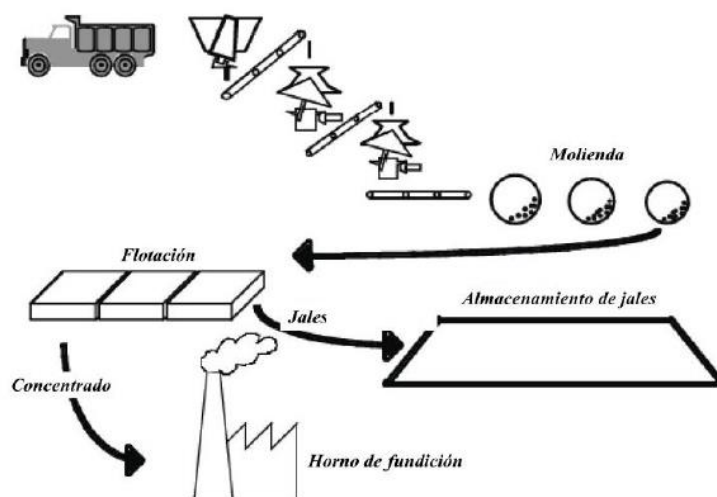


Figura 1.1 Proceso de conminución y beneficio de minerales. Modificado de Dold (2010).

1.2.2 Clasificación de jales

La composición química de los residuos provenientes del proceso de beneficio de minerales depende de las características del yacimiento mineral, al igual que las propiedades físicas, sin embargo, éstas también dependen del método de conminución de la roca y de la forma de depósito del residuo, Moren (2017) propone una manera de clasificar los jales por sus particularidades físicas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Clasificación de Jales (Moreno, 2017)

Categoría	Material	Descripción
Jales suaves	• Cenizas de carbón • Potasa	Contiene arena y fracciones de limo
Jales de roca dura	• Plomo / Zinc • Cobre / Níquel • Oro / Platino • Minerales de Hierro	Puede contener tanto fracciones de arena como de limo. Lodos de baja plasticidad.
Jales finos	• Lodo de Bauxita • Lodo de Alquitrán • Lodo de Kimberlita • Lodos de Arenas Minerales	Fracción de arena pequeña. Características de sedimentación y consolidación dominadas por partículas de tamaño limo / arcilla.
Jales gruesos	• Jal de arenas de alquitrán • Uranio	Contienen principalmente arena de fácil almacenamiento.

1.3 Depósitos de jales

Actualmente se han diseñado métodos para la construcción y operación de los sitios de almacenamiento de residuos mineros, los cuales se pueden clasificar en métodos convencionales y no convencionales; los primeros se refieren a aguas arriba, aguas abajo y línea central; por otro lado, los segundos son jales espesados, jales en pasta y jales utilizados como material de relleno (Moreno, 2017).

La función principal de los depósitos de jales es almacenar lodos de jal (sólido más agua), después de la descarga de material comienza un proceso de sedimentación, esto permite que las partículas se depositen gradualmente en el fondo del vaso de almacenamiento, lo que ayuda al reúso del agua (Flores, 1996).

Las partículas se segregan según su tamaño, regularmente las más grandes se sedimentan cerca de la salida del punto de descarga y las más finas son transportadas a la parte más lejana, debido a sus dimensiones y la presencia de agua, se debe estudiar si son susceptibles a la licuación durante un sismo, inestabilidad ante movimiento de maquinaria o bajo vibraciones producidas por voladuras o por tormentas (Bernal, 2016).

1.3.1 Estructura fundamental de una presa de jales

Los depósitos de residuos mineros están compuestos por distintos elementos constitutivos, los cuales deben de cumplir ciertos parámetros para brindar seguridad física-ambiental en la obra, a lo largo de todas las etapas de su vida. Orozco (2010) y Moreno (2017) menciona las propiedades que deben cumplir las partes que componen un depósito de jales:

- *Cortina contenedora*. Debe de ser permeable y resistente, tanto en condiciones químicas como físicas.
- *Bordo iniciador*. Es de material rocoso, además de ser la estructura inicial de la cortina contenedora
- *Canal de desvío*. Sirve para que las aguas de la creciente máxima escurran sin derramarse.
- *Corona*. Parte más alta de la cortina contenedora
- *Espejo de agua*. Superficie de agua clarificada de los sólidos
- *Playa*. Espacio entre la corona y el espejo de agua
- *Vaso de almacenamiento*. Volumen disponible dentro de la presa, debe de ser bien definido y estable por las laderas que lo delimitan.
- *Sistema decantador*. Obra que extrae agua almacenada en el vaso, debe de ser sobrado de capacidad, resistente y debe de permitir desfogar agua proveniente del estanque.
- *Vertedor de excedencias*. Debe de ser generoso con respecto a su sección hidráulica y estar en terreno firme.

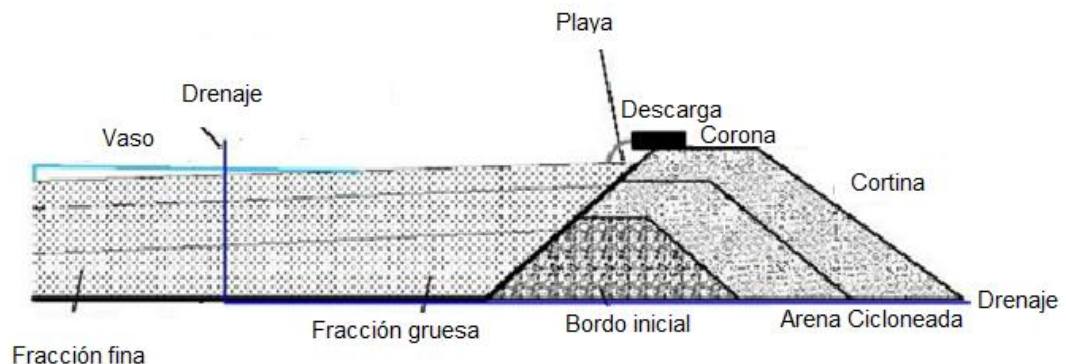


Figura 1.2 Estructura de una presa de Jales. Modificada de Moreno (2017).

1.3.2 Métodos para la construcción de presas de jales

- Método constructivo aguas arriba. Se trata de la construcción de un bordo inicialmente hecho con roca, en él se descargan residuos por medio de los hidrociclones. El material grueso se deposita sobre la corona del bordo, de forma que se realizan bermas, los finos con un contenido de agua alto se conducen a la parte superior para formar un estanque. La ventaja de este método es que es económico, no obstante, estos depósitos son más susceptibles a la licuación dinámica y estática, por presencia de sismos y llenado rápido de la presa, por lo tanto, han sido prohibidos en varios países.

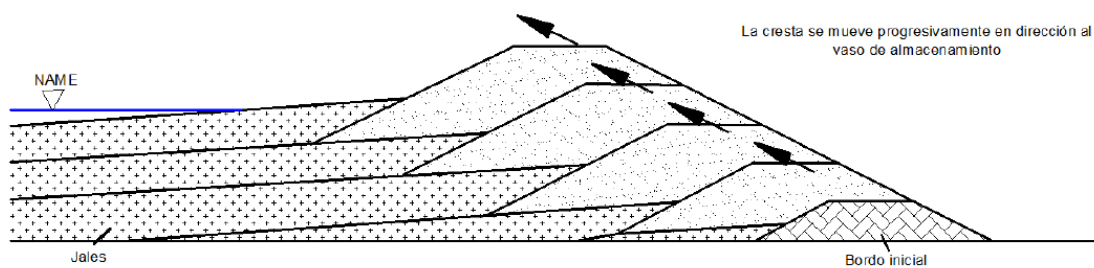


Figura 1.3 Método Aguas Arriba. (Bernal,, 2016)

- Método constructivo aguas abajo. De igual manera que en el método anterior, inicia con un bordo de material rocoso, la construcción de los bordos es en dirección contraria al vaso del almacenamiento, debe de contar con drenes pues se almacena agua.

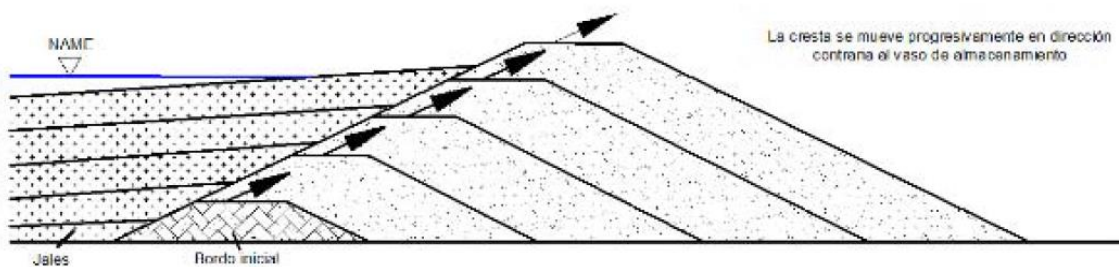


Figura 1.4 Método Aguas Abajo. (Bernal, 2016).

- Método constructivo línea central. En él se mantiene una corona vertical por encima de la corona del terraplén, el material que se encuentra en el vaso debe de estar separado la fase sólida de la líquida, para facilitar la recuperación del agua por medio de decantadores, la cual es regresada al proceso de beneficio.

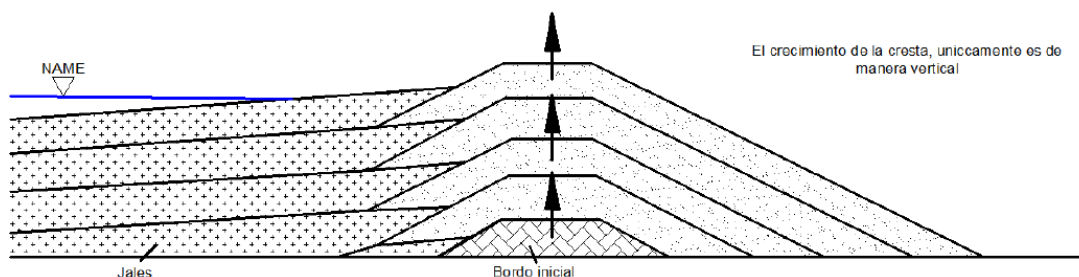


Figura 1.5 Método línea central. (Bernal, 2016)

1.3.3 Tipos de disposición de jales

El método de disposición de jales se refiere en la forma como se deposita los residuos mineros en el sitio del almacenamiento, comúnmente se realiza en cualquiera de las tres formas mostradas en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Tipos de disposición de jales

Técnica de disposición	Descripción
Un solo punto de descarga	La descarga se hace en un solo extremo, se debe de mover periódicamente para mantener homogeneidad en las diferentes secciones de la presa (Bernal, 2016).
Descargas múltiples	A lo largo de la corona se colocan espigas, con lo cual es posible múltiples puntos de descarga, a su vez ellos tienen válvulas independientes para un mayor control (Hernández V., 2016).
Hidrociclón	Este método permite dividir la fracción gruesa de la fina, de manera eficaz, logrando una mayor eficiencia en la construcción del depósito (Hernández V., 2016).

1.3.4 Operación y cierre de los depósitos mineros.

Durante la operación es indispensable llevar un programa de control y monitoreo que recopile información en campo, de esa forma se puede evaluar las estructuras, es decir, comprobar que se cumplan con los requerimientos de servicio, seguridad, productividad y desempeño durante de la vida productiva de la mina, en ocasiones es necesario ampliar las dimensiones de la presa de jales para aumentar su capacidad, esto sólo se puede hacer si las condiciones del sitio donde se ubique lo permiten (Jaime y Sanabria, 2018).

Una vez terminada la vida útil de la presa de jales se debe realizar un proceso de cierre del depósito, es necesario que desde el inicio de la obra se cuente con un plan de cierre, pues comúnmente los residuos contienen sustancias nocivas para el medio ambiente, Jaime & Sanabria (2018) refieren que los aspectos a tomar en cuenta en esta etapa son la estabilidad física del depósito, la estabilidad química de los residuos, además de una remediación al suelo para su uso posterior.

1.4 Comportamiento geotécnico de los jales

El conocimiento de los aspectos geotécnicos de los jales es indispensable en la construcción de un depósito de residuos mineros, pues en el diseño de la operación minera no se cuenta con el jal para su caracterización, por lo que se usa información de operaciones similares. Jantzer *et al.* (2008) indican que el tamaño de los granos, ángulo fricción interna y la densidad de la partícula se ven afectados por el origen del mineral del que proviene el jal, a diferencia, de la porosidad y la relación de vacíos en las que repercute el método de deposición.

Una vez en operación se analiza el material tanto laboratorio como en campo, también se recurre a las muestras inalteradas y alteradas, además del uso de instrumentación geotécnica (Jaime y Sanabria, 2018).

El comportamiento de los Jales no es prudente compararlo con el de suelos naturales de propiedades similares, una razón es que la formación de las partículas que los componen no es por procesos de sedimentación natural, por lo cual presentan cierta angulosidad, aún los más finos, además se eliminan los granos débiles por cuestiones inmersas en la etapa de beneficio, con lo que se obtiene un elevado ángulo de fricción interna (Hernández V. L., 2016).

1.4.1 Relación de vacíos

La relación de vacíos en los jales posee valores típicos según el tamaño de grano, para arenas comúnmente el parámetro es de 0.6 a 1.0, en el caso de los limos de jal este valor oscila entre 0.7 y 1.3. La distancia a los puntos de descarga del material, también modifica esta propiedad, los residuos más cercanos a los puntos de deposición presentan una relación de vacíos de 0.6 a 1.0, mientras que en los materiales más lejanos tienen valores que varían entre 1.0 y 1.6 (Jantzer *et al.*, 2008; García, 2019).

1.4.2 Resistencia al esfuerzo cortante

Como ya se ha referido anteriormente, los residuos mineros están constituidos por arenas y limos, la resistencia del material se relaciona con el comportamiento de los primeros, es decir, por los contactos intergranulares, pues los finos al ser elementos no plásticos, la aportación de cohesión es baja (Hernández V., 2016).

En los depósitos de jales se forman interfaces, éstas se constituyen cuando se coloca sobre el residuo geomembranas, la resistencia al corte en estas zonas puede ser distinta a las del material, es por eso que se debe de evaluar el ángulo de fricción interna en cada una de ellas, si fuera el caso (Jaime y Sanabria, 2018).

1.4.3 Permeabilidad

Moreno (2017) afirma que la permeabilidad depende del tamaño de grano, plasticidad, método de almacenamiento y profundidad el depósito. Si bien es difícil generalizar este parámetro en los jales se ha estudiado ampliamente la influencia de la relación de vacíos, concluyendo que la permeabilidad disminuye al disminuir dicho parámetro, pues hay una mayor compresibilidad de la fracción fina del material. García (2019) y Acevedo (2015), obtuvieron coeficientes de permeabilidad de muestras de jales de diferentes sitios, con valores dentro del rango de 1×10^{-6} a 1×10^{-7} cm/s.

1.5 Modelos hiperbólicos de comportamiento esfuerzo-deformación

En 1776 Coulomb propuso el primer modelo para explicar el comportamiento del suelo sometido a pruebas de resistencia al esfuerzo cortante, Terzaghi (1925) incluye el concepto de esfuerzo-efectivo en las envolventes de falla del modelo Mohr–Coulomb, posteriormente se desarrolló la Teoría del estado crítico, que involucra la deformabilidad del material (Zea *et al.*, 2016).

Se han propuesto modelos hiperbólicos como los de Konder (1963) y Duncan-Chang (1970), los cuales describen una ecuación para describir la relación entre los esfuerzos desviadores y las deformaciones de la parte ascendente de la curva esfuerzo-deformación, dicha relación no es línea, por esto se propone la expresión de una hipérbola para aproximarse a la curva (Figura1.6), la fórmula propuesta es la siguiente:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

Dónde:

$\sigma_1 - \sigma_3$ = esfuerzo desviador

ε = Deformación axial

a = Se refiere a la inversa del Módulo tangente inicial, E_0 , determinado experimentalmente.

b = Es determinado experimentalmente por la inversa del esfuerzo desviador máximo.

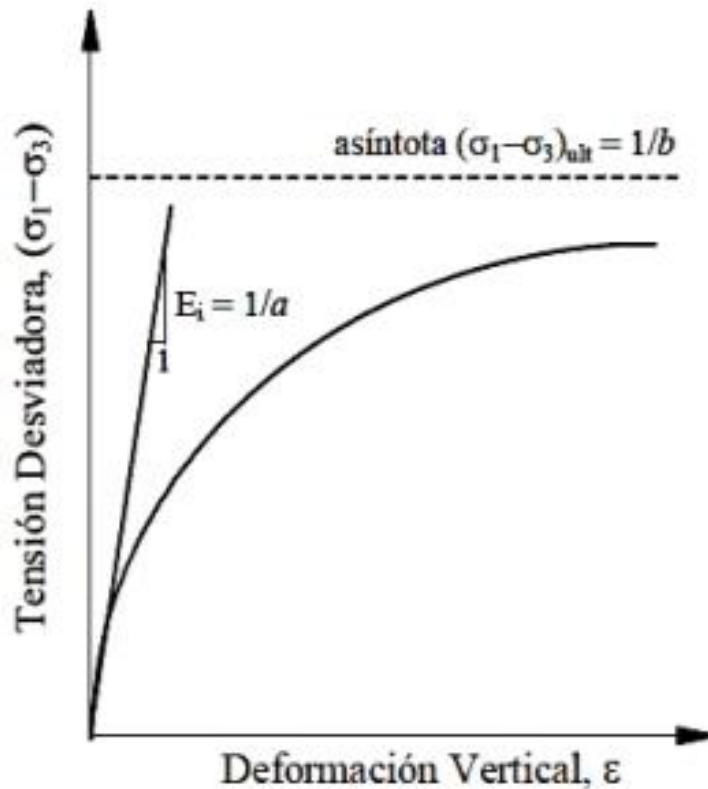


Figura 1.6, Curva hiperbólica esfuerzo-deformación (Álvarez, 2019)

Zea *et al.*, (2016), propusieron un modelo de Ductilidad General, EDG (Figura 1.7), el cual tiene equivalencias con la ecuación de Konder; sin embargo, se basa principalmente en el Principio de Proporcionalidad Natural (PPN) de Juárez Badillo (1986), debido a que en su expresión conjunta las dos curvas denominadas prepico y postpico, la primera describe la parte ascendente de la curva y la última se refiere a la pérdida de resistencia del material, la función que las conjunta es la siguiente:

$$q = \frac{1}{\frac{a}{\varepsilon} + b} - \frac{1}{\frac{c}{\varepsilon^\gamma} + d} \quad (2)$$

Dónde

q = Esfuerzo desviador

c = La inversa del Módulo secante postpico, E_0 , determinado experimentalmente.

d = La inversa de la diferencia entre resistencia máxima, q_u , y la resistencia residual, q_r , determinadas experimentalmente.

γ = Coeficiente de curvatura de la rama postpico.

a y b = Son equivalentes a los parámetros de Konder.

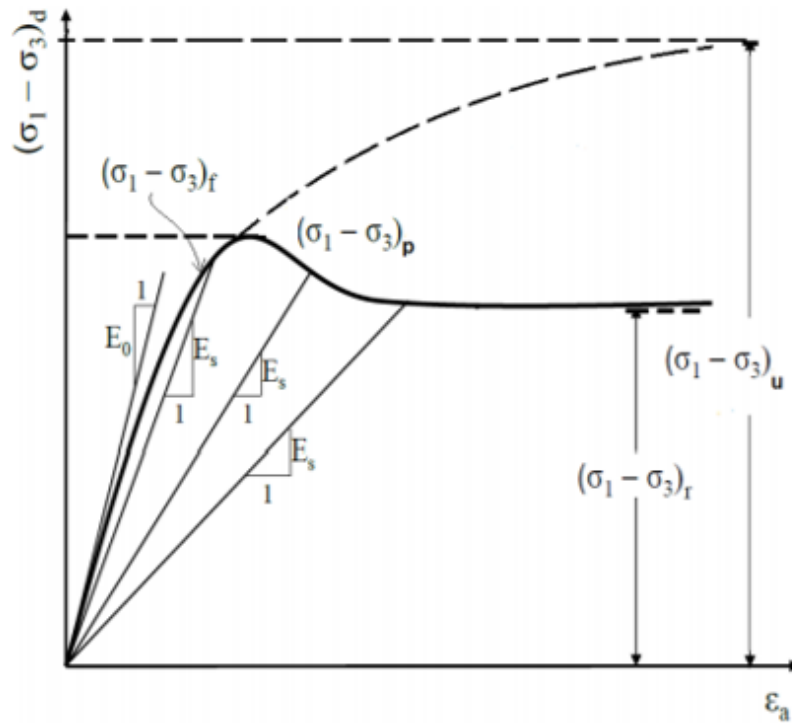


Figura 1.7 Definición de términos involucrados en la ecuación, (Álvarez, 2019).

1.6 Estudios previos

1.6.1 Granulometría

Los jales tienen partículas de tamaños de arenas y limos, es decir, de ± 0.074 mm, el D_{60} comúnmente se encuentra entre 0.01 mm y 0.05 mm, mientras el coeficiente de uniformidad (C_u) puede estar entre 3 y 8, los valores pueden depender de la distancia de la muestra al punto de descarga, estos resultados fueron obtenidos a través de evaluar residuos provenientes de minas suecas y canadienses, debe tomarse en cuenta que el tamaño de partícula, peso volumétrico, permeabilidad y resistencia al cortante, tienen valores mayores cerca del talud del depósito (Bussière, 2004; Jantzer *et al.*, 2008).

1.6.2 Contenido de agua

El contenido de agua de los residuos mineros varía, dependiendo el material y el método de almacenamiento, podemos encontrar jales con contenido de agua de orden del 10 al 40% (Moreno, 2017; García, 2019).

1.6.3 Densidad de sólidos y peso volumétrico

La densidad de los jales depende de tres factores, graduación, compactación del material y tipo de residuo (arena o limo), Volpe (1979) presenta los siguientes valores típicos en residuos mineros de cobre; pesos volumétricos de 1.49 a 1.75 g/cm³ en arenas, en limos de 1.12 a 1.44 g/cm³; densidad de sólidos de 2.6 a 2.8 para arenas y limos (Citado en Jantzer *et al.*, 2008). Estos parámetros se han encontrado con mayor valor, Bernal *et al.*, (2018) reportaron densidades de sólidos de 2.62 a 3.46 y pesos volumétricos de 1.4 a 2.1 g/cm³, para jales de Colima y Zacatecas.

1.6.4 Límites de consistencia

Los límites de consistencia para los residuos mineros resultan complicados de determinar con el método de la copa de Casagrande y los rollos de plasticidad, a pesar de que el contenido de finos sea mayor al 50%, esto se debe al origen del material, aunado a su comportamiento no plástico de la parte de la fracción fina. Candelaria *et al.*, (2018) evaluaron los resultados de esta propiedad con el uso del penetrómetro cónico, realizando 429 ensayos de residuos pertenecientes a 8 depósitos, encontraron los resultados fiables cuando se utiliza una penetración de 20 mm para el límite líquido y 5 mm en el límite plástico, éstos se muestran en la Figura 1.8.

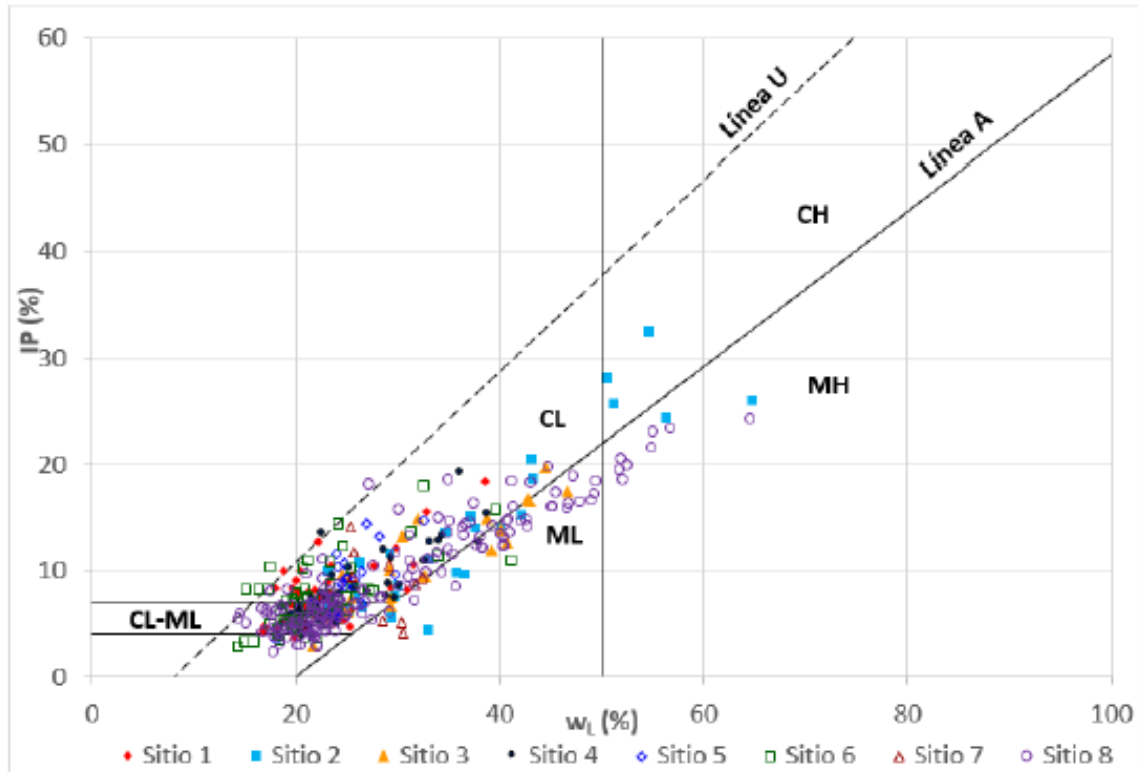


Figura 1.8 Límite líquido con cono inglés con penetración de 20 mm y límite plástico con 5mm, (Candelaria, et al., 2018)

En la Figura 1.8 se puede observar que los límites líquidos de los materiales se concentran entre 20 y 25%; el índice plástico entre el 3 y 8%. Vermeulen (2001) reportó límites líquidos en un rango de 22 al 43% con un índice de plasticidad de 0 al 8% para jales de oro, clasificándolos como limo no plástico sin cohesión, los dos estudios presentan resultados similares por lo que la clasificación ya mencionada puede aplicar para los dos materiales.

1.6.5 Ángulo de fricción interna

En la Figura 1.9 y 1.10 se relaciona el ángulo de fricción aparente, ϕ , con el grado de saturación y el contenido de finos, en muestras de jales ensayadas en pruebas triaxiales tipo UU por Bernal et al. (2018), donde encontraron un intervalo de 25 a 41 grados para el ángulo de fricción interna aparente, cuando el grado de saturación es menor al 90% y el contenido de finos es menor al 60%. En las Figuras 1.9 y 1.10 se muestran las gráficas que relacionan estos parámetros, cabe mencionar que el estudio fue realizado con muestras inalteradas y reconstituida de tres sitios diferentes.

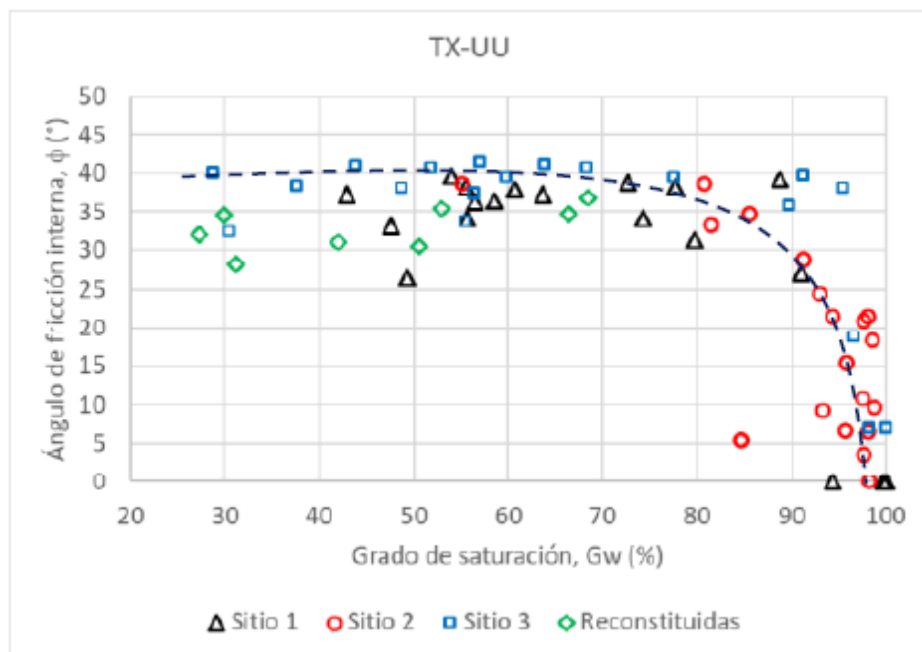


Figura 1.9 Ángulo de fricción interna obtenido en pruebas triaxiales tipo UU, en función del grado de saturación, (Bernal et al., 2018).

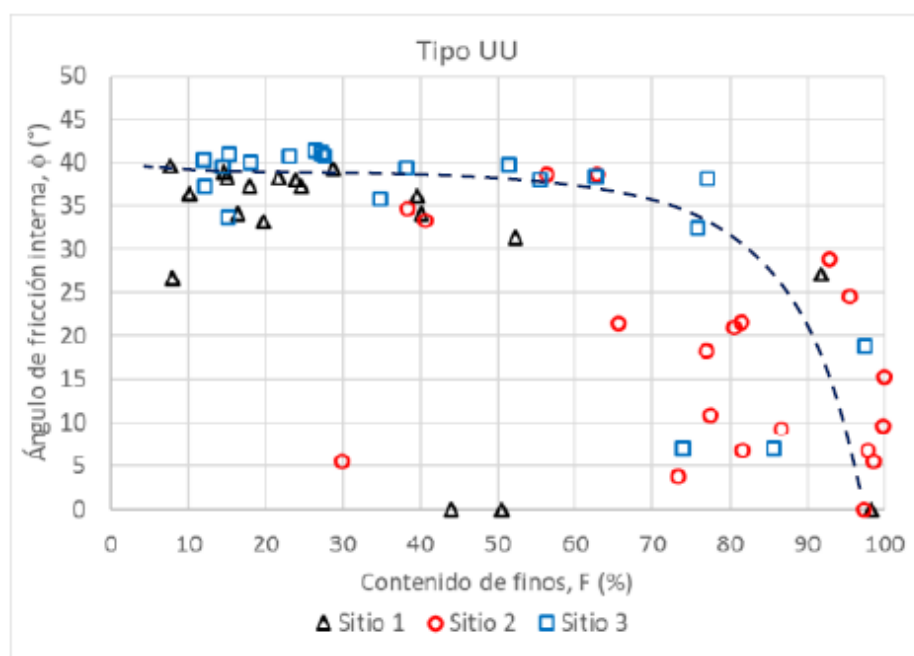


Figura 1.10 Ángulo de fricción interna obtenido en pruebas triaxiales tipo UU, en función del contenido de finos, (Bernal et al., 2018).

La obtención del ángulo de fricción interna de jales puede ser por distintos medios, Hernández *et al.*, (2018) realizaron una comparativa de los valores obtenidos por ficómetro directamente en campo y pruebas triaxiales tipo UU en laboratorio. La prueba de ficómetro consiste en el hincado e inflado de una camisa metálica, esto permite medir los parámetros mecánicos de resistencia al corte del suelo en sitio, como se muestra en la Figura 1.11.

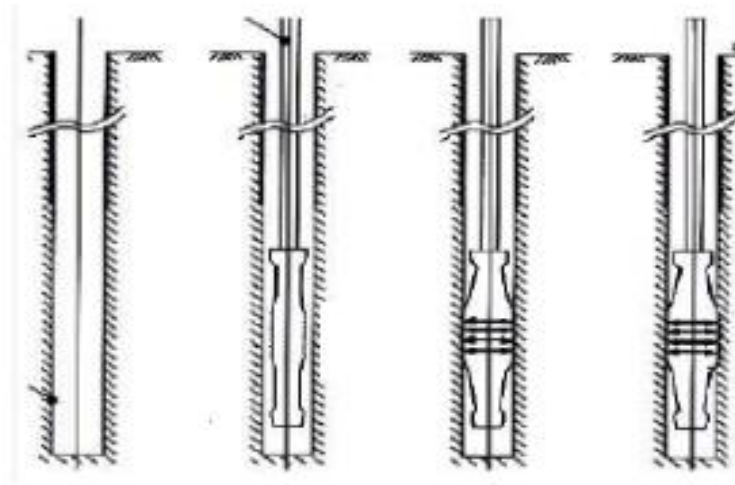


Figura 1.11 Sondeo con ficómetro. (Hernández *et al.*, 2018)

De los valores de ángulo de fricción interna obtenidos de los dos tipos de ensayos Hernández *et al.*, (2018) reportaron una relación entre el número de golpes del ensaye SPT con el ángulo de fricción interna obtenido con ficómetro. Al tener de 1 a 10 golpes del N_{spt} , el ángulo de fricción interna se encontró entre 10° y 30° , cuando se superan los 10 golpes del N_{spt} , el ángulo se incrementa de 30° hasta los 45° .

En la Figura 1.12 se presenta el ángulo de fricción interna del ficómetro en función del número de golpes del N_{spt} , en donde se encuentran tres líneas que pretenden dar un panorama de condiciones favorable, medias y desfavorables de los ángulos que pudiesen tener los jales in situ. Considerando estas fronteras se colocaron los resultados de las pruebas triaxiales tipo UU dentro de la gráfica anterior, lo cual se presenta en la Figura 1.13, en ésta se aprecia los ángulos de fricción interna en el límite superior, con la condición media, es decir, de 30 a 45 grados y por encima de los 8 golpes, cuando el grado de saturación es menor al 90% (Hernández *et al.*, 2018).

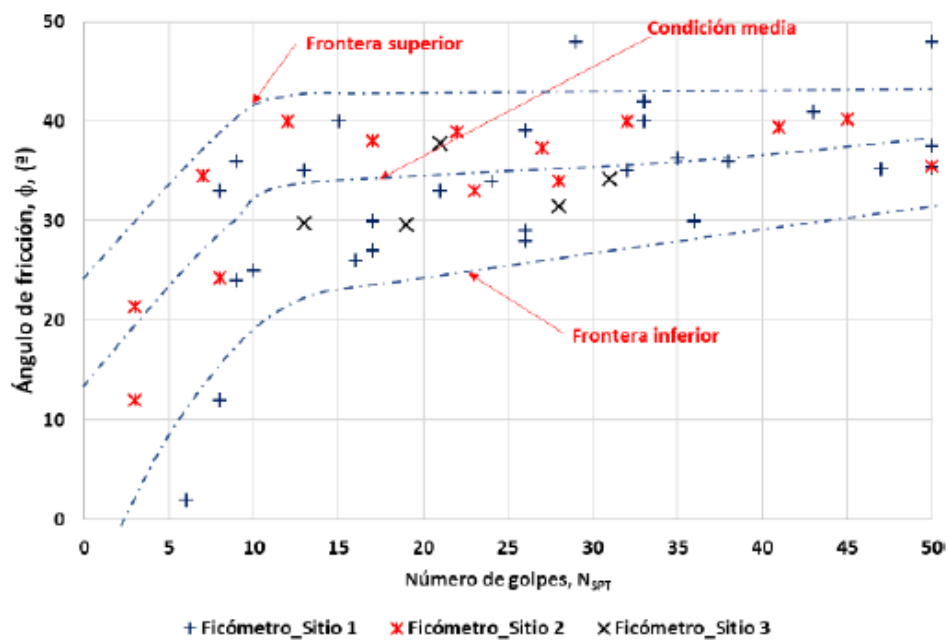


Figura 1.12 Ángulos de fricción obtenidos por ficómetro vs Número de golpes, (Hernández et al., 2018).

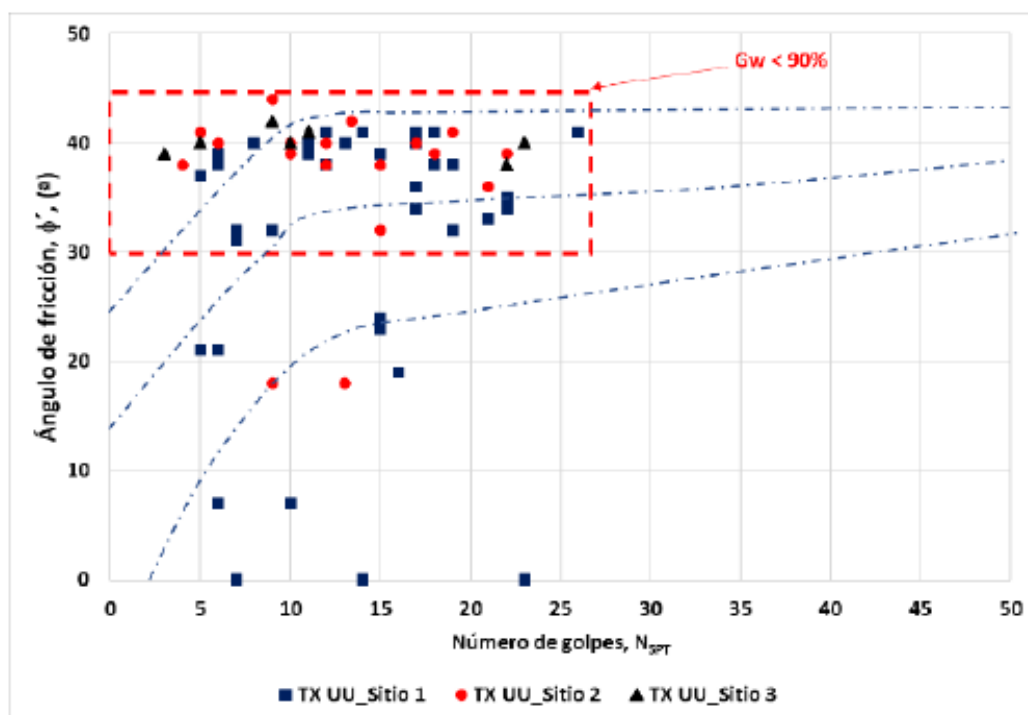


Figura 1.13 Ángulos de fricción obtenidos por pruebas triaxiales tipo UU vs Número de golpes, (Hernández et al., 2018).

1.6.6 Muestra reconstituida

El uso de material inalterado para pruebas de resistencia, no siempre es posible, es por eso que se recurre a la muestra reconstituida, por lo tanto se han realizado investigaciones en torno al comportamiento del suelo por este medio, Hernández (2016), realizó pruebas triaxiales tipo UU en probetas reconstituidas de residuos mineros a distintas compacidades, varió el peso del pisón, grado de saturación y esfuerzos de confinamiento; sin embargo, demostró que para relaciones de vacíos diferentes el jal converge aproximadamente en el mismo esfuerzo desviador y deformación residual, con el mismo confinamiento; en la Figura 1.14 se observa esta tendencia para un σ_c de 1.0 kg/m³.

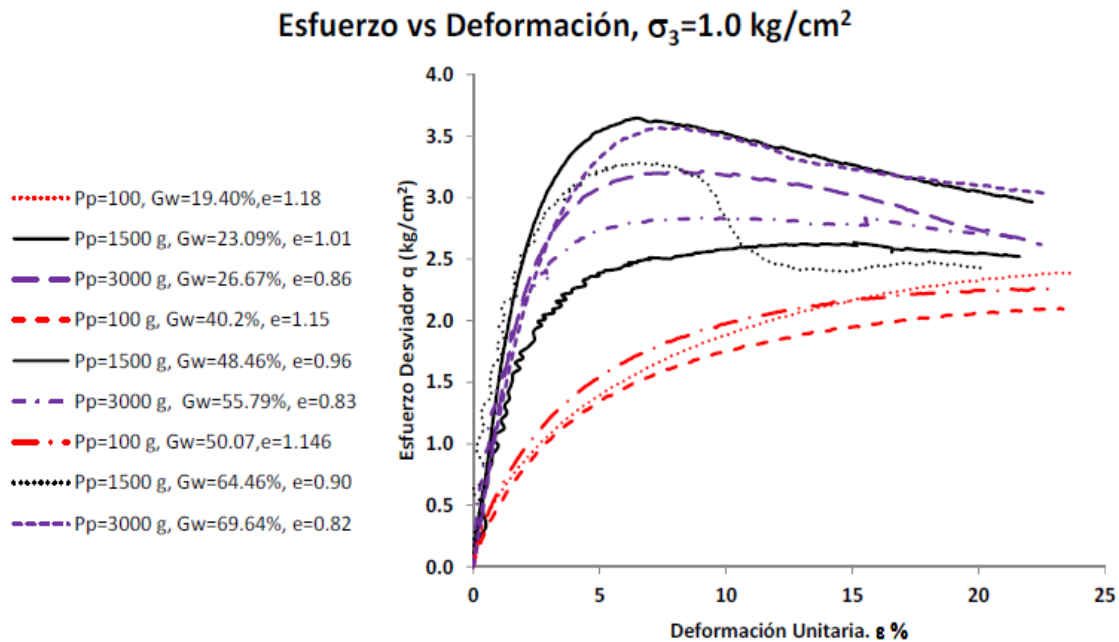


Figura 1.14 Curvas esfuerzo-deformación para un $\sigma_c=1.0$ kg/m³, (Hernández V., 2016)

De las curvas anteriores también se puede concluir que mientras más pesado es el pisón se obtienen esfuerzos desviadores más altos, pues hay una mayor compacidad relativa. En la Figura 1.15 se observa que al aumentar el contenido de agua los resultados son favorables, sin embargo, al superar el grado de saturación de 60% decrecen los valores, se muestra para un σ_c de 1.0 kg/m³, esto se replica para los demás esfuerzos confinantes (Hernández V., 2016).

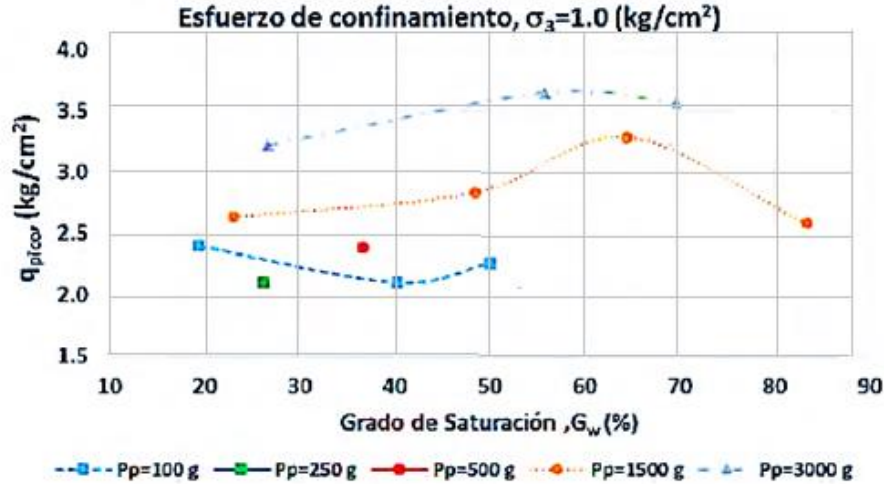


Figura 1.15 Variación de la q_{max} vs el grado de saturación para un $\sigma_c=1.0$ kg/m³, (Hernández V., 2016)

Bernal (2016) realizó pruebas triaxiales tipo CU en probetas reconstituidas, reportó aumento de la carga máxima en proporción a un mayor esfuerzo efectivo, también determinó correlaciones para calcular el ángulo de fricción interna en términos de esfuerzos efectivos (TEE) y esfuerzos totales (TET), en función del peso volumétrico seco (Figura 1.16).

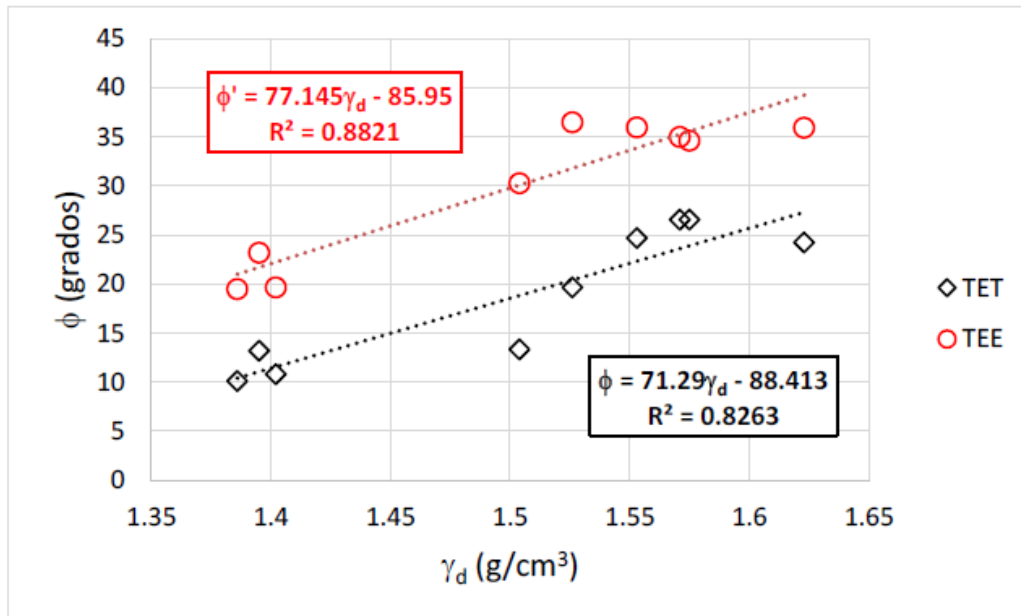


Figura 1.16 Correlación entre peso volumétrico seco y ángulo de fricción interna, (Bernal, 2016).

Con las correlaciones obtenidas de la Figura 1.16 Bernal (2016) calculó el ángulo de fricción interna aparente teórico en términos de esfuerzos totales (TET) y esfuerzos efectivos (TEE), los resultados de los ángulos calculados se graficaron con los experimentales (Figuras 1.17 y 1.18), obteniéndose una pendiente cercana a 1.

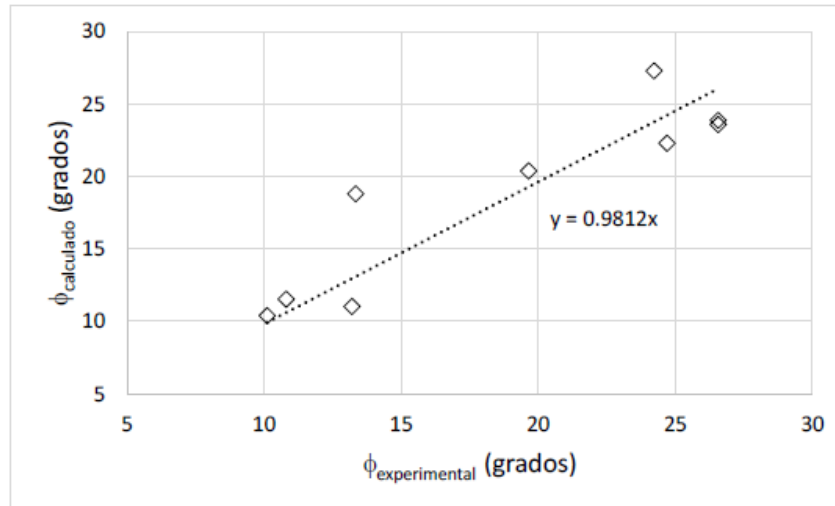


Figura 1.17 Comparación entre los resultados obtenidos y los calculados para el ángulo de fricción interna en TET (Bernal, 2016).

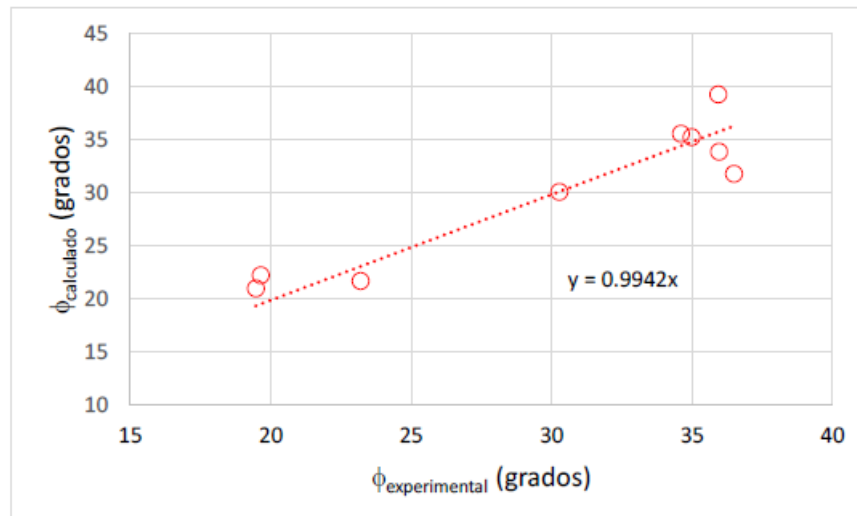


Figura 1.18 Comparación entre los resultados obtenidos y los calculados para el ángulo de fricción interna en TEE (Bernal, 2016).

Se ha comparado la permeabilidad obtenida con muestra inalterada y reconstituida con relaciones volumétricas del mismo orden. García y Flores (2018) estudiaron esta propiedad con dicho esquema de trabajo, mencionan que los coeficientes de permeabilidad de una muestra inalterada con una reconstituida no presentan grandes diferencias, por lo tanto, son representativas; asimismo, la permeabilidad decrece a medida que la relación de vacíos disminuye y el contenido de finos aumenta, lo cual se aprecia en la Figura 1.19, además se incluyen resultados obtenidos por Valenzuela (2015).

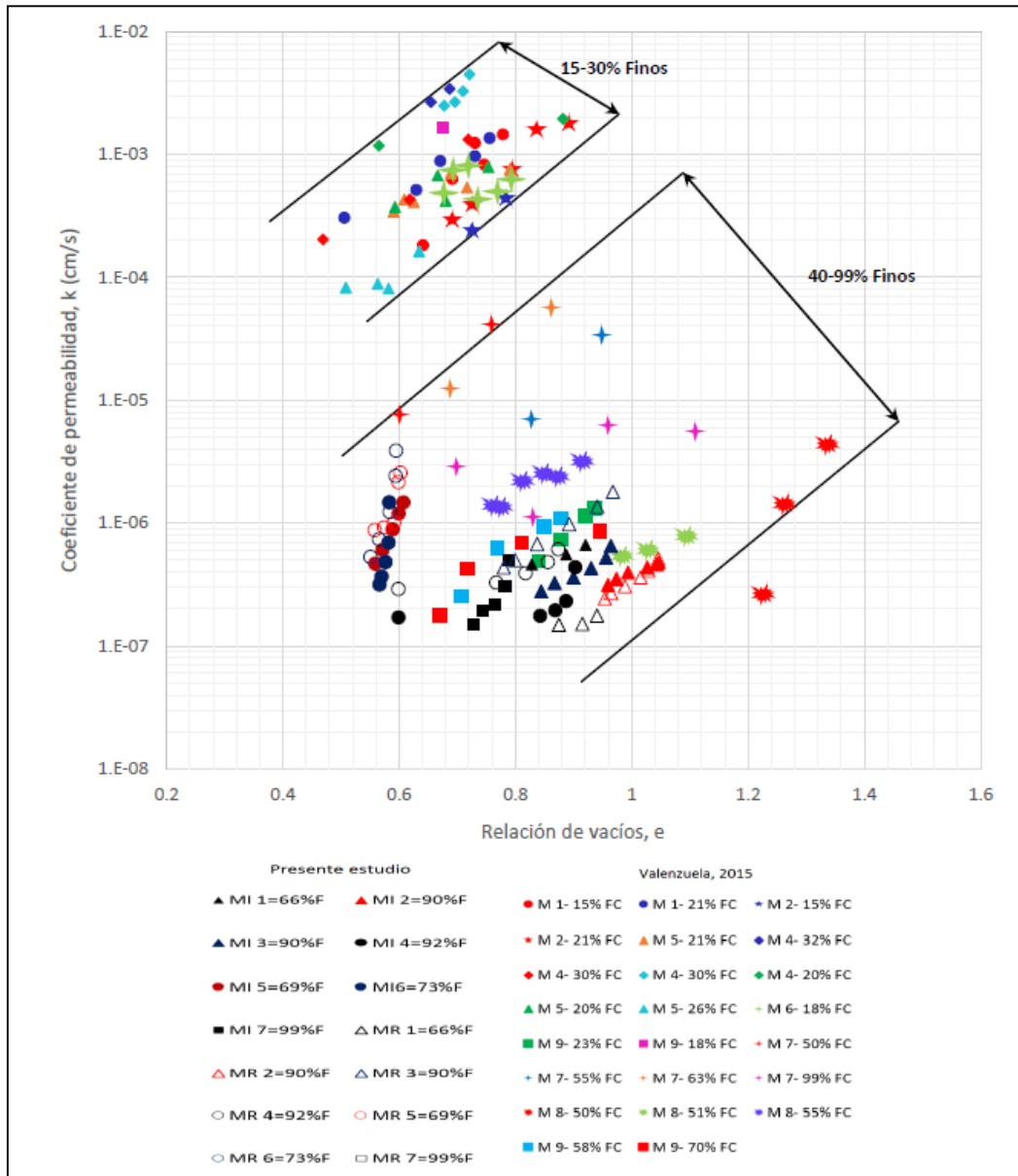


Figura 1.19 Permeabilidad en función de la relación de vacíos para muestras inalteradas y remoldeadas de jal, con diferentes contenidos de finos, (García, 2019)

2 Descripción del equipo

En este trabajo se pretende comparar los parámetros mecánicos de probetas provenientes de muestra inalterada y reconstituida, para su obtención existen ensayos en campo y laboratorio; en los primeros son necesarias las correlaciones para determinar dichos valores; en laboratorio se obtienen por distintos métodos, el usado en esta investigación es compresión axial (ASTM D 23850 y ASTM D 4767), debido a que es una técnica fiable de medir la resistencia al esfuerzo cortante.

2.1 Descripción de la prueba

El equipo utilizado es la cámara triaxial cíclica, en la cual se pueden realizar pruebas estáticas y dinámicas, En la investigación presente se realizaron pruebas estáticas no consolidadas, no drenadas (UU). La prueba consiste en colocar una probeta cilíndrica del material estudiado entre un pedestal y un cabezal de carga, protegida con una membrana de látex. La probeta es sometida a un esfuerzo axial mediante un pistón y a un esfuerzo horizontal o confinante producido por fluido con presión, dentro de una cámara (Figura 2.1).



Figura 2.1 Cámara triaxial cíclica en prueba. Instituto de Ingeniería de la UNAM

En la Figura 2.2 se aprecian tres esfuerzos σ_1 , σ_2 , σ_3 , el esfuerzo σ_3 se refiere al confinante y es igual a σ_2 , ya que los dos son ejercidos por la presión del fluido presente en la cámara, la cual es igual en todas direcciones. La carga o esfuerzo axial, es el mayor, σ_1 , la diferencia de σ_1 con σ_3 corresponde al esfuerzo desviador.

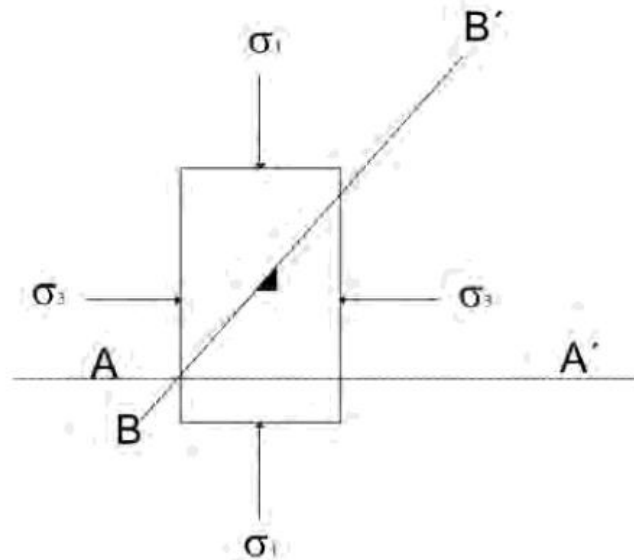


Figura 2.2 Esfuerzos principales, (Hernández, 2016)

2.2 Cámara triaxial cíclica

El equipo triaxial se ubica en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería, se conforma por sensores electrónicos, cuenta con un sistema de control servo-neumático. La cámara del equipo es un cilindro de acrílico, con base fija de acero y una tapa móvil de acero acoplada a un pistón. Las probetas se sitúan sobre un pedestal de aluminio fijo y bajo un cabezal movable.

El esfuerzo axial es aplicado por un pistón neumático que proporciona una carga vertical, funciona por medio de un sistema servo-neumático, el esfuerzo de confinamiento se aplica a través del llenado de la cámara con agua, la presión presente en el líquido se controla mediante un tablero de manómetros.

2.2.1 Instrumentación del equipo

En la toma de lecturas del equipo se disponen sistemas electrónicos, cuenta con transductores conectados por medio de cables a un receptor de señales (Figura 2.3), que se encarga de convertir voltajes a datos ingenieriles, carga, desplazamiento y presión. Los datos recibidos los compara con elementos patrones, estos son usados en la ejecución de ensayos, además se obtiene curvas de calibración para los distintos sensores. Se cuenta con un software (Lab View), que tiene módulos de operación y calibración.

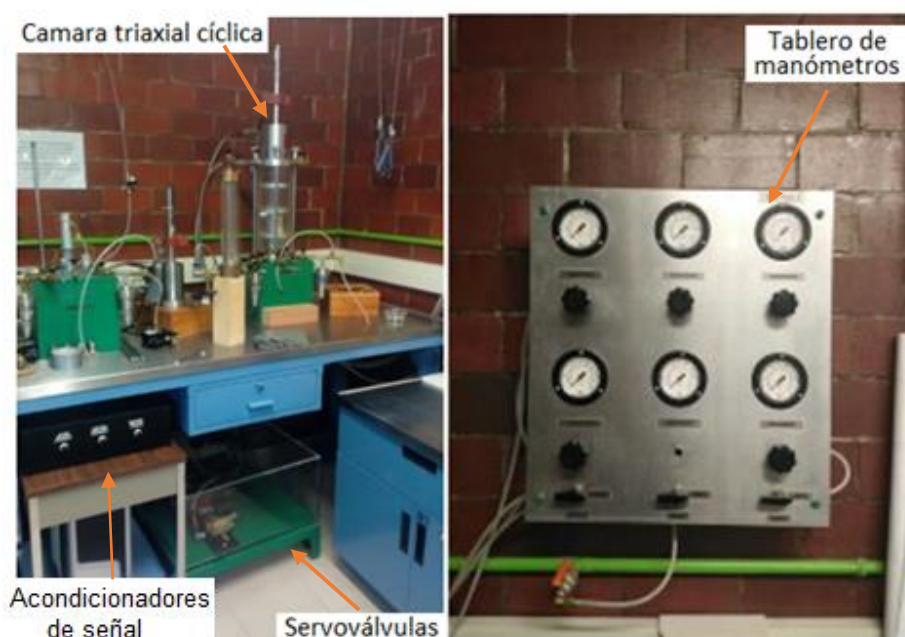


Figura 2.3 Componentes generales del equipo triaxial cíclico, Instituto de Ingeniería de la UNAM

El equipo cuenta con una celda de carga hidrostáticamente compensada (sumergible) de 150 kg de capacidad, la cual elimina los efectos de fricción del vástago en la medición de cargas transmitidas a la probeta. Tiene un transductor inductivo de deformación (LVDT) de 50 mm de carrera, colocado en la parte superior del vástago. Para las presiones de confinamiento y contrapresión opera con sensores de 7.5 kg/cm^2 de capacidad que monitorean la presión de aire aplicada por el tablero de manómetros, además de tener un sensor de cambio volumétrico de 30 cm^3 , estas especificaciones se muestran en la Tabla 2.1, incluyendo marca y modelo de los sensores. En la Figura 2.4 se muestra la ubicación de los transductores presentes en el equipo.

Tabla 2.1 Marca, modelo y capacidad de los sensores del equipo.

Sensor	Marca	Modelo	Capacidad
Celda de carga	OMEGADYNE, INC.	LCMUW	150 kg
LVDT	Sensores Schaevitz	E1000	50 mm
Presión (presión de poro y confinamiento)	VIATRAN	1182AH	7.5 kg/cm ²
Contrapresión	MEAS	MSP-300-100	7.5 kg/cm ²
Cambio volumétrico	VALIDYNE	DP15	30 cm ³

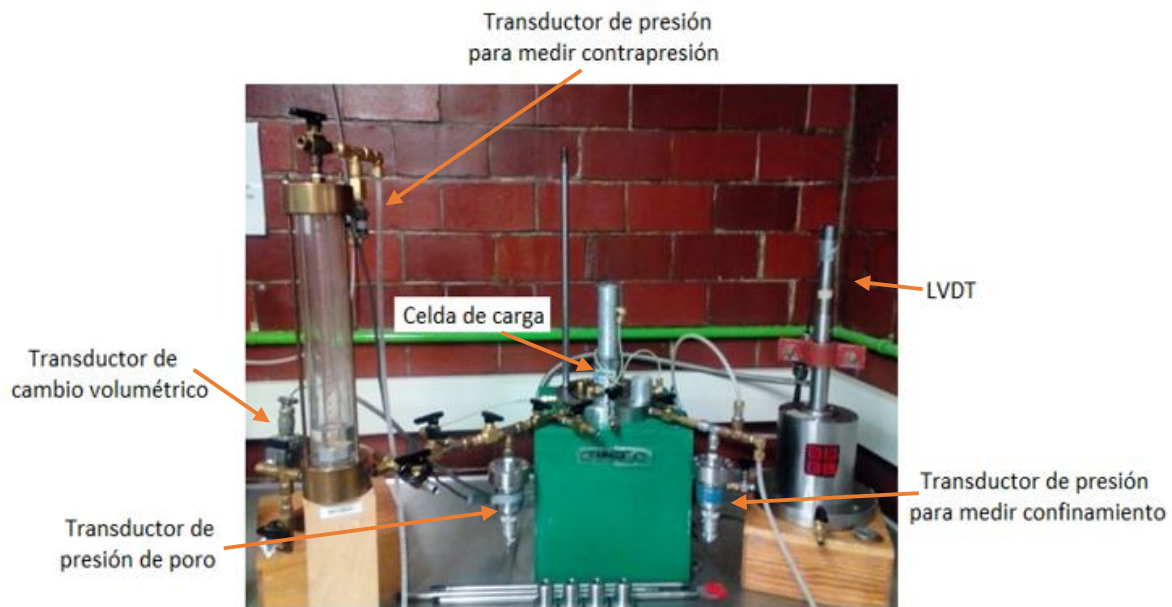


Figura 2.4 Esquema de transductores de la CTC, Instituto de Ingeniería de la UNAM

2.2.2 Calibración del equipo

Anteriormente se mencionó que el software utilizado posee un módulo de calibración que relaciona la señal de voltaje dada por el sensor y un elemento patrón. En dicho apartado se puede efectuar calibración, ajuste de sistema servo y verificación de transductores, el menú se aprecia en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Menú de Calibración, Lab View

Para comenzar la calibración de los sensores, se despliega la opción de “Calibración experimental de transductores”, posteriormente se muestra una ventana que ofrece la alternativa de seleccionar la cámara y el sensor a calibrar, al optar por alguna se muestra la información de la última calibración (fecha, y constantes de calibración: pendiente y ordenada); así mismo, los parámetros para la nueva calibración (unidades en las que se desea calibrar, pendiente y ordenada correspondientes al elemento patrón), la ventana mostrada se presenta en la Figura 2.6.

Figura 2.6 Calibración experimental de transductores, Lab View.

El proceso de calibrar cualquiera de los sensores presentes en el equipo es el mismo dentro del software. Una vez seleccionada la cámara y el transductor deseado se abre una página donde se ingresa el valor de la magnitud física dada por el elemento patrón y se toma la lectura del voltaje que envía el transductor. Se capturan al menos el 50% del rango de medición del instrumento ajustado, con estos datos se gráfica la magnitud ingenieril en función de voltios (Figura 2,7) definida como la curva de calibración del sensor, de la que se obtienen las constantes de calibración, pendiente y ordenada.

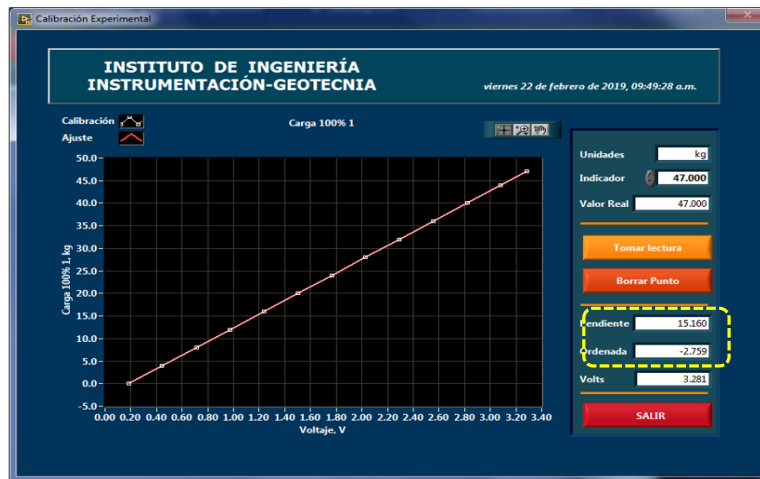


Figura 2.7 Curva de calibración de la celda de carga al 100%, Lab View

Para verificar que la etapa de calibración haya sido acertada se ingresa en el menú del módulo de calibración a la pestaña de “Verificación de transductores”, ahí se selecciona el sensor que se desea verificar. La ventana muestra la medición registrada por el transductor, ésta se compara contra la del elemento patrón. A partir de los valores registrados con el sensor y el elemento patrón se define la precisión del sensor, es decir, el valor mínimo que se puede medir con el sensor de forma confiable (Figura 2.8).

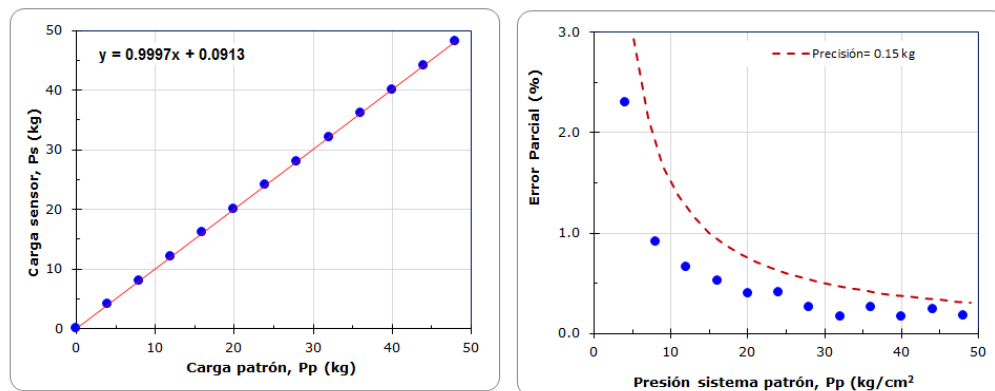


Figura 2.8 Curvas carga sensor vs carga patrón y error parcial vs precisión, carga al 100%; Instituto de Ingeniería de la UNAM

Sensor de carga

La magnitud física que se encarga de medir este transductor es masa en kilogramos, el elemento patrón que se utiliza son pesas de 4 y 3 kg. La calibración se puede realizar a 10, 20, 50 y 100 por ciento de la capacidad del sensor, según a la carga máxima que se estime que se llegará en la etapa experimental, en esta investigación se utilizó el transductor al 100% de su capacidad, es decir, a 150 kg. El procedimiento consiste en colocar sobre el pedestal las masas e ir incrementándolas, tomando lecturas de carga y voltaje en cada incremento (Figura 2.9).

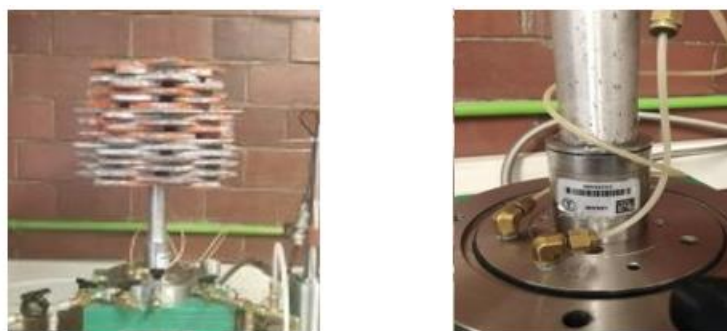


Figura 2.9 Pesas colocadas encima del pedestal y celda de carga, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Sensor de desplazamiento

El transductor de desplazamiento (LVDT) se calibra usando como patrón un tornillo micrométrico (Figura 2.10), de la misma forma que en la celda de carga, se puede calibrar al 10, 20, 50 y 100% de su capacidad, en este estudio se usó el 100% de la carrera del sensor. El procedimiento consiste en desplazar el núcleo del pistón cada 2 mm e ir tomando lecturas del voltaje y de la unidad patrón para obtener la curva de calibración.



Figura 2.10 Tornillo micrométrico, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Sensores de presión

La calibración de los sensores que miden presión (confinamiento y contrapresión) se realiza con el principio de la columna de mercurio, que funge como patrón. Por medio de mangueras se hacen las conexiones necesarias para transmitir la presión a la columna; asimismo, se registra la lectura del voltaje dada por el transductor, los incrementos se hacen mediante el tablero de manómetros.



Figura 2.11 Columna de mercurio y sensor de confinamiento, Instituto de Ingeniería de la UNAM

En la Tabla 2.2 se muestra las constantes de calibración, verificación y precisión de los sensores calibrados.

Tabla 2.2 Calibración de sensores

Calibración de sensores						
Sensor	Capacidad	Porcentaje de calibración %	Constantes de calibración		Pendiente de verificación	Presición
			Pendiente	Ordenada		
Celda de carga	150 kg	100	15.161	-2.761	0.9997	0.15 kg
Sensor de desplazamiento	50 mm	100	3.249	31.352	0.9993	0.07 mm
Presión de confinamiento	7.5 kg/cm ²	-	1.001	0.025	1.0120	0.018 kg/cm ²
Presión de contrapresión	7.5 kg/cm ²	-	0.717	-0.044	1.0019	0.016 kg/cm ²
Presión de poro	7.5 kg/cm ²	-	0.635	3.825	0.9995	0.017 kg/cm ²
Cambio volumétrico	30 cm ³	-	-3.092	9.609	0.9891	0.3 cm ³

3 Descripción de materiales y procedimientos de ensaye

3.1 Descripción de materiales

Los materiales ensayados en esta investigación son residuos mineros provenientes de los depósitos de dos unidades mineras localizadas en San Luis Potosí y Zacatecas. Las muestras fueron recolectadas a diferentes profundidades de forma inalterada mediante sondeos selectivos con tubos Shelby; además, se realiza una comparación con los resultados presentados en el artículo de Bernal *et al.*, (2018) y la tesis de maestría de Hernández (2016).

3.1.1 Propiedades índice

La caracterización del material se hizo de acuerdo con el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), para lo que se realizaron pruebas de granulometría (ASTM D 422), densidad relativa (ASTM D8545-20), contenido de agua (ASTM D2216) y límites de consistencia. En este último se utilizó como método alternativo un penetrómetro cónico tipo Sueco. Las propiedades índice de cada muestra ensayada se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Propiedades índice de las muestras ensayadas

Propiedades índice														
Tubo	Localización	Sondeo	Muestra	Profundidad		W _L	W _p	PI	Gs	W	Arenas	Finos	SUCS	
				Inicial <i>m</i>	Final <i>m</i>									
						%	%	%		%	%	%		
1	SLP	SS-1-1	3	20.00	21.00	32.63	-	-	2.98	17.32	17.00	83.00	ML	Limo con arena
2	SLP	SS-1-2	3	20.00	20.80	27.72	-	-	3.02	13.63	8.30	91.70	ML	Limo
3	SLP	SS-1-3	2	5.00	6.00	28.95	-	-	3.00	5.10	22.00	78.00	ML	Limo con arena
4	SLP	SS-3-2	1	3.00	3.80	33.58	-	-	2.97	7.09	37.60	62.40	ML	Limo arenoso
5	SLP	SS-3-3	3	15.00	16.00	28.21	-	-	2.98	25.72	7.84	92.16	ML	Limo
6	SLP	SS-4-1	4	17.50	18.50	36.64	-	-	2.98	24.97	8.60	91.40	ML	Limo
7	SLP	SS-5-3	3	20.00	21.00	40.64	-	-	2.97	10.66	3.05	96.95	ML	Limo
8	ZAC	SS-1-1	5	28.00	28.80	30.54	-	-	3.31	24.56	15.33	84.67	ML	Limo con arena
9	ZAC	SS-2-1	6	28.00	28.85	31.98	-	-	3.22	25.35	12.40	87.60	ML	Limo
10	ZAC	SS-2-1	4	18.00	18.80	28.26	-	-	3.30	24.46	4.54	95.46	ML	Limo
11	ZAC	SS-2-1	7	41.00	41.80	31.50	-	-	3.35	22.76	9.19	90.81	ML	Limo
12	ZAC	SS-2-2	8	44.00	44.80	32.56	-	-	3.32	22.57	14.37	85.63	ML	Limo
13	ZAC	SS-3-1	5	25.00	25.80	33.63	-	-	3.28	29.26	18.25	81.75	ML	Limo con arena

Granulometría

Se realiza para determinar el tamaño de partícula de la muestra, se expresa en porcentaje respecto a la masa total, el procedimiento consiste en separar por dimensiones los granos, cuando la partícula tiene un diámetro menor a 0.074 mm, se considera que es material fino (limo o arcilla).

En esta investigación la granulometría se realizó con el método de tamizado, por vía húmeda, de esta manera se evita la pérdida de muestra, la técnica consiste en hacer pasar el material por un conjunto de tamices, los cuales tienen un mallado que permiten el paso de las partículas con tamaño menor, después del $\frac{1}{4}$ de pulgada, la dimensión de la abertura se mide en número de malla, que se refiere a la cantidad de hilos por milímetro en el tamiz. Con los resultados se realiza una curva granulométrica. Se determinó que los jales utilizados en esta investigación tienen un contenido de finos del 86% en promedio.

Densidad de sólidos, Gs.

La densidad de sólidos; se determina por medio de matraces aforados y calibrados, pues se utilizan sus curvas de calibración en el cálculo del Gs, el procedimiento consiste en tomar aproximadamente 300 g de muestra, ésta se mezcla con agua hasta obtener una consistencia de lodo sin grumos, se divide en dos grupos y se coloca en la batidora para obtener una pasta uniforme. Posteriormente se sitúa en matraces para extraer el aire mediante una bomba de vacío, al finalizar esta etapa se aforan los instrumentos con agua destilada y desairada.

La mezcla se deja en reposo al menos 24 horas, en espera de que se decanten los sólidos dentro del matraz, consecutivamente se toma peso; así como la temperatura y se mete en un horno a un poco más de 105°C por 24 horas, con la finalidad de evaporar toda el agua presente en el material para obtener el peso en seco. Con estos datos acompañados de los pesos de los matraces con agua a la temperatura de la muestra en la etapa de sedimentación, se calcula la densidad de sólidos, el resultado de las dos muestras se promedia, verificando que no tengan una diferencia entre ellas mayor al 2% (Tabla 3.2), en promedio los jales de San Luis Potosí y Zacatecas tienen una densidad relativa de la fase de sólidos entre 2.99 y 3.3.

Tabla 3.2 Cálculo para determinar el Gs, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Ensaye No.	Matraz No.	Peso matraz + agua + suelo	T	Tara No.	Peso matraz + agua a T °C	Peso de cápsula	Peso suelo + cápsula	Ws	Vs	Densidad sólidos
		g	°C		g	g	g	g	cm ³	Gs
1	3	773.8	18.90	MS-9	664.80	161.40	325.60	164.20	55.20	2.97
2	5	771.2	18.89	36.00	664.00	211.80	373.10	161.30	54.10	2.98

Contenido de agua

En la evaluación del contenido de agua natural, se toman dos testigos de la muestra justo después de haber sido extraída del tubo, cuidando que sean representativos, se secan en un horno de convección por un tiempo de 24 horas, a 105°C, por último, se comparan los pesos en seco y húmedo del material (Figura 3.3). En promedio los jales de San Luis Potosí y Zacatecas tienen un contenido de agua que oscila entre 15 y 24%. Después del labrado de una probeta también se extraen dos fracciones del material, con el objetivo de determinar el contenido de agua natural de la sección que se está analizando.

Tabla 3.3 Cálculo del contenido de agua, Instituto de Ingeniería de la UNAM

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	47	186.50	173.70	12.800	119.800	53.900	23.75
2	119	172.90	163.20	9.700	119.900	43.300	22.40

Límites de consistencia

Debido a las características no plásticas y prácticamente no cohesivas del material, se realizó mediante un penetrómetro cónico con especificaciones de 60° y 60 g, es decir, cono sueco (Figura 3.1). Cuenta con un brazo ajustable donde se coloca el cono, el cual permite que éste apenas toque la superficie del suelo, además de un vaso donde se coloca la muestra, el cual se debe mover lo menos posible y situarse encima del pedestal del equipo.



Figura 3.1 Cono sueco, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Una vez esté la cápsula en posición, se deja caer el cono por 5 s, el límite líquido es determinado por una penetración de 10 mm. Se toman un total de 4 puntos, dos arriba de esta medida y dos abajo, el segundo o tercero pueden coincidir con el valor mencionado; sin embargo, se deben de hacer los cuatro registros para asegurar la linealidad en la curva de fluidez. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo del gráfico. Para evaluar el límite plástico del material y así calcular su índice de plasticidad, no fue posible realizar rollitos de muestra de jales, de acuerdo con el método de Casagrande, debido a sus condiciones no plásticas, por lo que se considera que es un limo no plástico, tomando en cuenta los demás parámetros.

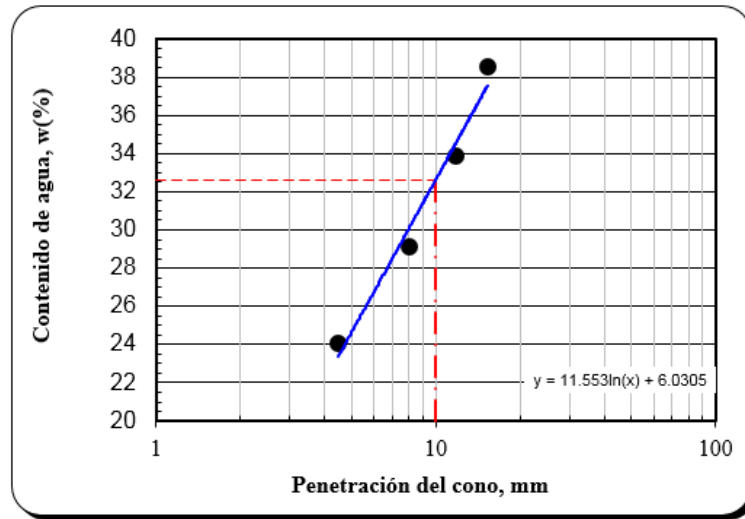


Figura 3.2 Curva de fluidez, Instituto de Ingeniería de la UNAM

3.2 Formación de probetas inalteradas

El material inalterado se extrae de tubo Shelby, en su manejo se evita los golpes o que esté expuesto al aire libre sin cera o franela húmeda, con el fin de evitar que se altere la muestra, se cortan alrededor de 11.5 cm.

La muestra extraída se divide en cuatro partes, de cada una se labra una probeta de 3.5 cm de diámetro y 8.5 cm de altura aproximadamente, se toman dos testigos, uno de los recortes lejanos y otro de los cercanos, para obtener el contenido de agua del material cercano a la probeta. En la Figura 3.3 se muestra a grandes rasgos el método de extracción y labrado.



Figura 3.3 Procedimiento de labrado, Instituto de Ingeniería de la UNAM

3.3 Formación de probetas reconstituidas

En la formación de probetas reconstituidas, se utilizó el método de compactación estática, con un molde bipartido de 3.6 cm de diámetro por 9 cm de altura, el procedimiento se dividió en 5 capas. Se empleó el uso de un pisón de aluminio para el compactado del material, con un diámetro de 3.4 cm y de masa variable. En la reconstitución se buscó obtener el peso volumétrico (γ) y el contenido de agua (ω), del mismo orden al de las probetas inalteradas.

3.3.1 Preparación de material.

La muestra utilizada fue producto de la disgregación de las probetas inalteradas ensayadas por pruebas triaxiales UU, combinadas con material proveniente de los recortes producidos en el labrado de éstas. En la Figura 3.4 se aprecia el proceso de disgregación por medio de un pisón con base de caucho, sobre una charola.



Figura 3.4 Disgregación del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Después se pesa el sólido y agua necesarios para formar la probeta (Figura 3.5), previamente la masa fue calculada con base en el contenido de agua y al peso de la probeta inalterada que se desea reproducir; asimismo, se deben cuidar las dimensiones para obtener un peso volumétrico del mismo orden.



Figura 3.5 Cantidad de sólido y agua para formar probeta, Instituto de Ingeniería de la UNAM

En el mortero de porcelana se mezclan las dos fases, hasta obtener un material homogéneo, esto se hace con el fin de evitar pérdida de suelo y agua en el proceso, el resultado se puede observar en la Figura 3.6. Posteriormente el peso total del material se divide en cinco cápsulas, cada una correspondiente a una capa.

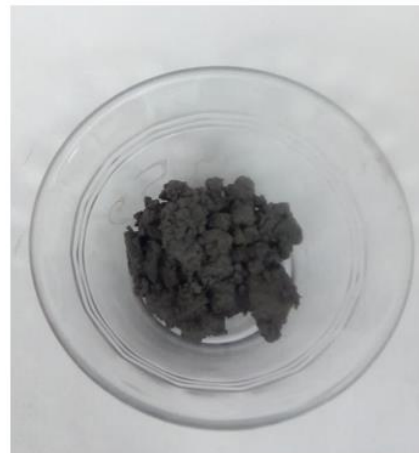


Figura 3.6 Homogenización del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM

3.3.2 Compactación del material

Las probetas se forman en un molde bipartido con medidas de 3.6 cm de diámetro y 9 cm de altura, se utiliza un pisón de aluminio de un diámetro de 2 mm, menor al del molde, de esa forma se evita que se atasque al momento de aplicar la carga al suelo, en él se pueden adecuar masas, con el fin de aplicar una masa variable, según se requiera (Figura 3.7).



Figura 3.7 Molde y pisón, Instituto de Ingeniería de la UNAM

El molde se sitúa en una base de concreto; antes de colocar dentro el material, se pica con una espátula delgada, de esa forma se evitan grumos grandes, la muestra de una capa se vacía en el interior del molde, posteriormente se realiza la compactación con el pisón previamente cargado con la masa deseada, el tiempo que se mantiene la carga estática sobre el suelo es de 20 s (Figura 3.8).

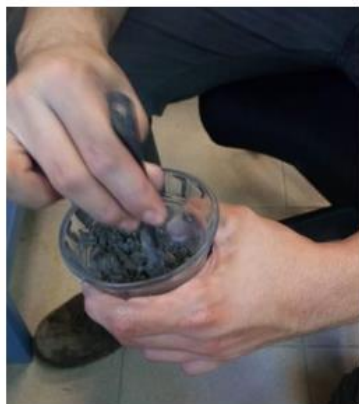


Figura 3.8 Escarificado y Compactado del material, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Cuando se retira la carga, la muestra compactada se escarifica para continuar con la siguiente capa, a partir de ahí se repiten los pasos anteriores de la compactación estática. Una vez colocadas las cinco capas, se toma un testigo para determinar el contenido de agua y evaluar pérdida de humedad durante la formación de la muestra. El molde se separa en dos medias cañas y la muestra queda formada, disponible para tomar dimensiones y peso húmedo (Figura 3.9).



Figura 3.9 Probeta reconstituida, Instituto de Ingeniería de la UNAM

3.4 Procedimiento de ensaye

Después del labrado de la muestra inalterada o de la formación de la probeta reconstituida, se pesan y se toman sus dimensiones (diámetros superior, medio e inferior), además del peso para calcular relaciones volumétricas. Luego de esto se procede al montaje y posterior ensaye en la cámara triaxial.

3.4.1 Montaje

La probeta se sitúa entre el pedestal y el cabezal del equipo, previamente se agrega pasta de silicón alrededor de las piezas, para la colocación de la membrana de látex; además, de círculos de acetato con diámetro igual al de las bases, que cumplen con la función de evitar fuga del material y disminuir la concentración de esfuerzos cortantes entre la base y el cabezal con los extremos de la muestra de suelo. Con ayuda de un molde partido se coloca la membrana de látex, ajustada con cuatro aro-sellos, dos en la parte inferior y dos en la superior.

En los extremos superiores e inferiores del cilindro de acrílico se emplea pasta de silicón que junto con los aro-sellos de la base de la cámara y de la tapa acoplada al pistón, cumplen con no permitir fugas de presión o agua.

Una vez situada la camisa entre la base y la tapa, se centra el pistón con el cabezal y se hace circular vacío con el objetivo de asegurar el contacto entre éstos, de esa manera se asegura que la carga axial sea transmitida uniformemente en la probeta. Posteriormente cuando el equipo está armado, se llena de agua, hasta poco después del cabezal. En la Figura 3.10 se observa la muestra montada en el equipo triaxial.



Figura 3.10 Probeta montada en la CTC 1, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.4.2 Ensaye y etapa de falla

En el menú principal del módulo de operación del software Lab View, se ingresa al apartado de “configurar de prueba”, en él se despliega una pantalla, en la cual se selecciona el tipo de prueba triaxial, para este estudio se optó por no consolidada no drenada, UU, igualmente presenta seis pestañas, en donde solicita los datos generales del proyecto, dimensiones de la probeta, características del material, selección de la carpeta donde se guarda el archivo de resultados y el esquema de ensaye. Para esta investigación se trabajó a deformación controlada, con un desplazamiento de 18 mm en 30 min, esta etapa se observa en la Figura 3.11.

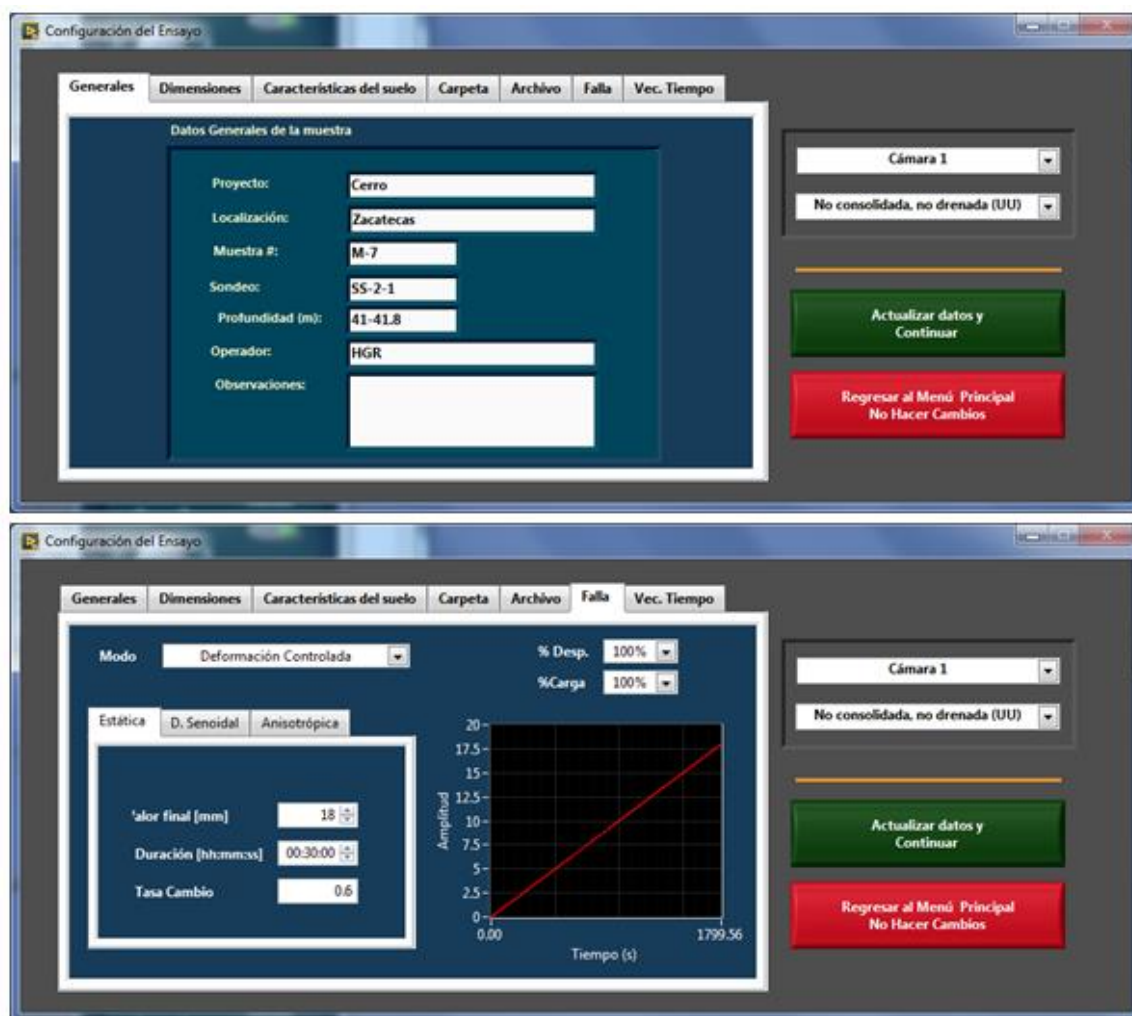


Figura 3.11 Configuración de prueba, Lab View.

Regresando al primer menú, se ingresa al bloque de “Esf. Confinamiento”, con el fin de medir el esfuerzo confinante a aplicar (Figura 3.12), esto se realiza junto con la válvula del tablero de manómetros, una vez terminada esta etapa, se ubica en la pestaña “Etapa de Ensaye” del menú principal, en el que se aplica la excitación montónica con la señal de excitación seleccionada. Iniciado el ensaye se presentan las curvas: carga-desplazamiento, carga-tiempo y desplazamiento carga, como se aprecia en la Figura 3.13. Al llegar al valor de deformación axial objetivo, el programa finaliza por si sólo la prueba. Los resultados de cada una de las etapas se guardan en formato texto (.txt) que permiten cargarlos libremente a una hoja de cálculo como Excel.

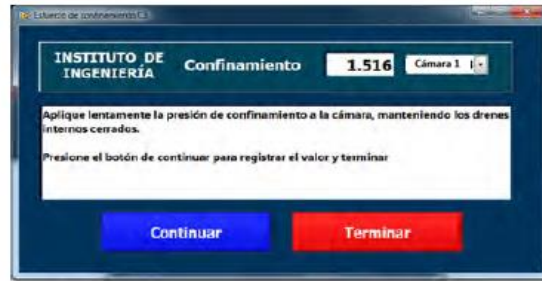


Figura 3.12, Configuración del esfuerzo confinante, Lab View

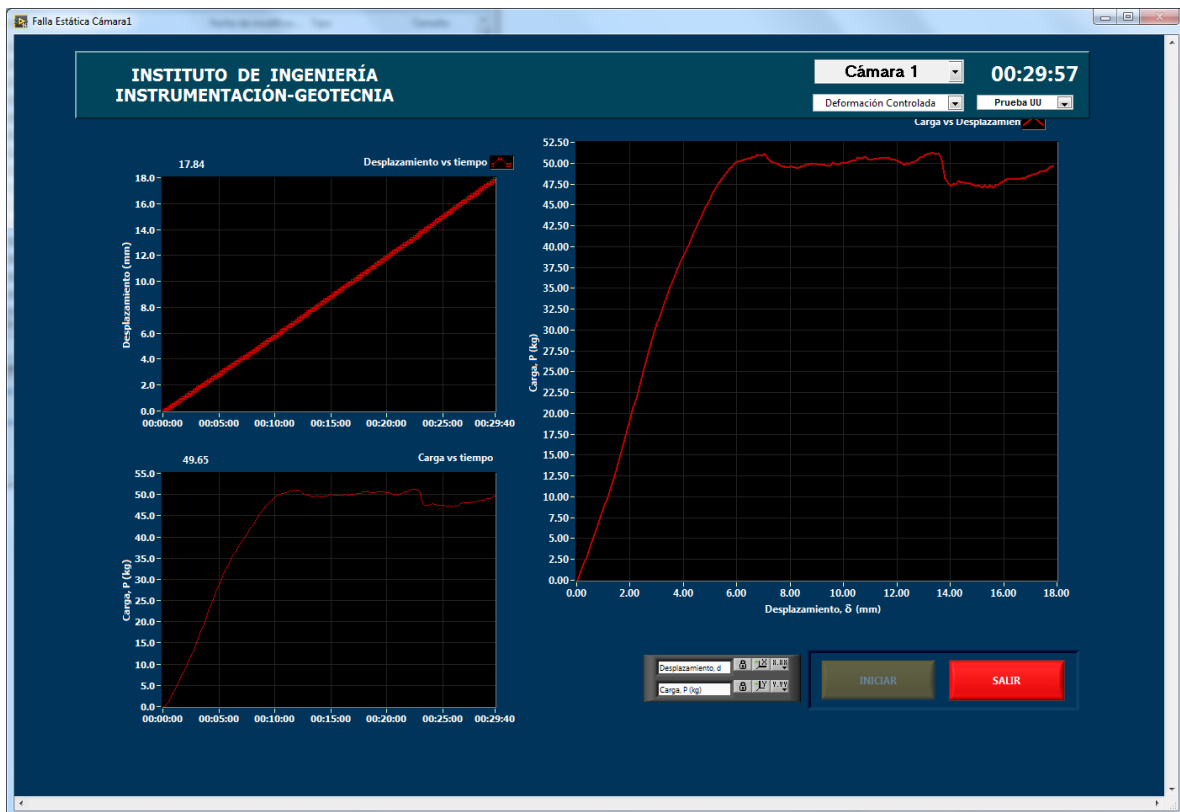


Figura 3.13 Curvas del ensaye triaxial. Lab View.

4 Presentación y análisis de resultados

A continuación, se presentan el análisis de los resultados obtenidos para el ángulo de fricción interna aparente a partir de pruebas triaxiales tipo UU, en muestras inalteradas y reconstituidas. Adicionalmente, se propone un modelo que se ajusta a las curvas esfuerzo desviador-deformación axial del material ensayado.

Las series de pruebas ensayadas por triaxiales tipo UU, se realizaron con tres probetas inalteradas y tres reconstituidas; con el siguiente esquema de trabajo: la primera prueba de muestra inalterada se realiza con un esfuerzo de confinamiento (σ_3) de 0.5 kg/cm², éste se suma con el $\tau_{\max}$ obtenido del ensaye, para determinar el esfuerzo confinante de la segunda, posteriormente se hace lo mismo para el tercer esfuerzo.

Del sitio de San Luis Potosí (SLP) se ensayaron ocho series de pruebas triaxiales UU, con las características anteriormente mencionadas; sin embargo, en tres series no fue posible reconstituir probetas, debido al contenido de agua mayor al 21%. En el sitio de Zacatecas (ZAC), se ensayaron seis series de pruebas UU, pero sólo fue posible reconstituir probetas de una serie, por las mismas razones del sitio anterior.

En los ensayos de las probetas reconstituidas, se busca que el contenido de agua y el peso volumétrico sea del mismo orden que el de las inalteradas, como se ha mencionado anteriormente; asimismo, se ensayan con las mismas condiciones de esfuerzo confinante.

4.1 Reconstitución de probetas

En la formación de probetas por el método de compactación estática se tiene un resultado satisfactorio cuando el w es menor al 21 %, ya que se pueden formar bajo las mismas condiciones en contenido de agua y peso volumétrico de las inalteradas (Figura 3.9); por el contrario, cuando se rebasa este porcentaje el agua se sale del molde, como si se exprimiera el material. Adicionalmente la probeta pierde su estructura rígida, pues la muestra fluye. En la Figura 4.1 se aprecia un espécimen formado con estas características.

El montaje de este tipo de probetas es complicado, por la fluencia del material (Figura 4.1), la probeta no se puede montar en el equipo triaxial.



Figura 4.1 Formación y montaje de probeta con un $w > 21\%$, Instituto de Ingeniería de la UNAM

Se reconstituyeron y ensayaron 16 probetas, con condiciones de $w\%$ y γ_m del mismo orden de las inalteradas. En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran el peso volumétrico y el contenido de agua de las probetas inalteradas y las reconstituidas, además de una línea con pendiente de uno. Se puede ver para estas muestras ensayadas que se llegó a igualar con suficiente precisión los parámetros de control previamente definidos (peso volumétrico y contenido de agua de las muestras inalteradas).

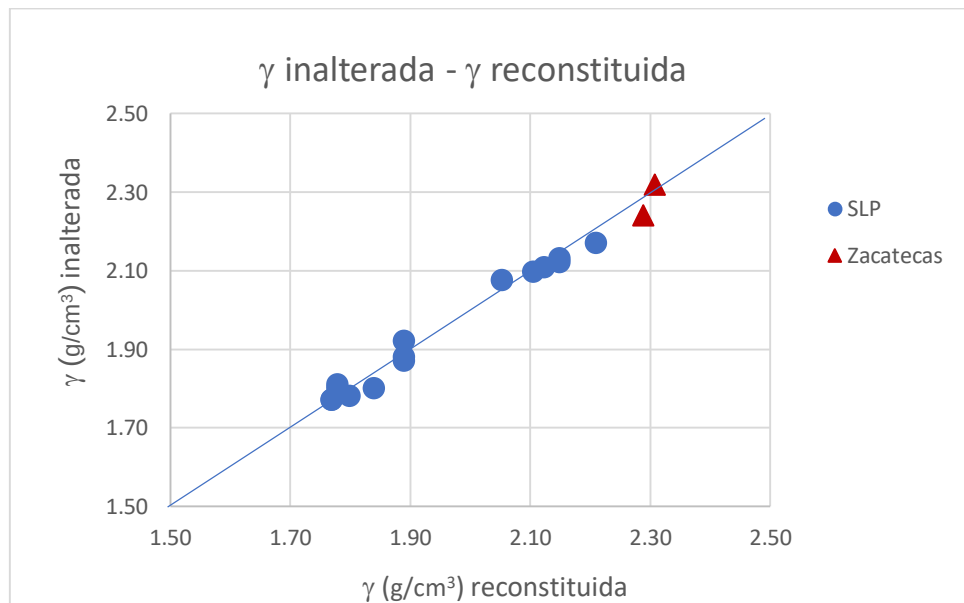


Figura 4.2 Peso volumétrico de inalteradas vs reconstituidas

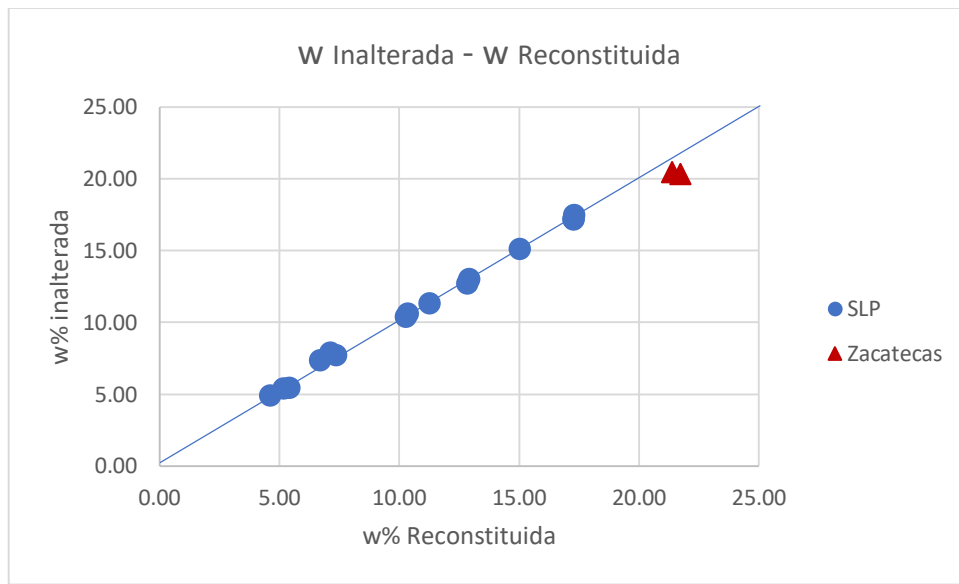


Figura 4.3 Contenido de agua de inalteradas vs reconstituidas

4.2 Comparación de resultados de muestras inalteradas y reconstituidas.

Los resultados de los ensayos realizados en muestra integra y reconstituida con $w \leq 21\%$, se muestran en las Tablas 4.1 y 4.2, inalteradas y reconstituidas, respectivamente. Se ensayaron un total de 14 series de pruebas triaxiales; sin embargo, por lo que ya se ha comentado, no fue posible reconstituir todas las probetas, debido a su contenido de agua. En los valores numéricos se muestran, las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas.

Comparando los resultados mostrados, se aprecia una variación importante entre los parámetros obtenidos. En las probetas reconstituidas el ángulo de fricción es menor que en las inalteradas, cuando el contenido de agua está entre 17 y 21% (S_r entre 82 y 94%). En las series con un $w \leq 15\%$, tanto el ángulo de fricción como la cohesión de los ensayos con materiales integrales y reconstituidos, conservan valores similares, presentan una variación de un grado en el ángulo de fricción y de 0.1 kg/cm^2 en promedio, en la cohesión.

Tabla 4.1 Resultados de pruebas triaxiales UU en muestra inalterada

Resultados de pruebas triaxiales tipo UU en muestra inalterada									
Serie, Sondeo y Muestra	Localización	σ_c kg/cm ²	W %	γ_m g/cm ³	Sr %	$\tau_{m\acute{a}x}$ kg/cm ²	Gs	ϕ grados	c kg/cm ²
1	ZAC	0.5	21.40	2.29	92.27	2.38	3.35	30.00	1.10
SS-2-1		-	-	-	-	-			
M-7		2.88	21.75	2.31	94.92	4.83			
2	SLP	0.5	17.32	2.15	82.15	0.95	2.98	36.00	0.15
SS-1-1		0.85	17.32	2.21	89.03	2.09			
M-3		1.21	17.34	2.15	82.62	2.00			
3	SLP	0.5	4.65	1.84	19.79	1.28	3.00	34.00	0.40
SS-1-3		1.92	5.46	1.78	21.09	2.95			
M-2		4.88	5.20	1.80	20.75	6.77			
4	SLP	0.5	7.16	1.77	26.73	0.88	2.97	35.00	0.15
SS-3-2		1.37	7.39	1.77	27.40	2.07			
M-1		3.53	6.73	1.78	25.70	4.85			
5	SLP	0.5	11.29	1.89	44.81	0.82	2.97	35.00	0.07
SS-5-2		1.32	10.30	1.89	41.82	1.82			
M-3		3.14	10.39	1.89	42.24	4.52			
6	SLP	0.5	15.07	2.12	71.58	0.73	3.02	32.00	0.10
SS-1-2		1.22	12.96	2.05	59.17	1.51			
M-3		2.73	12.87	2.11	62.85	3.33			

Tabla 4.2 Resultados de pruebas triaxiales UU en muestra reconstituida

Resultados de pruebas triaxiales tipo UU en muestra reconstituida									
Serie, Sondeo y Muestra	Localización	σ_c kg/cm ²	W %	γ_m g/cm ³	Sr %	$\tau_{m\acute{a}x}$ kg/cm ²	G _S	ϕ grados	c kg/cm ²
1	ZAC	0.5	20.45	2.24	85.55	1.11	3.35	21.00	0.55
SS-2-1		-	-	-	-	-			
M-7		2.88	21.75	2.32	92.34	2.37			
2	SLP	0.5	17.12	2.13	79.78	0.64	2.98	24.00	0.28
SS-1-1		0.85	17.14	2.17	84.57	1.12			
M-3		1.21	17.39	2.12	79.84	1.23			
3	SLP	0.52	4.85	1.80	19.87	0.96	3.00	35.00	0.18
SS-1-3		1.92	5.37	1.80	21.66	2.98			
M-2		4.88	5.33	1.78	21.00	6.98			
4	SLP	0.5	7.85	1.77	26.73	0.84	2.97	35.00	0.05
SS-3-2		1.37	7.64	1.77	27.40	2.26			
M-1		3.53	7.28	1.81	25.70	4.81			
5	SLP	0.5	11.27	1.87	44.00	0.87	2.97	34.00	0.10
SS-5-2		1.32	10.33	1.88	41.31	1.85			
M-3		3.14	10.57	1.92	44.30	4.14			
6	SLP	0.5	15.06	2.11	72.04	0.63	3.02	33.00	0.02
SS-1-2		1.22	19.95	2.08	62.44	1.38			
M-3		2.73	12.65	2.10	63.07	3.31			

4.2.1 Análisis de las curvas esfuerzo-deformación y círculos de Mohr.

En las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran las curvas esfuerzo desviador-deformación axial y los círculos de Mohr en términos de esfuerzos totales, de series que cuentan con probetas inalteradas y reconstituidas, para describir los comportamientos mencionados.

En la Figura 4.4 se presenta la curva esfuerzo desviador-deformación axial, perteneciente a la Serie 1, su contenido de agua y grado de saturación promedio son de 21% y 92% respectivamente. De línea continua se presentan las curvas de muestra inalterada, las curvas de comportamiento de las muestras reconstituidas se presentan con puntos. Esta nomenclatura se mantiene para todos los gráficos presentados.

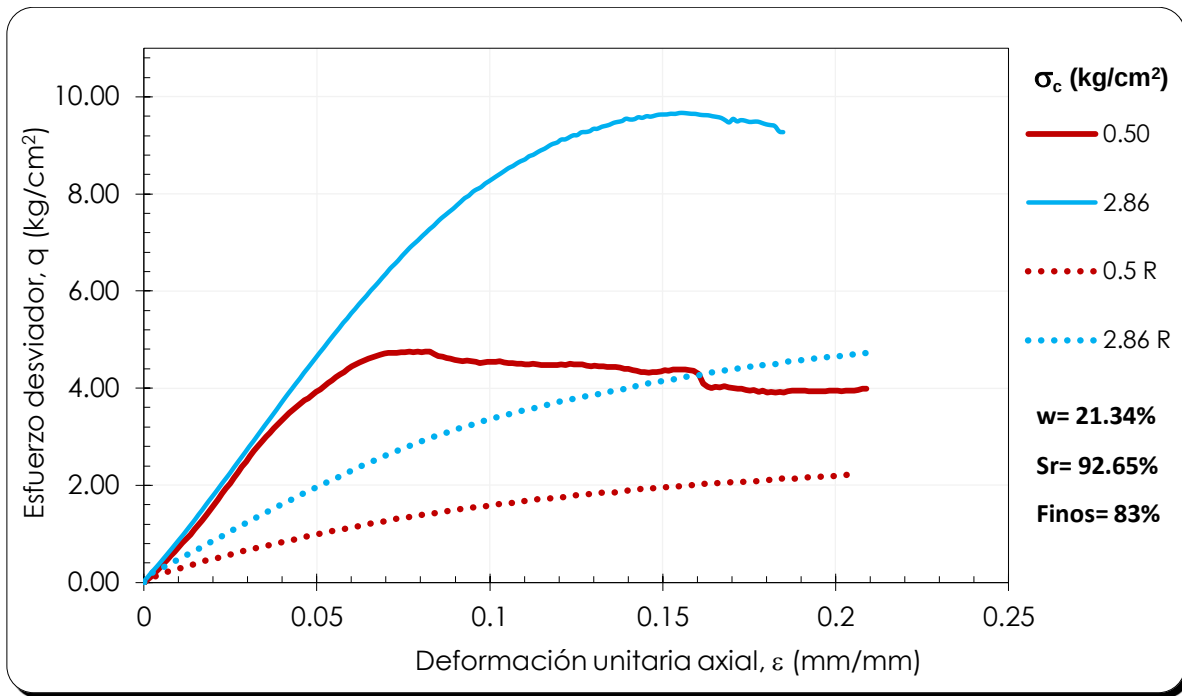


Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación de Serie 1.

Se observa que el comportamiento de la probeta reconstituida no es similar al de la inalterada, además, el esfuerzo desviador es considerablemente menor al de su homóloga; por otra parte, en los círculos de Mohr (Figura 4.5), sucede lo mismo, los valores del esfuerzo cortante máximo y el ángulo de fricción aparente de la muestra reconstituida son menores con respecto a los parámetros obtenidos en las muestras inalteradas, esta pauta se mantiene para los ensayos con un $S_r > 75\%$, véase Anexo B.

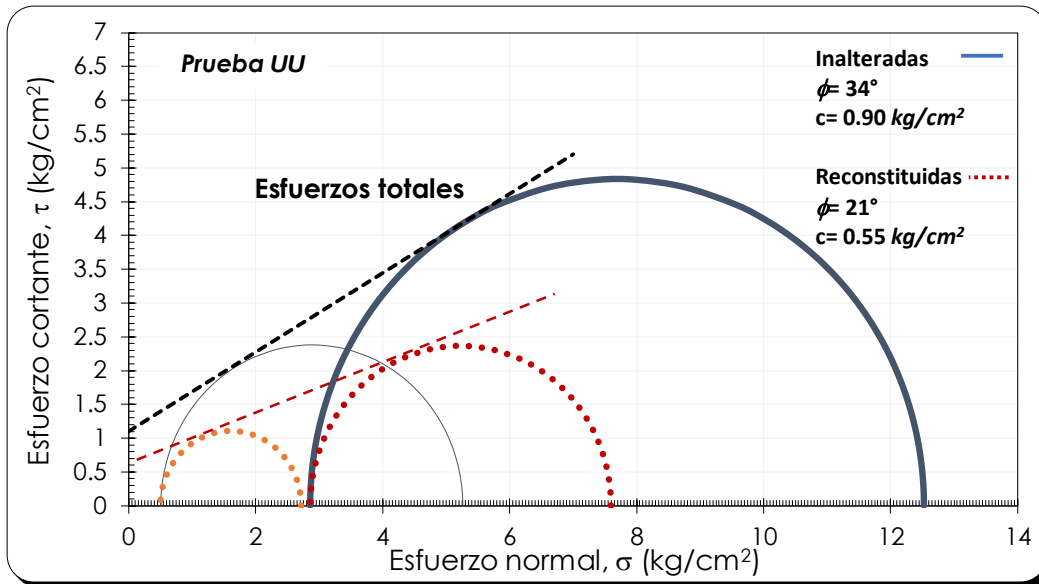


Figura 4.5 Círculos de Mohr de Serie 1.

En la Figura 4.6 se muestra la curva esfuerzo deformación para la Serie 4, con contenido de agua y grado de saturación promedio de 7% y 26%, respectivamente, en el gráfico se aprecia un comportamiento del mismo orden entre las muestra reconstituida e inalterada, en ambas curvas se tiene una falla plástica. El esfuerzo desviador es muy similar en los dos tipos de probetas. En el confinamiento de 0.5 y 3.53 kg/cm², es ligeramente mayor en las inalteradas, por lo contrario, en el esfuerzo medio, el valor de la reconstituida supera al de la inalterada; sin embargo, estas variaciones son mínimas. Se puede apreciar que la geometría de las curvas es coincidentes en todo el intervalo de deformación aplicada.

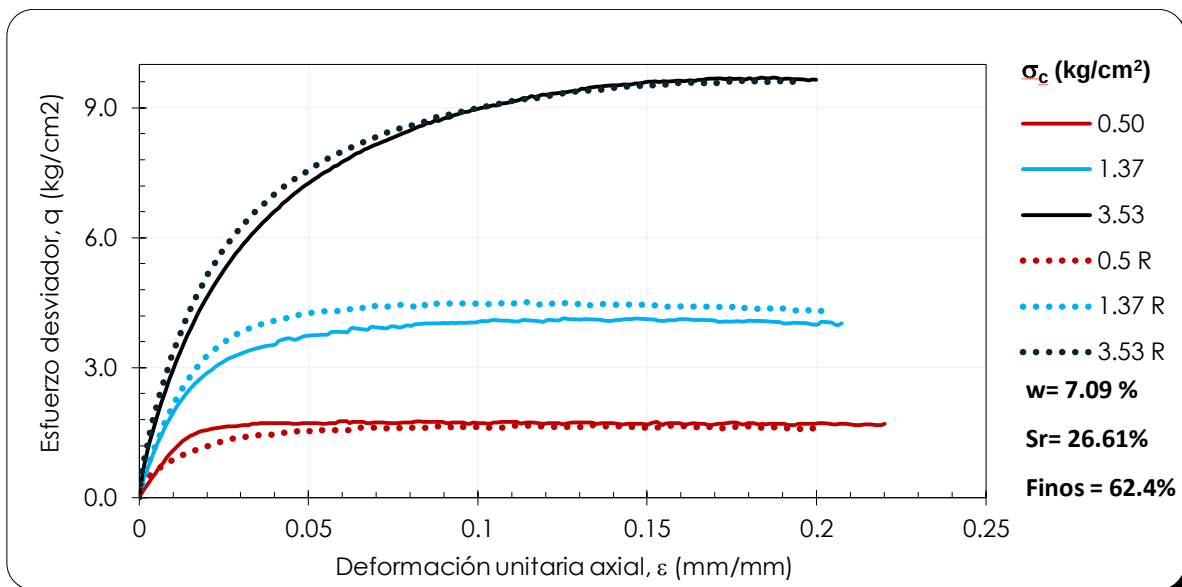


Figura 4.6 Curva esfuerzo deformación Serie 4.

En la Figura 4.7 se aprecian los círculos de Mohr para la Serie 4, con ayuda del gráfico podemos observar que la relación esfuerzo cortante máximo y esfuerzo normal es la misma para la muestra reconstituida e inalterada, de esa forma podemos afirmar que los parámetros mecánicos obtenidos mediante los ensayos en probetas formadas en laboratorio son del mismo orden que las de material inalterado. El comportamiento de las Series 3, 5 y 6 es similar a este, véase Anexo B.

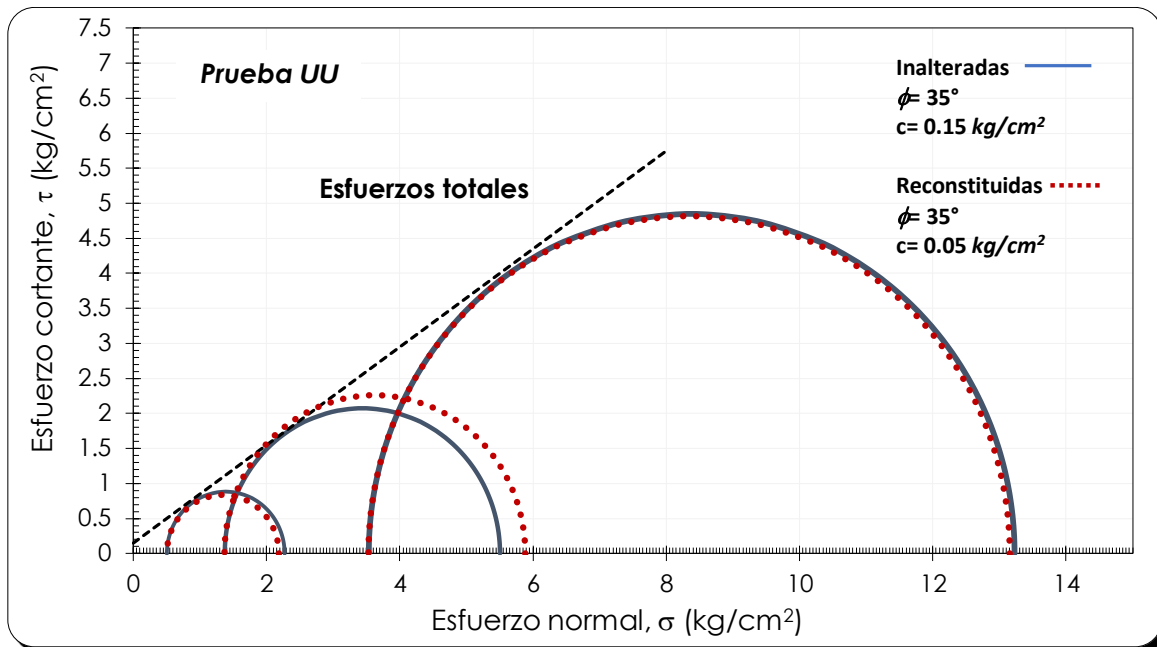


Figura 4.7 Círculos de Mohr de Serie 4

El ángulo de fricción aparente obtenido por probetas inalteradas y reconstituidas es prácticamente el mismo. Sin embargo, cuando el grado de saturación es mayor el 75%, el ϕ comienza a variar de manera importante, esto se muestra en la Tabla 4.3, en el caso de la cohesión también existe una ligera variación, no obstante, este valor es muy pequeño, por lo que se puede decir que los dos tipos de probetas no presenta una cohesión significativa.

Tabla 4.3 Parámetros mecánicos obtenidos de ensayos UU en probetas inalteradas y reconstituidas

Serie, Sondeo y Muestra	Localización	σ_c kg/cm ²	Probetas inalteradas				Probetas reconstituidas			
			Sr %	w %	ϕ grados	C kg/cm ²	Sr %	w %	ϕ grados	C kg/cm ²
1 SS-2-1 M-7	ZAC	0.5	92.27	21.40	30.00	1.10	85.55	20.45	21.00	0.55
		1.5	-	-			-	-		
		2.88	94.92	21.75			92.34	20.32		
2 SS-1-1 M-3	SLP	0.5	82.15	17.32	36.00	0.15	79.78	17.12	24.00	0.28
		0.85	-	-			-	-		
		1.21	82.62	17.34			79.84	17.39		
3 SS-1-3 M-2	SLP	0.52	19.79	4.65	34.00	0.40	19.87	4.85	35.00	0.18
		1.92	21.09	5.46			21.66	5.37		
		4.88	20.75	5.20			21.00	5.33		
4 SS-3-2 M-1	SLP	0.5	26.73	7.16	35.00	0.15	26.73	7.85	35.00	0.05
		1.37	27.40	7.39			27.40	7.64		
		3.53	25.70	6.73			25.70	7.28		
5 SS-5-2 M-3	SLP	0.5	44.81	11.29	35.00	0.07	44.00	11.27	34.00	0.10
		1.32	41.82	10.30			41.31	10.33		
		3.14	42.24	10.39			44.30	10.57		
6 SS-1-2 M-3	SLP	0.5	71.58	15.07	32.00	0.10	72.04	15.06	33.00	0.02
		1.22	59.17	12.96			62.44	19.95		
		2.73	62.85	12.87			63.07	12.65		

4.2.2 Mecanismo de falla

En el comportamiento mostrado en los gráficos anteriores, se observan curvas de tipo plástico, tanto en las muestras inalteradas como en las reconstituidas. El mecanismo de falla presente en las probetas formadas por las dos vías corresponde al mencionado, es decir, fallan en barril. No obstante, existe una diferencia, en las probetas inalteradas la falla se presenta sólo en una zona, en cambio, en la reconstituida se encuentra a lo largo de toda la probeta (Figura 4.8). Esto se puede deber a la homogenización en el formado de las reconstituidas, aspecto que no se encuentra en la deposición in-situ del material.

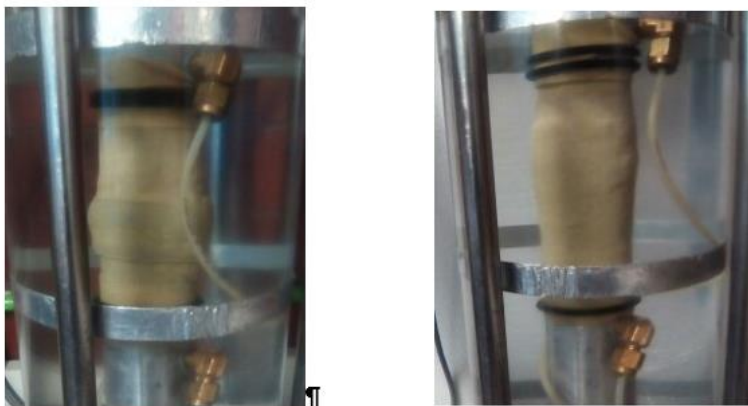


Figura 4.8 Probetas falladas, inalterada y reconstituida respectivamente.

4.3 Análisis de resultados en función del grado de saturación

Se presentan los resultados obtenidos para el ángulo de fricción interna aparente en función del grado de saturación de ensayos triaxiales tipo UU realizados en 58 probeta inalteradas y reconstituidas. El material proviene de los dos sitios estudiados (San Luis Potosí y Zacateca). Adicionalmente, se adjuntan los resultados reportados por Bernal *et al.*, (2018), quien estudió esta relación con jales de tres sitios (dos en Colima y uno en San Luis Potosí), mediante muestra inalterada. También se comparan con los resultados obtenidos por Hernández (2016), mediante pruebas triaxiales UU con probetas reconstituidas de residuos mineros procedentes de Colima.

En la Figura 4.9 se observa la influencia del ángulo de fricción interna obtenido por pruebas triaxiales tipo UU. Puntualizando en cada una de las investigaciones, se aprecia un rango mayor para los residuos mineros estudiados por Bernal *et al.*, (2018), dónde el ángulo se mantiene en una franja situada entre 30° y 42° , comienza a disminuir a partir del 90% de grado de saturación

En las pruebas ensayadas para esta investigación se observa que el ángulo de fricción interna se mantiene en una franja de 33° a 36° , el decrecimiento de este valor comienza cuando el grado de saturación rebasa el 75%. Los puntos obtenidos de ensayos en muestra inalterada y reconstituida son de comportamiento similar.

De la misma manera, los resultados de las probetas reconstituidas por Hernández (2016), se mantienen con comportamiento constante, cuando el grado de saturación es menor a 80%. El ángulo de fricción interna se mueve en un rango de 25° a 36° . Si generalizamos la franja donde los valores para el ángulo de fricción interna aparente se mantienen lineales, obtenemos un rango de 25° a 41° , el cual disminuye cuando se rebasa el 80% de grado de saturación.

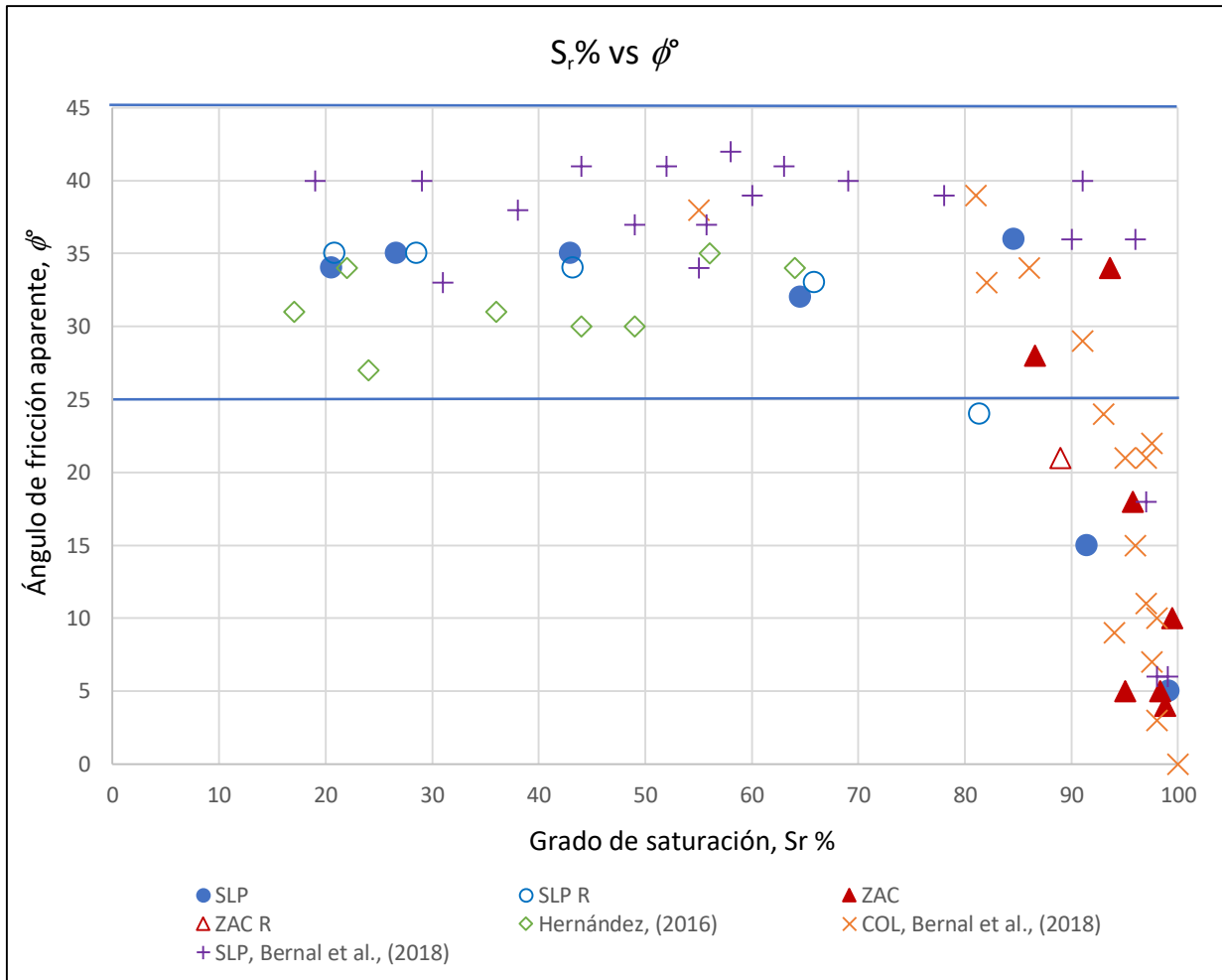


Figura 4.9 Ángulo de fricción aparente en función del grado de saturación. Modificado de Bernal et. al., 2018.

4.4 Análisis de resultados en función del módulo tangente inicial y carga máxima

En la Figura 4.6 se aprecia un mismo comportamiento inicial; la carga máxima es prácticamente igual en ensayos de probetas inalteradas y reconstituida. Se calculó el módulo tangencial de elasticidad inicial para las curvas de las Series 3, 4, 5 y 6 obteniendo valores similares en probetas inalteradas y reconstituidas. En la Figura 4.10 se presenta esquemáticamente la determinación del E_0 y $q_{m\acute{a}x}$.

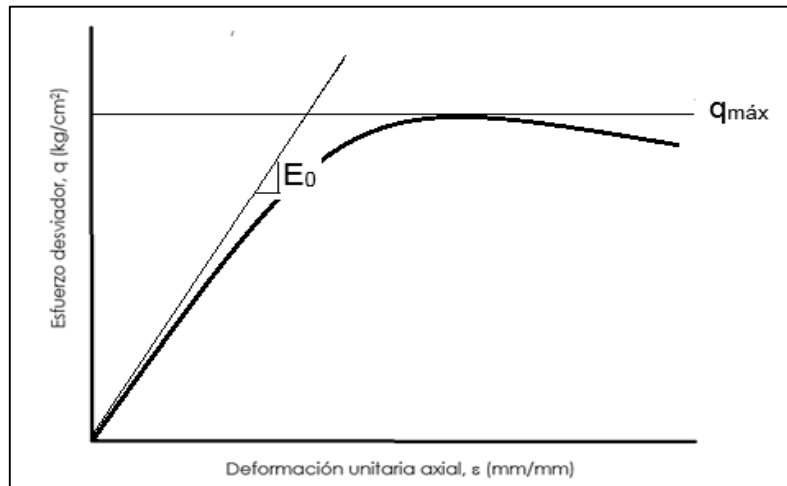


Figura 4.10, Determinación de E_0 y $q_{\text{máx}}$

En la Figura 4.11 se presenta el módulo tangente de elasticidad inicial en función del grado de saturación para distintos confinamientos, obtenidos de las muestras inalteradas y reconstituidas. Los datos se encuentran hasta el 75% de S_r , debido a que pasando ese valor ya no presentan relación lineal, por lo que se descartaron diez probetas. En los datos se observa que mientras menor es el esfuerzo confinante, la pendiente que los relaciona también decrece, al igual que la dispersión de los puntos. Asimismo, se aprecia que mientras mayor es el S_r , menor es la variación entre los puntos obtenidos por probetas inalteradas y reconstituidas, además, de que el E_0 disminuye.

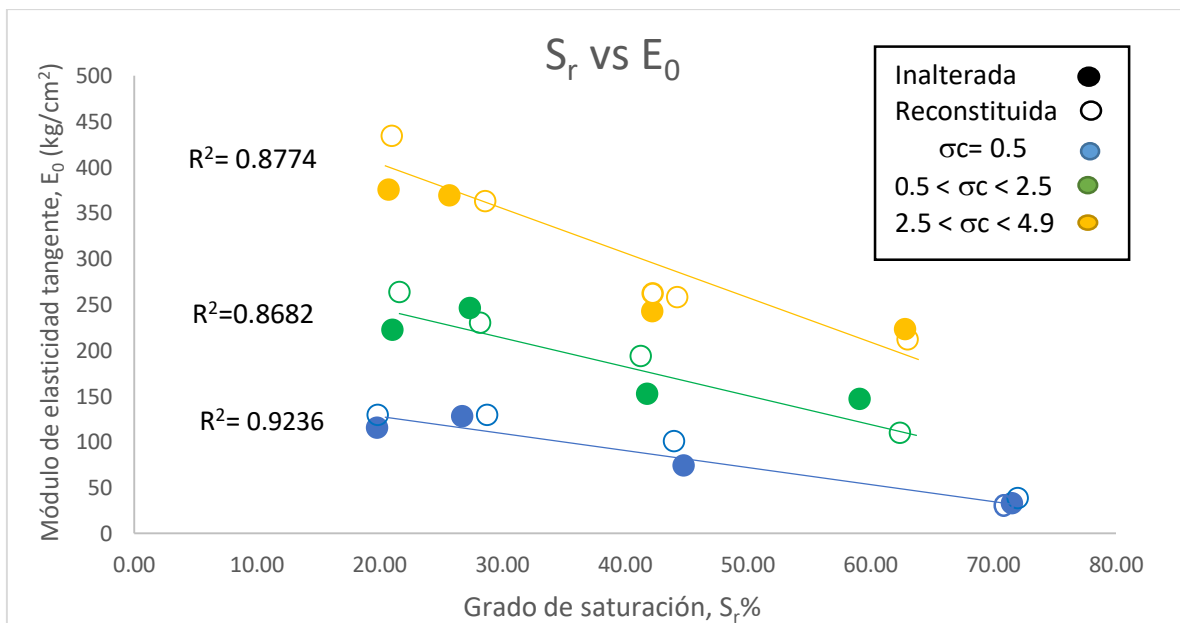


Figura 4.11 S_r vs E_0

El esfuerzo desviador máximo se presenta en la Figura 4.12, en función del grado de saturación. Los ensayos son a distintos confinamientos y de material inalterado y reconstituido, en el gráfico se puede ver que a mayor S_r , menor es el $q_{\max}$, al igual que en la Figura 4.11, mientras menos es el confinamiento, la pendiente que relaciona los puntos decrece. En las dos Figuras se observa que el material integral y reconstituido, se comporta de la misma manera.

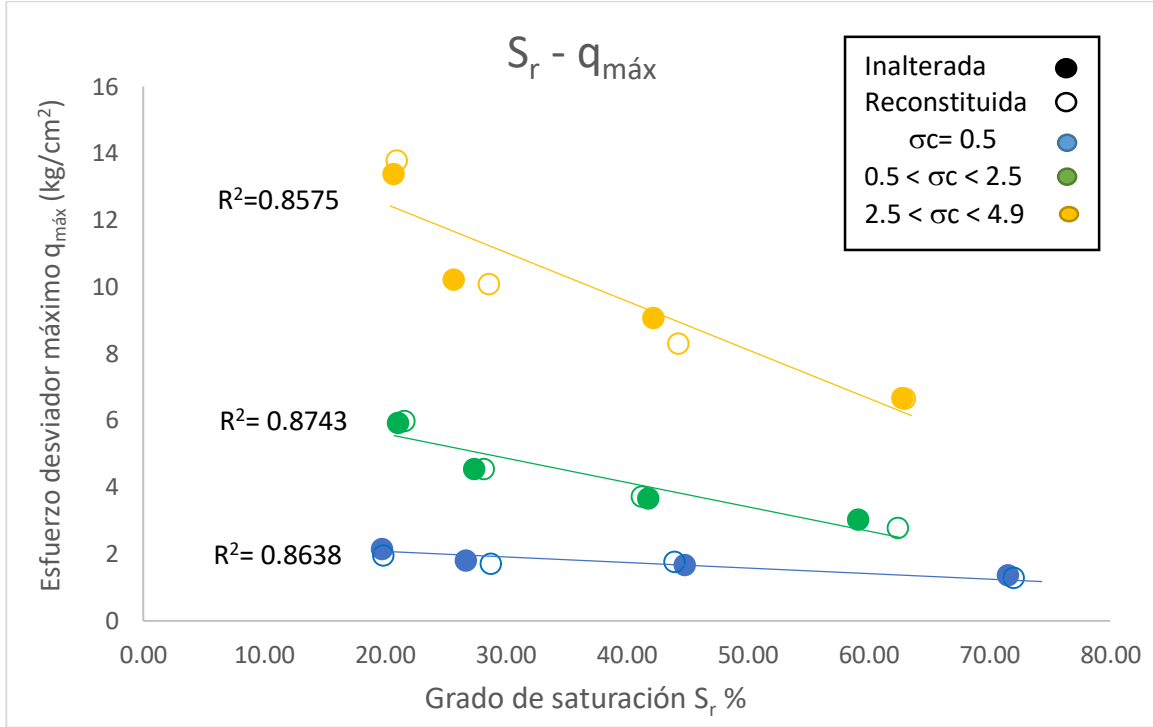


Figura 4.12 S_r vs $q_{\max}$

4.5 Modelo propuesto para curvas esfuerzo-deformación

Se ajustaron las curvas esfuerzo-deformación a la ecuación de Kondner y a la Ecuación General de Ductilidad; sin embargo, la curva teórica, no replicó el comportamiento experimental, por lo cual se propone una ecuación basada en los dos modelos, con parámetros equivalentes.

$$q = \frac{\varepsilon^{0.85}}{a + b\varepsilon^{0.85}} - \frac{\varepsilon^{2.5}}{c} \quad (3)$$

Dónde

ε = Deformación axial

a =Se refiere a la inversa del Módulo tangente inicial, E_0 , determinado experimentalmente.

b = Es determinado experimentalmente por la inversa del Módulo tangencial a final del comportamiento elásticos del material

c = La inversa del Módulo secante postpico, E_0 , determinado experimentalmente.

0.8 y 2.2= Coeficiente de curvatura de la rama postpico y prepico respectivamente.

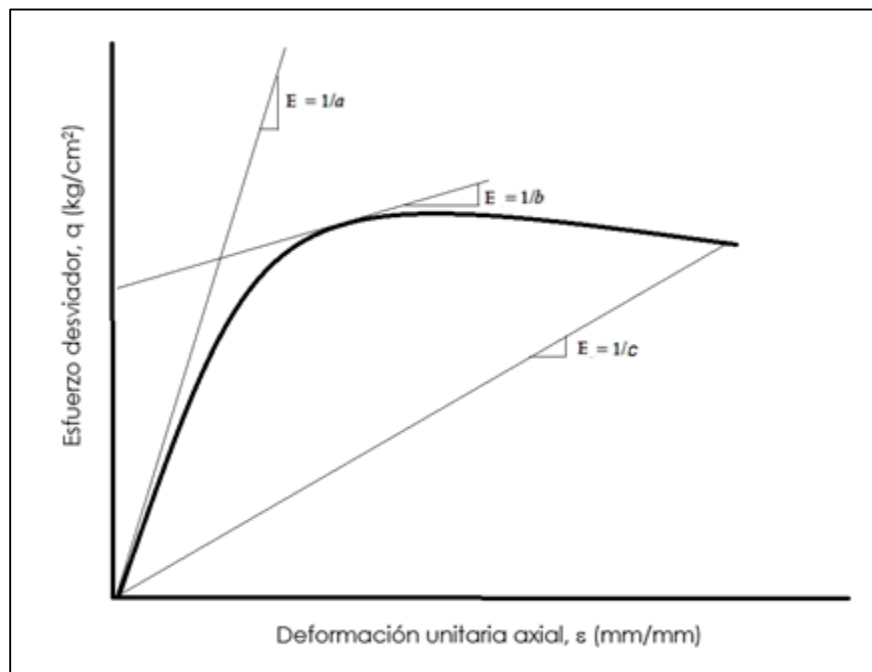


Figura 4.13 Parámetros de la ecuación

La propuesta se hace con el objetivo de que la asíntota superior sea referida a la tendencia de la curva, en lugar de su valor máximo, los coeficientes de curvatura permanecen constantes para estos materiales.

4.5.1 Ajuste teórico

Con la ecuación propuesta se realizaron las curvas teóricas con base en los resultados experimentales. En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestra el ajuste teórico para las curvas esfuerzo-deformación de la Serie 4, con confinamiento de 0.5 kg/cm^2 , de probetas inalteradas y reconstituidas.

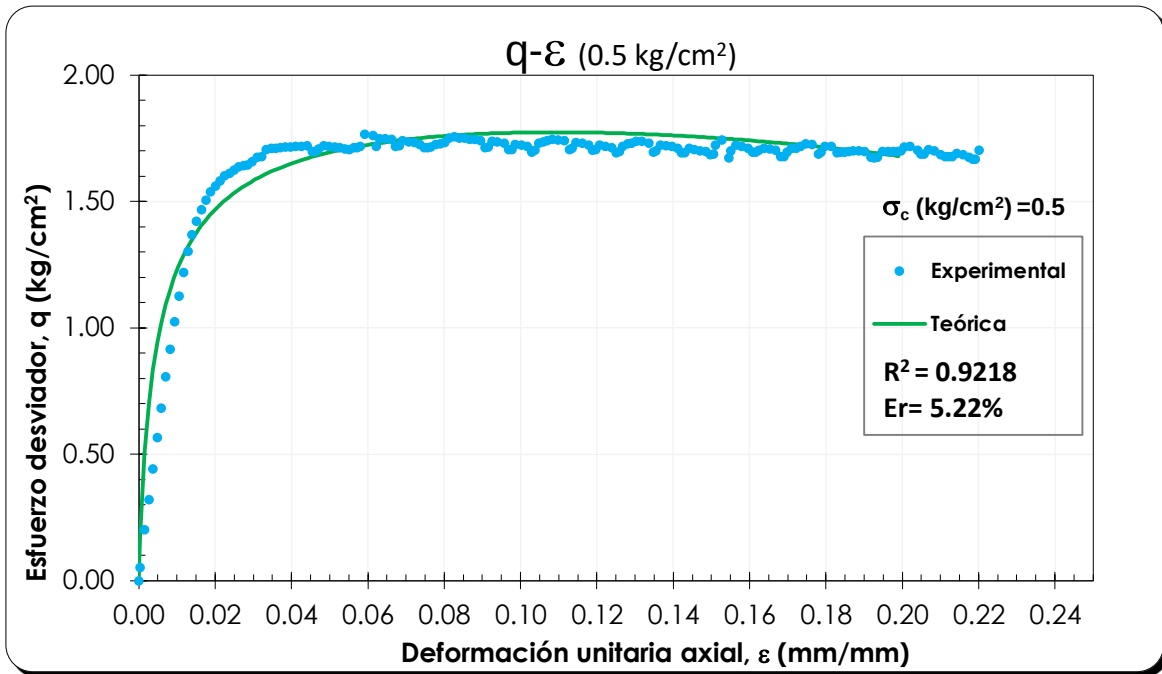


Figura 4.14 Curvas esfuerzo-deformación, experimental y teórica de Serie 4(Inalterada).

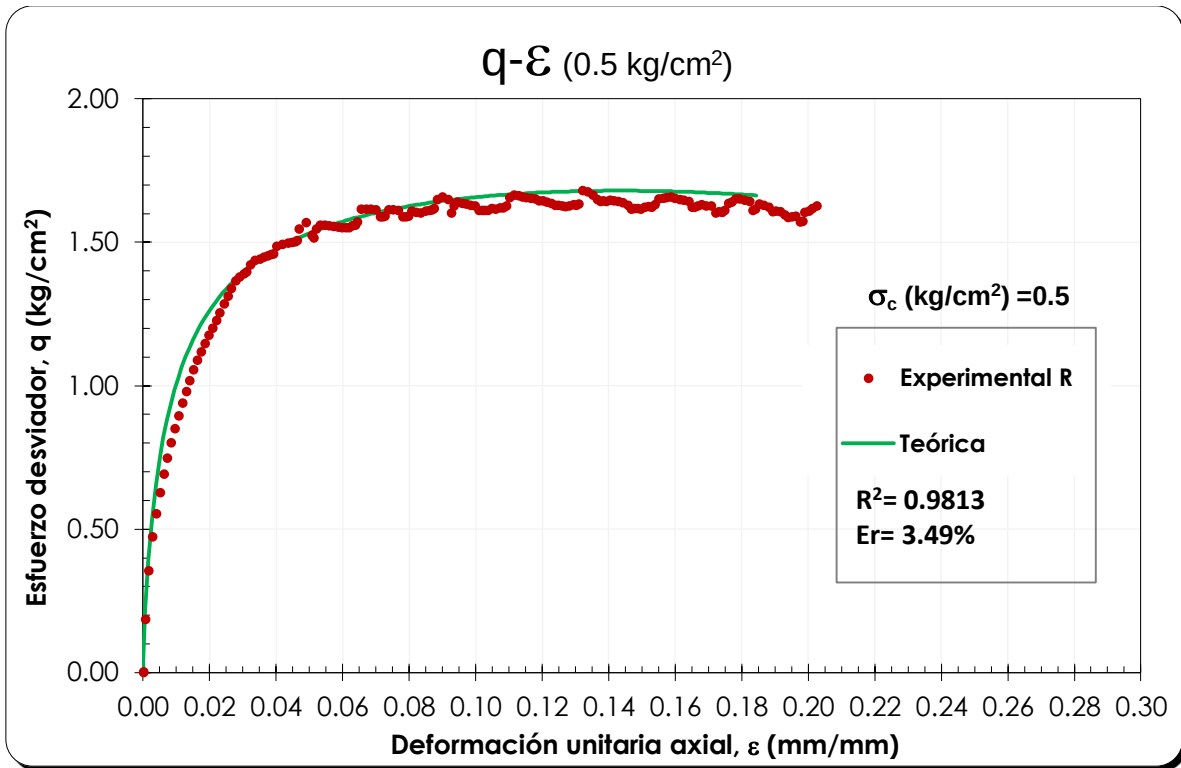


Figura 4.15 Curvas esfuerzo-deformación, experimental y teórica de Serie 4 (Reconstituida).

En las Figuras 4.14 y 4.15, se ve el resultado de la curva teórica obtenida por la ecuación propuesta, el desfase entre la ajustada y la experimental es mínimo. el principal detalle se encuentra en la zona de transición entre la parte elástica y la zona residual, el resultado fue similar en las demás series ajustadas a esta ecuación, véase el Anexo C.

4.5.2 Normalización de parámetros

Se trazaron los parámetros a, b y c (Figuras 4.16 a 4.18), de la ecuación propuesta, en función del grado de saturación (S_r), con el objetivo de ajustar una ecuación, de esta manera poder determinar dichos valores, con sólo el S_r , así una curva predictiva del comportamiento esfuerzo-deformación de materiales similares al ensayado.

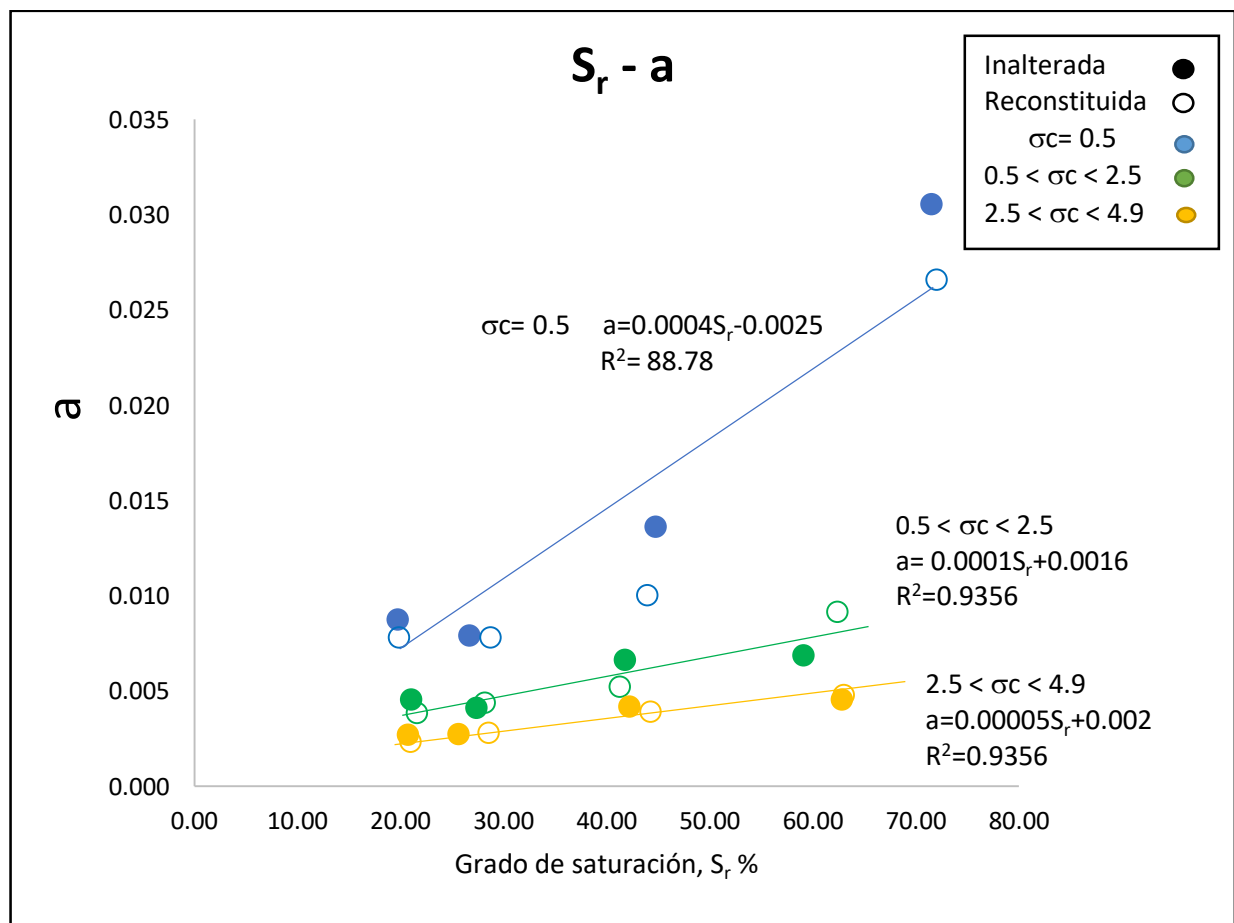


Figura 4.16 Parámetro “a” en función del S_r

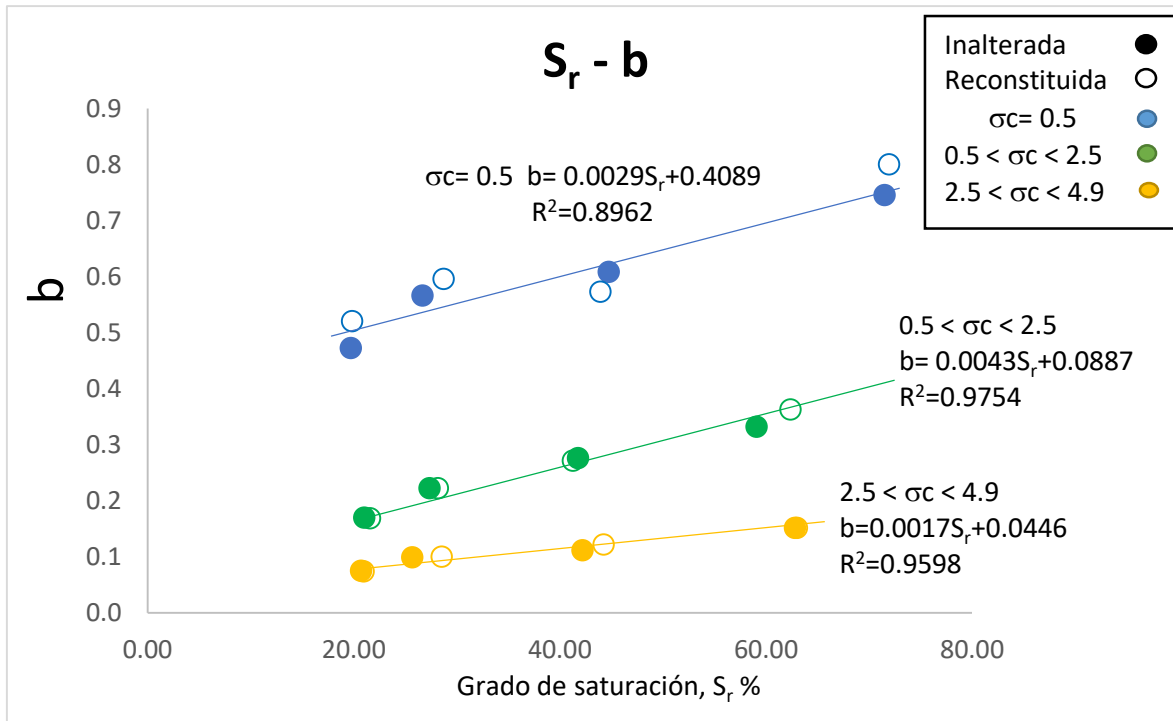


Figura 4.17 Parámetro “b” en función del grado de saturación

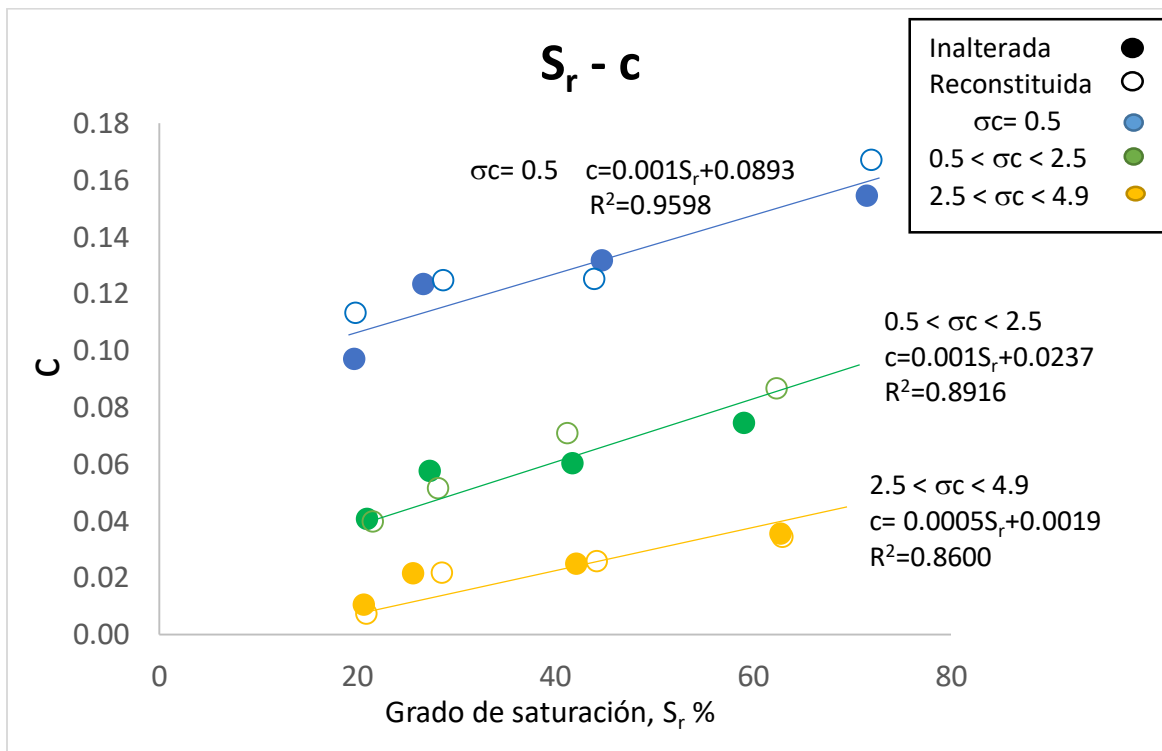


Figura 4.18 Parámetro “c” en función del grado de saturación

De la relación de los parámetros a , b y c con el S_r se presentan las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, de éstas se obtiene nueve ecuaciones lineales, tres por parámetro, cada ecuación pertenece a un rango de esfuerzo confinante. Los tres valores aumentan linealmente conforme el grado de saturación es mayor, sin exceder el 75%, pues comienzan a decrecer de manera no lineal.

4.5.3 Comparación de curvas experimentales y curvas predictivas

Con las funciones lineales obtenidas a partir del modelo propuesto, se obtuvieron tres curvas predictivas para el comportamiento esfuerzo desviador-deformación axial. Los tres ensayos que se presentan a continuación, no se tomaron en cuenta para la obtención de las funciones lineales.

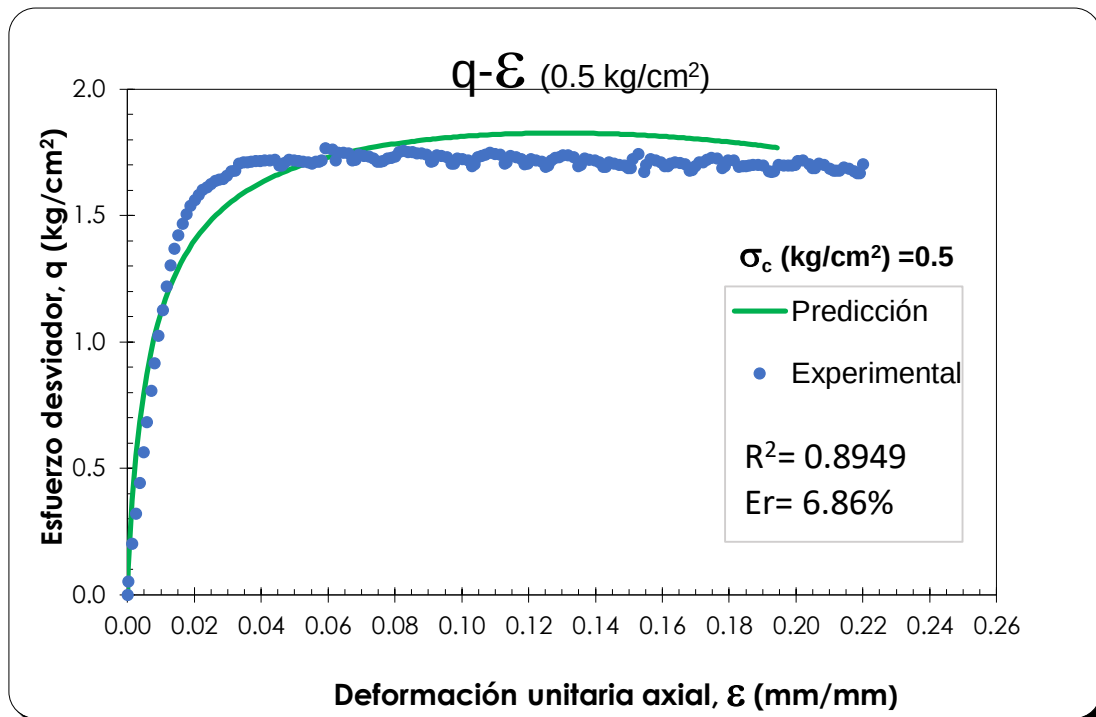


Figura 4.19 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 0.5 kg/cm^2

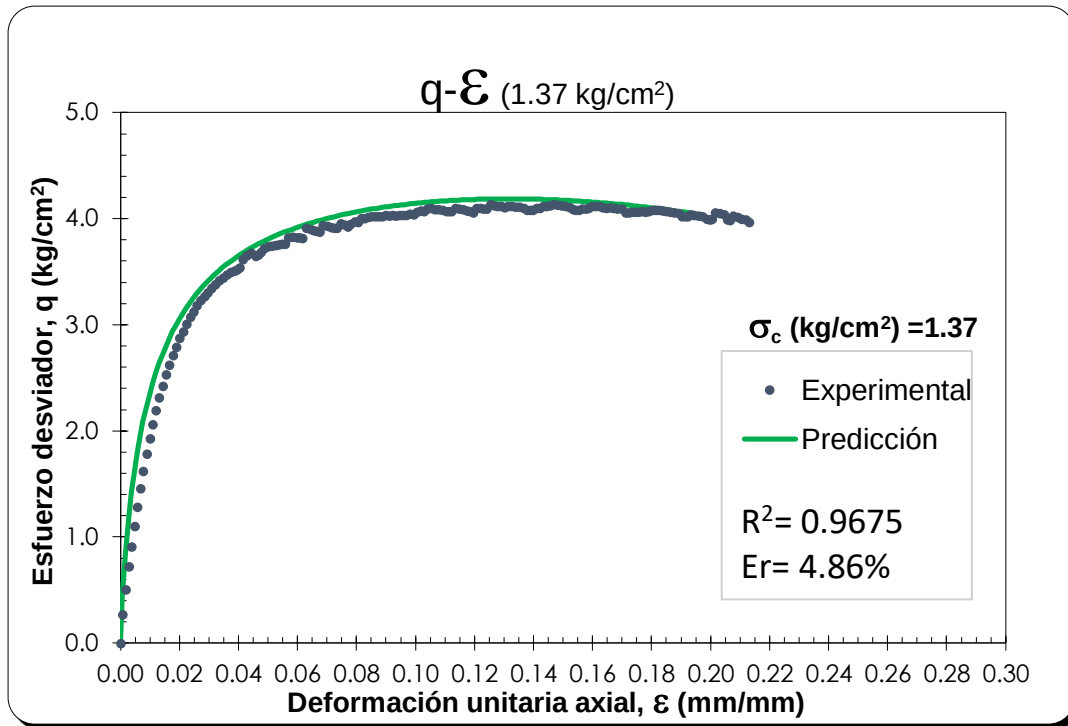


Figura 4.20 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 1.37 kg/cm²

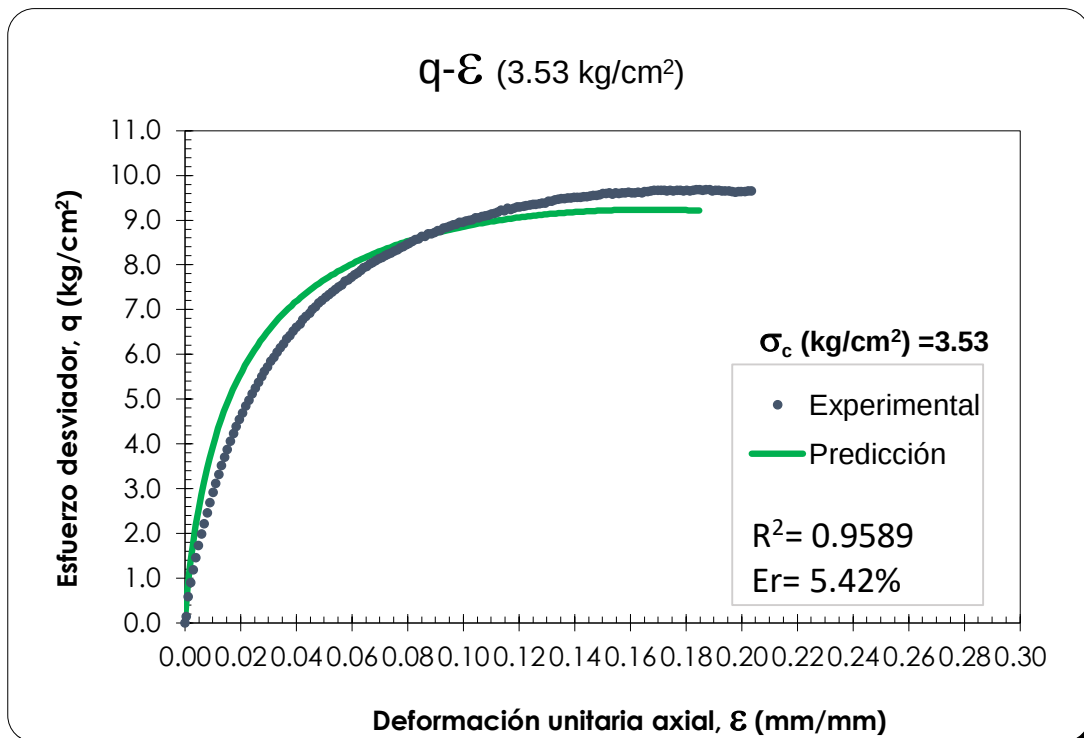


Figura 4.21 Curvas predictiva y experimentales para un confinamiento de 3.53 kg/cm²

En las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, se presentan las curvas experimentales y predictivas, para ensayos en probetas obtenidas del material utilizado en este trabajo a distintos confinamientos, en la parte inicial de las gráficas se ve un comportamiento similar por parte de la predicción, esto se mantiene en todo el comportamiento descrito, no obstante, el esfuerzo desviador máximo tiene una ligera variación de 0.58 kg/cm^2 entre las curvas experimentales y predictivas, los resultados son aceptables, por lo que el modelo predictivo es representativo del comportamiento esfuerzo-deformación, para los materiales probados en esta investigación (véase Anexo C).

5 Conclusiones y recomendaciones

Los residuos mineros ensayados de San Luis Potosí presentan una densidad relativa de la fracción sólida entre 2.97 y 3. Los materiales provenientes de Zacatecas son de mayor valor, indican un rango de 3.22 a 3.35. Las muestras de los dos sitios conservan una granulometría predominantemente fina (por encima del 62%). Debido a las características no plásticas no cohesivas de los jales (Candelaria *et. al.*, 2018; Vermeulen, 2001), no fue posible realizar rollos de plasticidad. Asimismo, las dos ubicaciones muestran w_L menores al 50%. De acuerdo con el SUCS la muestra se clasificó como ML-Limo de baja plasticidad.

Es posible reconstituir probetas de jales por el método de compactación estática, con condiciones del mismo orden que de las inalteradas; siempre que el contenido de agua no exceda el 21% correspondiente a grados de saturación menores de 90%. El material reconstituido ante estas condiciones presenta una estructura no sólida, debido a que el agua se separa del suelo y fluye con su propio peso.

Los resultados obtenidos mediante pruebas triaxiales tipo UU en muestra reconstituida son representativos al de las muestras inalteradas cuando el grado de saturación es menor al 75%, debido a que no hay diferencias significativas en el ángulo de fricción interna y el esfuerzo cortante máximo. La cohesión obtenida para los dos tipos de materiales fue demasiado pequeña, por lo que se despreció en esta investigación.

Aunque es posible reconstituir con grados de saturación cercanos al 95%, los resultados de los ensayos UU, no son fiables y permanecen por debajo de los valores indicados por sus homólogas inalteradas.

El comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos UU en muestra inalterada y reconstituida, es similar, sin embargo, la falla en el material integro es local, es decir, no se presenta en toda la probeta a diferencia de la reconstituida. Esto se debe a la homogenización en la preparación para la formación de las probetas.

Los ángulos de fricción interna obtenidos mediante ensayos triaxiales tipo UU en probetas inalteradas de muestra proveniente de San Luis Potosí varían de 32 a 35 grados, sus homólogas reconstituidas presentan prácticamente el mismo rango, siempre que el grado de saturación no exceda el 75%.

En los materiales que provienen de Zacatecas el ángulo de fricción interna aparente obtenido mediante pruebas triaxiales tipo UU tiene valores de 28 y 34°. Debido a las condiciones de mayor contenido de agua sólo se pudo reconstituir la última, indicando un ángulo de 21°, cuando el grado de saturación es menor al 95%.

En el estudio realizado por Bernal *et al.*, (2018) reportó que el decrecimiento del ángulo de fricción interna aparente comienza cuando el grado de saturación excede el 90%; sin embargo, los límites presentados en las conclusiones anteriores indican que en los jales ensayados la resistencia de la muestra baja considerablemente a partir de 75% de Sr. Los ángulos obtenidos se encuentran en la franja propuesta por Bernal *et. al.*, (2018), que presenta un intervalo de 25° a 41°.

El grado de saturación tiene influencia en el módulo tangencial de elasticidad inicial, y el esfuerzo desviador, siempre que el valor de Sr no exceda el 75% pues el comportamiento se torna de manera no lineal. Estas relaciones son útiles para proponer modelos teóricos y predictivos de comportamiento.

La ecuación propuesta para el ajuste de curvas esfuerzo-deformación, presenta resultados favorables y representativos del comportamiento obtenido por pruebas triaxiales tipo UU.

Se debe de hacer una revisión a los exponentes de la ecuación de ajuste (3), para determinarlos en función de un parámetro del suelo. Los exponentes de la ecuación se mantienen constantes, por esta razón se perdió precisión, pero se gana replicabilidad.

Las ecuaciones presentadas para obtener los parámetros a, b y c en función del grado de saturación, funcionan de manera correcta para realizar curvas predictivas del comportamiento esfuerzo-deformación en jales con condiciones similares a las de la muestra ensayada; sin embargo, se deben acotar los intervalos propuestos de esfuerzo de confinamiento y adicionalmente probar el modelo propuesto para condiciones granulométricas y mineralógicas distintas.

Referencias

- Acevedo, M. E. (2015). *Influencia de la compacidad relativa en el coeficiente de permeabilidad de jales. Tesis para obtener el grado de Maestro*. Ciudad de México: UNAM.
- Álvarez, E. (2019). *Comportamiento de un limo arcillo-arenoso con preconsolidación inducida interpretado con un modelo de ductilidad (Tesis para obtener el grado de Maestro)*. Ciudad de México: Posgrado de Ingeniería, UNAM.
- Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C. (1993). *Manual de Presas y Depósitos de Jales*. Ciudad de México.
- Badillo, E. (1986). *Teoría general de la consolidación de arcillas*. Philadelphia: ASTM STP 892.
- Bernal, M. (2016). *Influencia de la Compacidad Relativa y el Esfuerzo Efectivo en el Comportamiento Esfuerzo-Deformación de Jales Saturados. Tesis de maestría*. Ciudad de México: UNAM, Posgrado de Ingeniería.
- Bernal, M., Hernández, V., Flores, O., Hernández, S., Guzmán, A., & Candelaria, J. (2018). *Determinación del ángulo de fricción interna por medio de pruebas triaxiales tipo UU y CU en jales*. León, Guanajuato: XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Briseño, O. M. (2010). *La normatividad ambiental en materia de presas de jales*. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Acapulco, Gro.
- Bussière, B. (2004). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Candelaria, J., Bernal, M., Flores, O., Guzmán, A., & Hernández, S. (2018). *Determinación de límites de consistencia en jales usando conos penetrantes*. León, Guanajuato: XXIX Reun n Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Das, B. (2002). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Madrid.
- Duncan, & Chang. (1970). *Análisis no líneal de esfuerzos y tensiones en suelos*. Journal of soil mechanics and foundation division.
- Espino J., V. (2015). Diseño Geotécnico de una Presa de Jales con el método de aguas abajo. *Geomimet*, 27-34.
- Flores, O. (1996). *Propiedades dinámicas en jales. Tesis para optar por el grado de Maestro*. Ciudad de México: UNAM.

- García, A. (2019). *Permeabilidad en muestras inalteradas y remoldeadas de jal (tesis para optar por el grado de maestro)*. Ciudad de México: Posgrado de Ingeniería , UNAM.
- García, A., & Flores, O. (2018). *Permeabilidad en muestras inalteradas y remoldeadas*. León, Guanajuato: XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Hernández, V. L. (2016). *Influencia de la Compacidad Relativa y Contenido de Agua en el Comportamiento Esfuerzo-Deformación de Jales Parcialmente Saturados. Tesis de maestría*. Ciudad de México: UNAM.
- Hernández, V., Bernal, M., Flores, O., González, J., Guzmán, A., & Hernández, S. (2018). *Comparativa entre pruebas in situ de ficómetro y pruebas triaxiales UU y CU realizadas en depósitos de jales*. León, Guanajuato: XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Jaime, A., & Sanabria, J. (2018). *Aspectos geotécnicos en operaciones mineras*. León, Guanajuato: XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Jantzer, I., Bjelkevik, A., & Pousette, K. (2008). Material properties of Tailings from Swedish mines. *Lulea: Norsk Geoteknisk Forening. Icold an UNEP*.
- Konder, R. (1963). *hyperbolic stress strain response cohesive soil*. JSMFD, ASCE.
- Lambe, & Whitman. (1991). *Mecánica de suelos*. Ciudad de México: Limusa.
- Moreno, B. (2017). *PROPUESTA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE JALES 1-2-3 DEL COMPLEJO MINERO-METALÚRGICO LA CARIDAD, CON BASE EN LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL*. Tesis para obtener el título de Ingeniero en Minas y Metalurgia, Ciudad de México: UNAM, Facultad de Ingeniería.
- Muñoz, J. (1986). *La minería en México. Bosquejo histórico*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- NOM-141-SEMARNAT-2003. (2003). *Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación del almacenamiento de jales*. Ciudad de MÉXICO: Diario Oficial de la Federación.
- Orozco, V. (2010). *La Ingeniería Geotécnica en las Presas de Jales Mexicanas*. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Acapulco, Gro.

- PRISA. (2011). *Economía: producción minera, artículo*. México: http://mx.kalipedia.com/geografia-mexico/tema/mexico/economia-produccion-minera.html?x=20080510klpgeogmx_46.Kes.
- Vidal, D. (1988). *Presas de Jales (Impacto y Control Ambiental)*. Ciudad de México : Foro de Consulta Popular sobre Enérgéticos y Minería SEMIP.
- Zea, C., Rivera, R., Álvarez, E., & Mercado, A. (2016). *Un modelo de ductilidad aplicado al caso de suleos finos con preconsolidación inducida*. Merida, Yucatán: XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica .

Anexo A

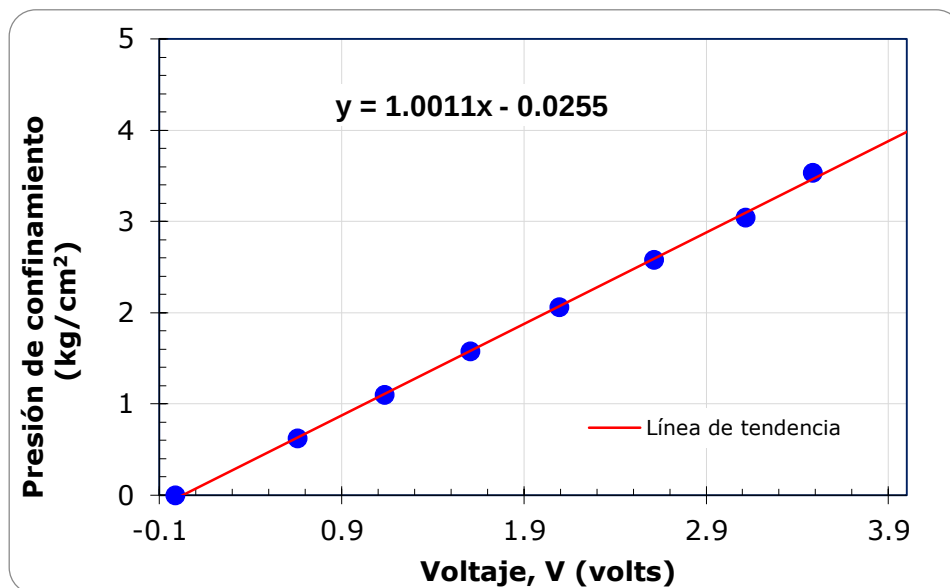


Figura A.1 Calibración de confinamiento

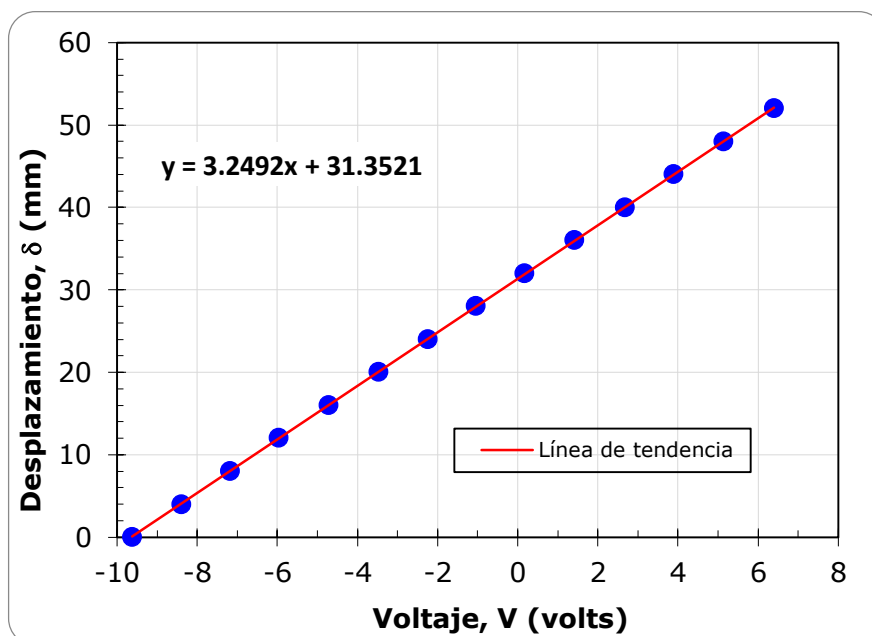


Figura A.2 Calibración del desplazamiento al 100%

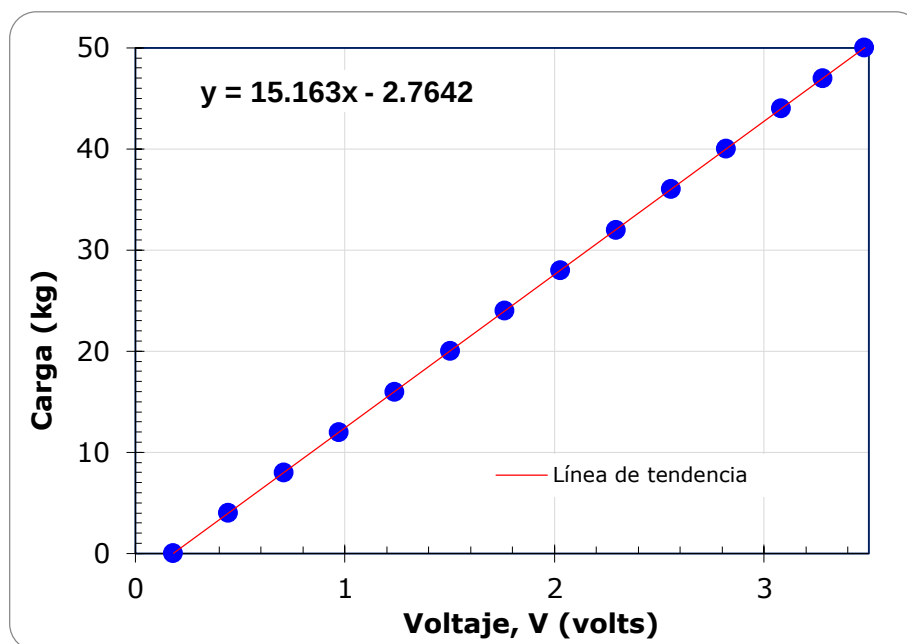


Figura A.3 Calibración de carga al 100%

Anexo B

- Pruebas con $w > 15\%$

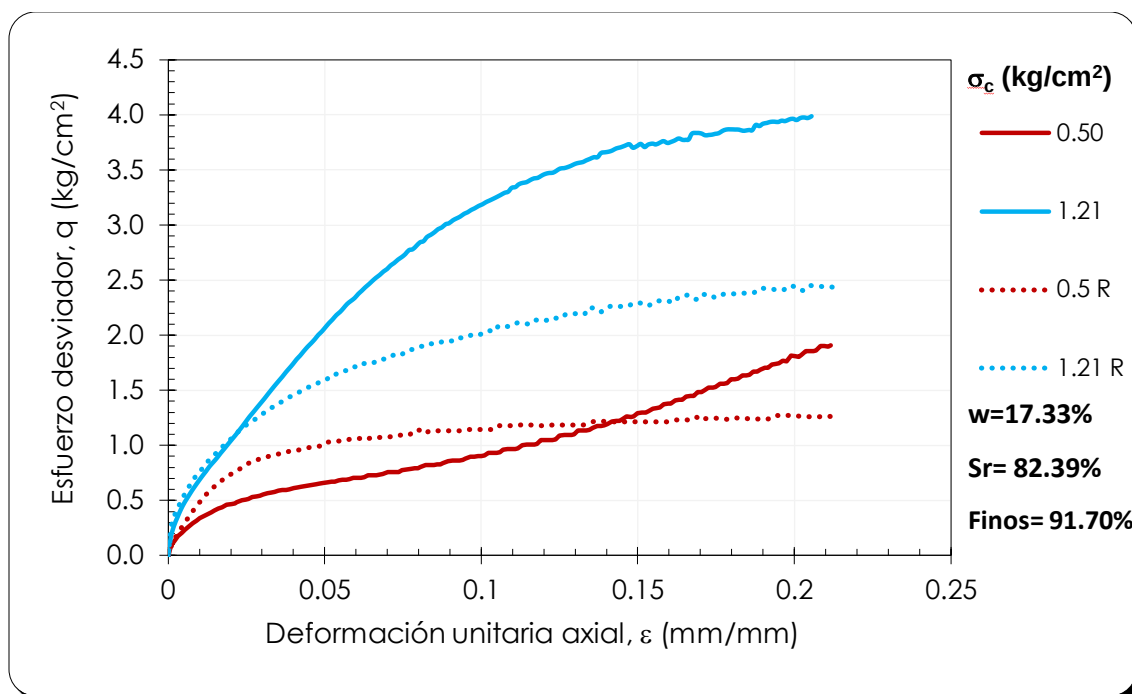


Figura A.4 Curvas esfuerzo deformación de Serie 2

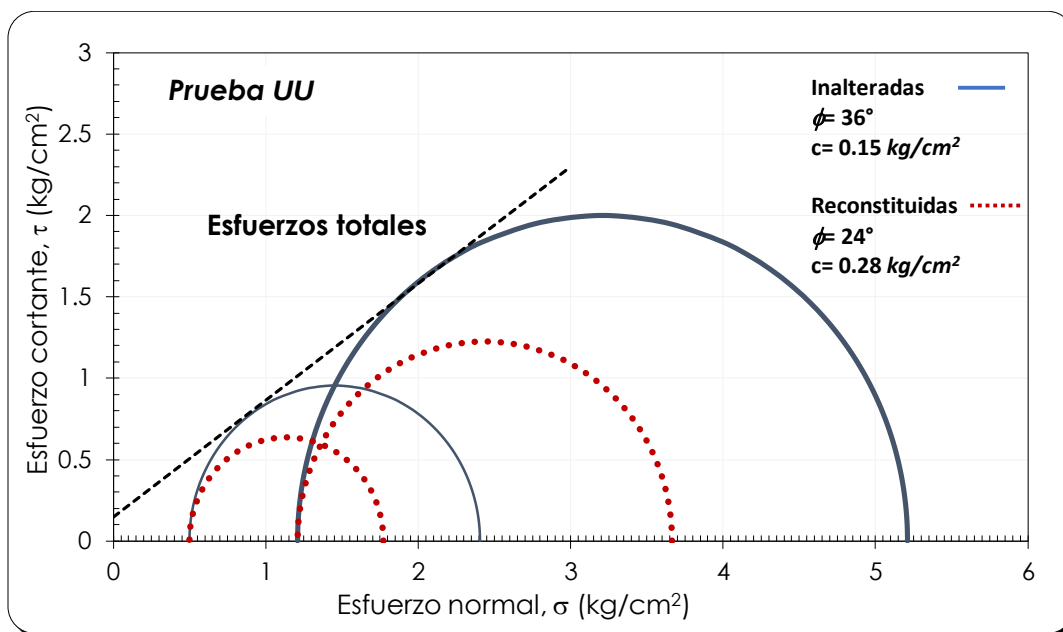


Figura A.5 Círculos de Mohr de Serie 2

- Con un $w < 15\%$

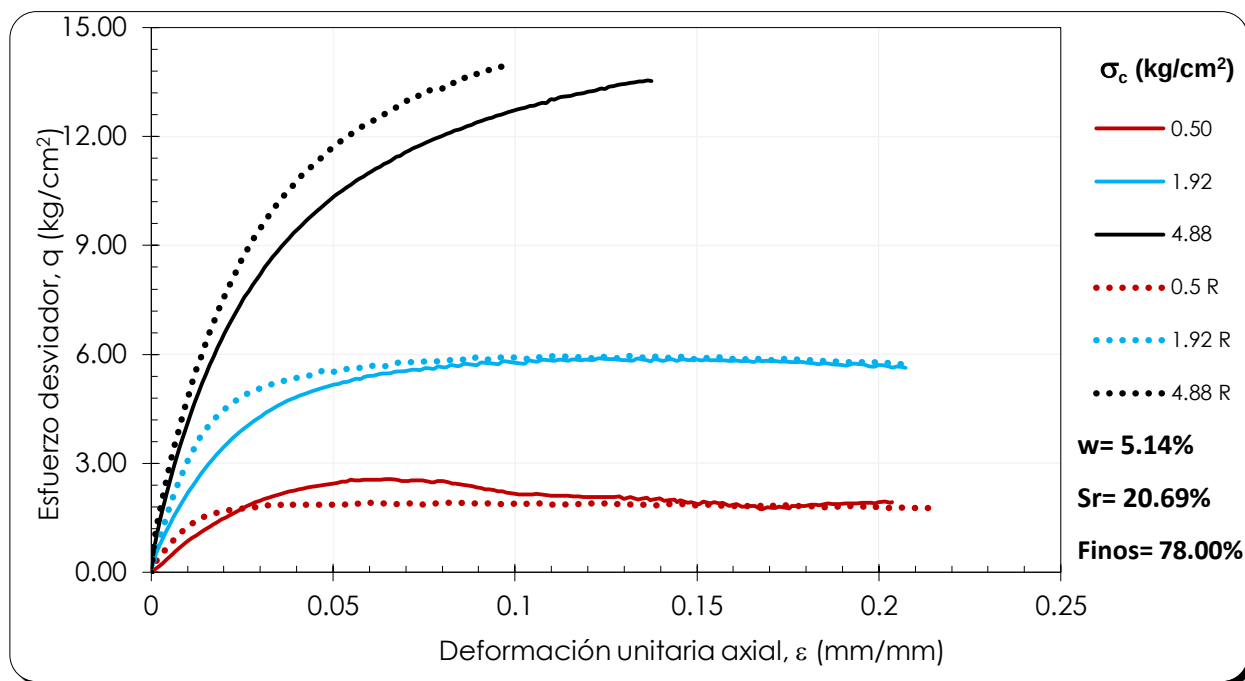


Figura A.6 Curvas esfuerzo-deformación. Serie 3

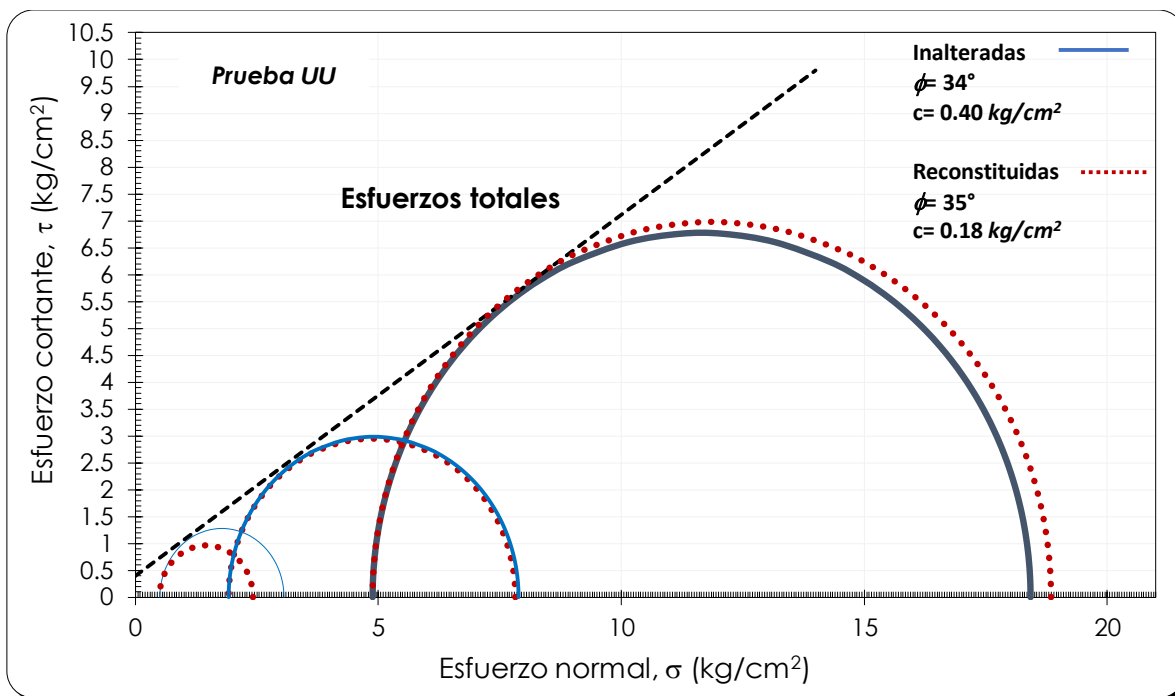


Figura A.7, Círculos de Mohr, Serie 3

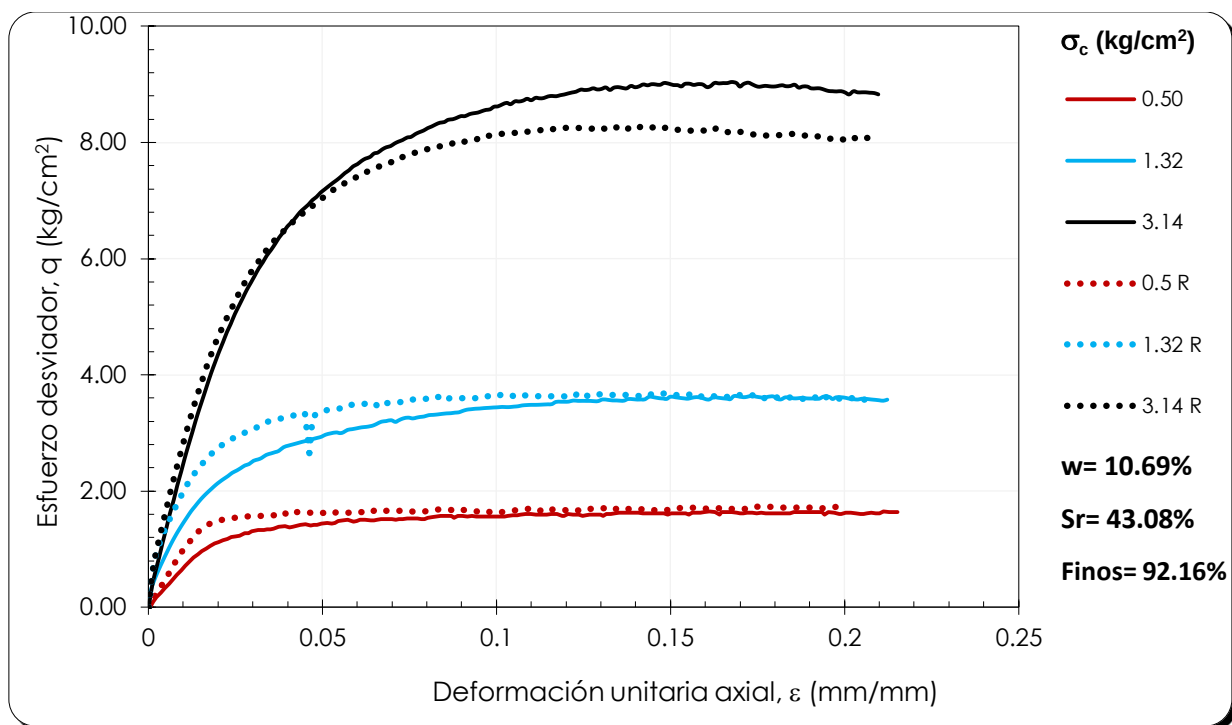


Figura A.8 Curvas esfuerzo-deformación, Serie 5

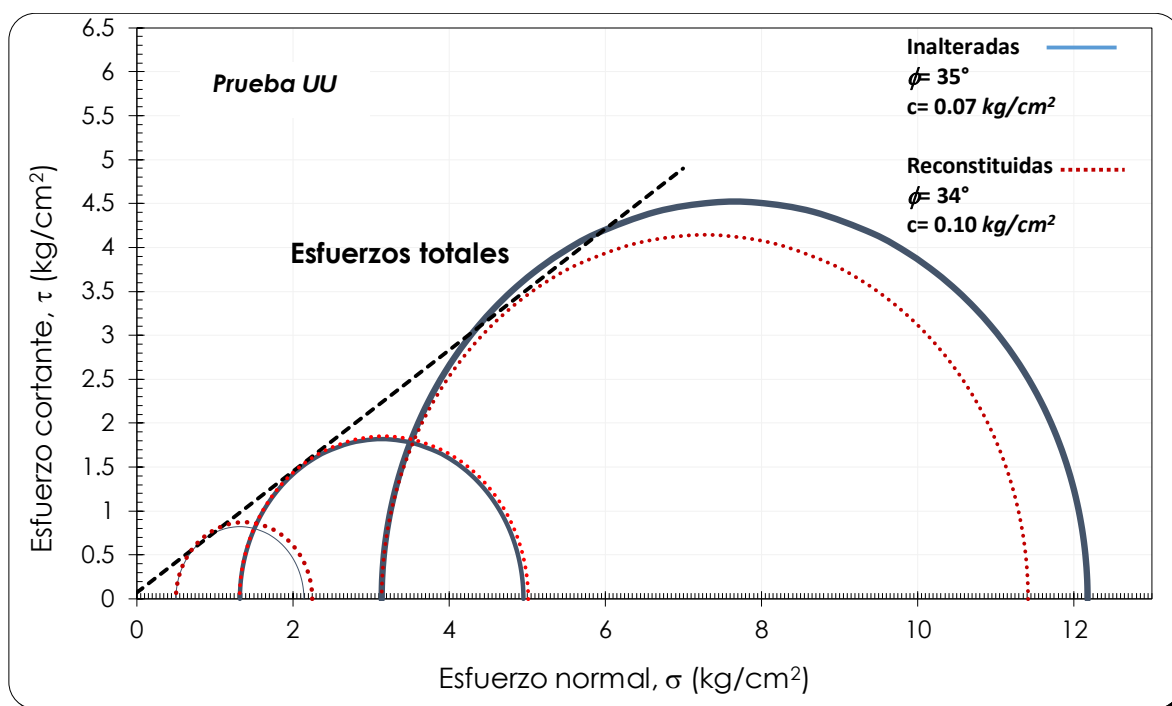


Figura A.9 Círculos de Mohr, Serie 5.

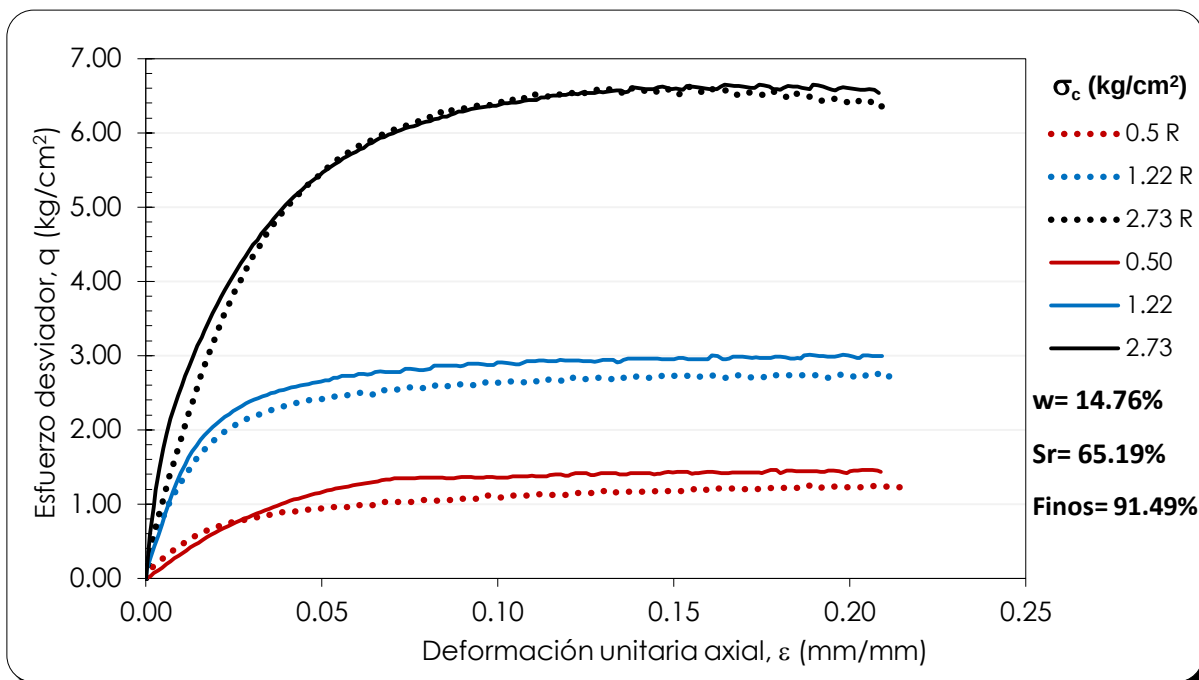


Figura A.9 Curvas esfuerzo-deformación, Serie 6

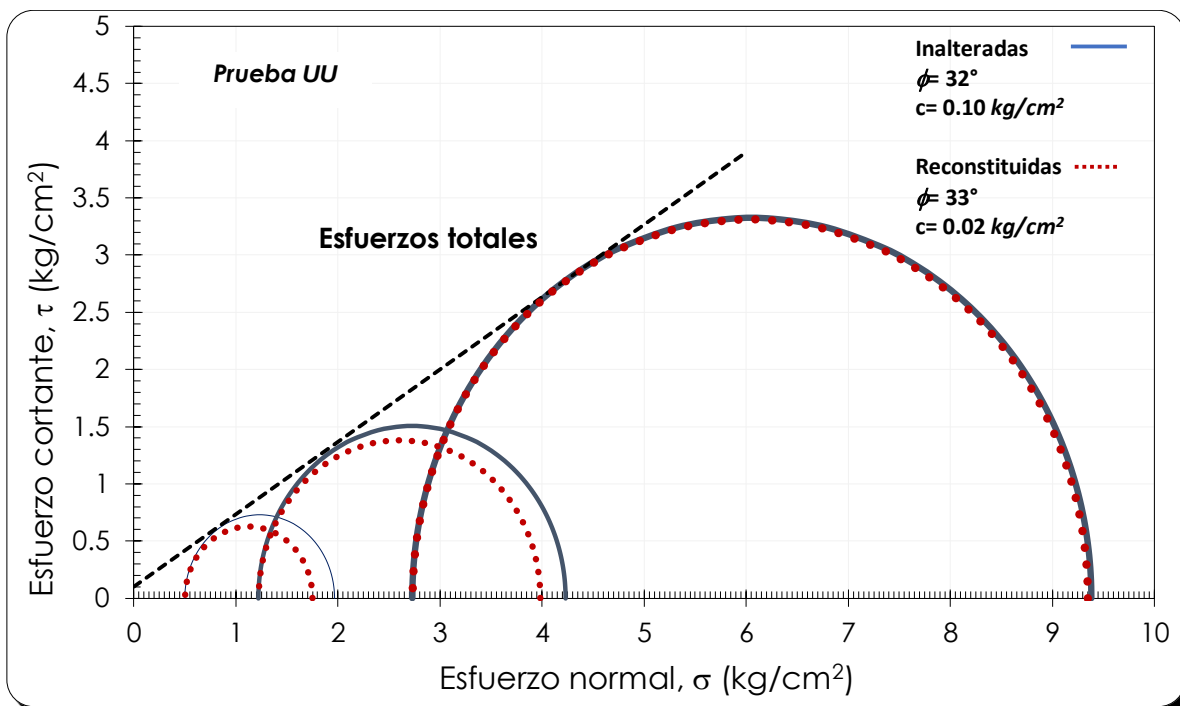


Figura A.10 Círculos de Mohr, Serie 6

Anexo C

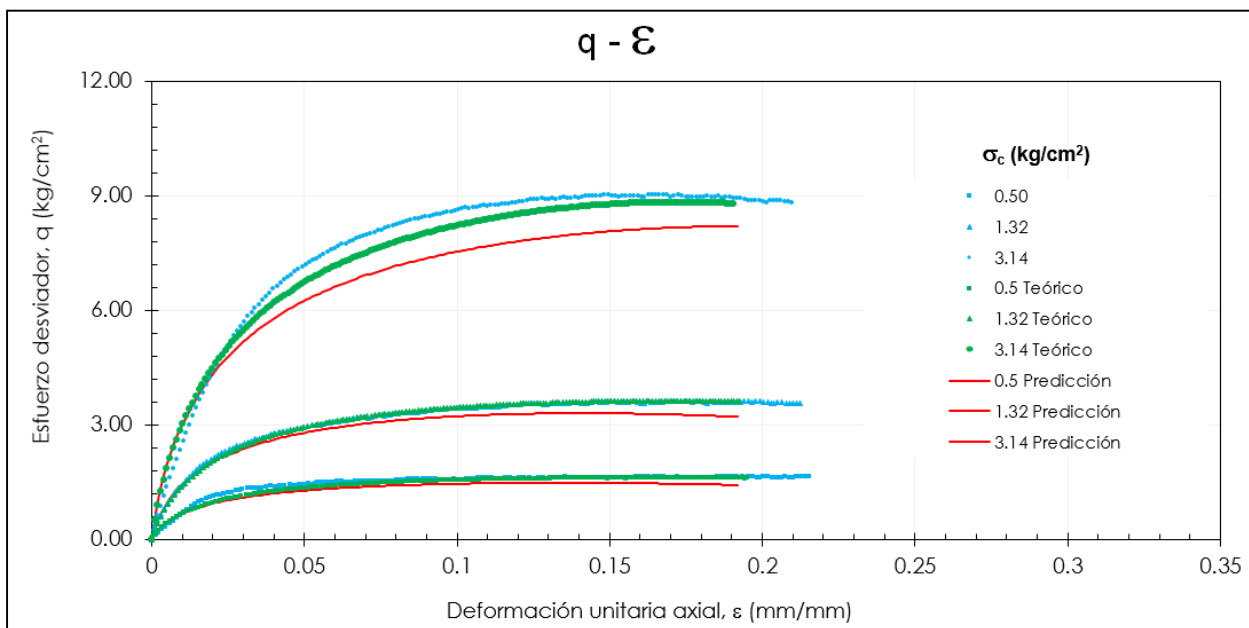


Figura A.11 Curvas experimentales, teóricas y predictivas, muestra inalterada, Serie 5

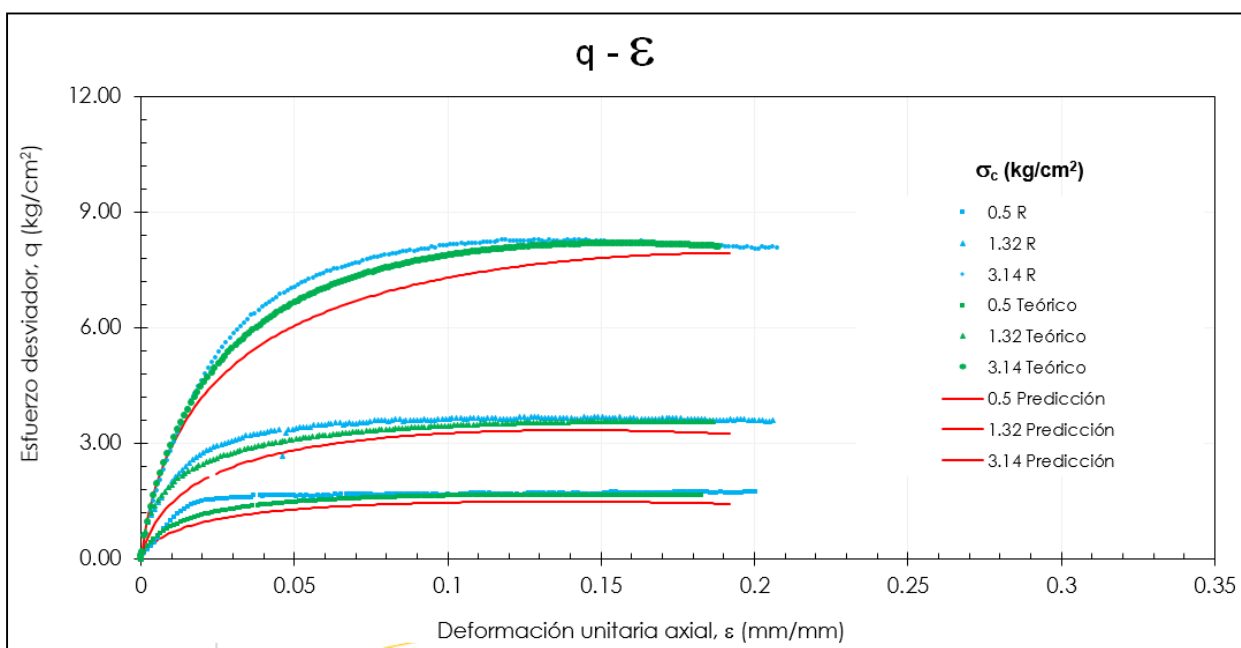


Figura A.12 Curvas experimentales, teóricas y predictivas, muestra reconstituida, Serie 5

