



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

**CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS
PRUEBAS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN TRIAXIAL**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
EN GEOTECNIA**

Presenta:

ALFREDO LÓPEZ HERNÁNDEZ

Asesor de tesis:

M.I. Araceli Aguilar Mora

Coasesor de tesis:

M.I. Enrique Octavio Linares Saldaña

Puebla, Pue.

Agosto 2019



Oficio No. 1806/2018

C. Alfredo López Hernández

Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Geotecnia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Correlación entre los parámetros mecánicos de las pruebas de corte directo y compresión triaxial**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia. Asignándose como Director al M.I. Araceli Aguilar Mora y Director Externo M.I. Enrique Octavio Linares Saldaña.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, junio 27 de 2018.


M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. M.I. Araceli Aguilar Mora y M.I. Enrique Octavio Linares Saldaña M.I. Director y Director Externo del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/AAM/sco*

M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Presente

Por este medio le informo que después de haber revisado y solicitado las correcciones pertinentes relacionadas a la tesis **"CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS PRUEBAS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN TRIAXIAL"** elaborada por el Ing. Alfredo López Hernández para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia, no existe inconveniente alguno en autorizar la impresión de la misma.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 9 de agosto de 2019



M. I. Araceli Aguilar Mora
Asesora de tesis

c.c.p. Interesado
c.c.p. Archivo

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

P R E S E N T E

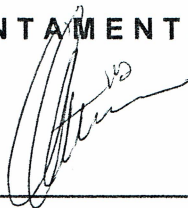
Por medio de la presente informo que la tesis autorizada en el Oficio No. 1806/2018 con el tema titulado: **“CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE LAS PRUEBAS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN TRIAXIAL”**, de la cual fui asignado como codirector, ha sido concluida, alcanzando y cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados inicialmente.

Por lo anterior no tengo inconveniente en que el **ING. ALFREDO LÓPEZ HERNÁNDEZ**, con número de matrícula: **217470324**, prosiga con los trámites de titulación pertinentes para la obtención del grado de Maestría en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su atención, quedo de Usted.

H. Puebla de Zaragoza a 08 de agosto de 2019

ATENTAMENTE



M.I. ENRIQUE OCTAVIO LINARES SALDAÑA

DEDICATORIA

A Adelina Hernández Altuzar que ya no pudo verme.

A mis padres, Alfredo López Mazariegos y Clara Hernández Altuzar, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy y por su amor incondicional y confianza.

A mis hermanos, Julio C. López Hernández, Sonia López Hernández y Alexis López Hernández por apoyarme en todo lo que he hecho.

A mi novia, Ursula Hernández Paredes que me enseñó a ver las cosas desde diferentes perspectivas.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por permitirme desarrollar mi formación académica en esta institución.

A la M. I. Araceli Aguilar Mora y al M. I. Enrique Octavio Linares Saldaña por toda su paciencia, apoyo y enseñanza durante la realización de este trabajo.

Al personal del área de geotecnia del laboratorio integral de la FI-BUAP, el M. I. Alejandro Hernández Ramos y el M. I. Ricardo J. Barrón Morales.

A los revisores de tesis, el M. I. Miguel Ángel Figueras Corte y el M. I. Julio Misraím Cabrera Suriano.

A las alumnas de servicio social, Ursula Hernández Paredes, Maleny D. Rodríguez Neri y Olivia A. López Ponce, que me ayudaron con el trabajo pesado.

Al Ing. Honorio Guevara Brunel, al Ing. Gerardo Ángel Cereceda Maldonado y a ANALISEC, por haber donado la mayor parte de las muestras que se usaron durante la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	v
OBJETIVOS	v
JUSTIFICACIÓN	vi
ALCANCES	vii
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Principales equipos para determinar la resistencia al corte	8
1.2.1 Equipo de corte directo	8
1.2.2 Cámara de compresión triaxial	10
CAPÍTULO 2. SUELOS A ENSAYAR	12
2.1 Selección de muestras	12
2.2 Localización de las muestras	14
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ENSAYO	16
3.1 Prueba de corte directo	16
3.1.1 Labrado de las probetas de ensaye	16
3.1.2 Montaje de la caja de corte y colocación de la muestra	17
3.1.3 Ejecución de la prueba	20
3.2 Prueba de compresión triaxial UU	23
3.2.1 Labrado de las probetas de ensaye	23
3.2.2 Montaje de la muestra y ensamble de la cámara	24
3.2.3 Llenado de la cámara y ejecución de la prueba	26
CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
4.1 Resultados obtenidos	28
4.2 Correlaciones obtenidas	29
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El empleo de los ensayos de compresión triaxial para la obtención de los parámetros mecánicos del suelo (cohesión y ángulo de fricción) es muy común, debido a la confiabilidad de los datos que proporciona la prueba, sin embargo, presenta algunos inconvenientes para llevar a cabo su ejecución; sin embargo, Bowles (1986) advierte los siguientes: 1) el procedimiento de ensayo es difícil de ejecutar e interpretar, 2) se requiere la presencia continua de un operador para efectuarlo y 3) el tiempo para efectuar la variante consolidada no drenada (CU) y consolidada drenada (CD) es demasiado largo, debido a que la saturación y drenado de las probetas es muy lento.

De acuerdo con lo anterior, como alternativa para la obtención de los parámetros antes comentados muchos ingenieros optan por la prueba de corte directo, la cual presenta menos complicaciones para su realización, por lo que se plantea la siguiente pregunta: ¿Existe una expresión matemática que permita correlacionar los parámetros mecánicos de resistencia obtenidos en el ensaye de corte directo, con los del ensaye triaxial no consolidada no drenada (UU)?

La presente tesis tiene por objetivo responder a dicho cuestionamiento buscando establecer una relación válida en función de los resultados obtenidos de los ensayos de compresión triaxial y de corte directo UU.

OBJETIVOS

- a) Determinar una ecuación que permita correlacionar los parámetros mecánicos de resistencia obtenidos en el ensaye de corte directo con los del ensaye de compresión triaxial tipo UU.
- b) Habilitar y poner en funcionamiento el equipo de corte directo en el laboratorio integral de la Facultad de Ingeniería de la BUAP.

- c) Analizar el comportamiento de los suelos sometidos a estos tipos de ensayos, en función de sus propiedades índice.
- d) Realizar ensayos de compresión triaxial y corte directo UU a las muestras de suelo, con el fin de realizar una comparativa entre los resultados encontrados a partir de cada prueba.

JUSTIFICACIÓN

Los parámetros mecánicos de resistencia al esfuerzo cortante del suelo son valores que tienen especial relevancia entre las propiedades geotécnicas debido a que son indispensables para analizar y resolver problemas de estabilidad tales como: el cálculo de empujes de tierra, capacidad de carga y estabilidad de taludes (Thermann y Gau, 2006), por esta razón, la seguridad y confiabilidad de las estructuras depende directamente de la correcta obtención del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) y la cohesión (c).

Las pruebas de compresión triaxial y de corte directo son las más comunes para determinar estas propiedades en laboratorio, si bien, existen ciertas diferencias entre el ángulo de fricción aparente, ϕ , obtenido mediante un ensaye de corte directo y las pruebas de compresión triaxial, en materiales con ángulo de fricción interna mayor a 35 grados, los valores obtenidos en el ensayo de corte directo pueden diferir de 1 a 4 grados por encima de los obtenidos en el ensayo triaxial (Lee, 1979), debajo de 35 grados, el valor de ϕ es casi el mismo en ambos ensayos (Bowles, 1986). A su vez, dichos parámetros guardan una relación directa con las propiedades índice de cada material, por ello la importancia de conocer la ecuación que correlacione a ambas pruebas para un mismo tipo de suelo. Aunque, por lo general, el uso de la prueba de corte directo está enfocado al ensaye de suelos arenosos y poco cohesivos, mientras que la prueba triaxial es más inclusiva, permitiendo realizar el ensaye con cualquier tipo de suelo.

De lo antes expuesto se hace evidente la necesidad de establecer una relación directa entre ambas pruebas, con el fin de obtener resultados en el menor tiempo posible.

ALCANCES

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos, en el capítulo 1 se describe de manera general el equipo de corte directo y la cámara de compresión triaxial, a su vez se presenta el estado del arte concerniente a las investigaciones que han hecho algún aporte en la correlación de parámetros corte directo-triaxial y el procedimiento de implementación del equipo de corte directo en el laboratorio de la FI-BUAP.

Por otra parte, en el capítulo 2 se explica el criterio empleado para la selección de las muestras así como la localización general de los lugares de donde se obtuvieron dichos especímenes y las principales características geológicas de éstos.

Mientras tanto, en el capítulo 3 se presenta de manera concreta y detallada los procedimientos de medición de la resistencia al esfuerzo cortante que se realizaron a cada espécimen, así como las propiedades índice y la normativa empleada para la realización de cada ensaye.

Finalmente, en el capítulo 4 se expone de manera detallada los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados y el procedimiento de correlación que se siguió para determinar la ecuación que permite relacionar dichos valores.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

El primer trabajo en el cual trató de explicarse la resistencia de los suelos es debido al conocido físico e ingeniero francés C.A. Coulomb en el año de 1776. La primera idea consistió en atribuir a la fricción entre las partículas del suelo la resistencia al corte del mismo y extender a este orden de fenómenos las leyes que sigue la fricción entre cuerpos.

Coulomb admitió que los suelos fallan por esfuerzo cortante a lo largo de planos de deslizamiento y que esencialmente en algunos suelos la fricción rige este fenómeno, así es como nace una ley de resistencia, según la cual se produce el esfuerzo cortante actuante (*figura 1.1*),

$$s = \sigma \tan \phi \quad (\text{Ec. 1.1})$$

donde:

s = Esfuerzo cortante

σ = Esfuerzo normal

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo

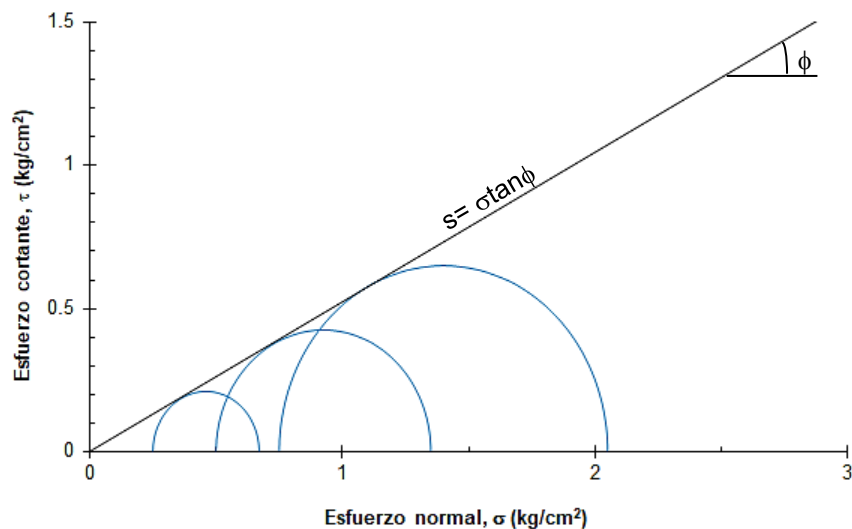


Figura 1.1. Envolvente de falla para un suelo friccionante (elaboración propia)

La constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal, $\tan \phi$, fue definida en términos de un ángulo al cual llamo “ángulo de fricción interna”, y definió como una constante del material.

A los materiales que no son regidos por la fricción, Coulomb les asignó otra fuente de resistencia al corte, a la cual llamó “cohesión” y la consideró también como una constante en los materiales (*figura 1.2*). La ley de Resistencia de estos suelos será:

$$s = c \quad (\text{Ec. 1.2})$$

donde:

c = Cohesión del suelo

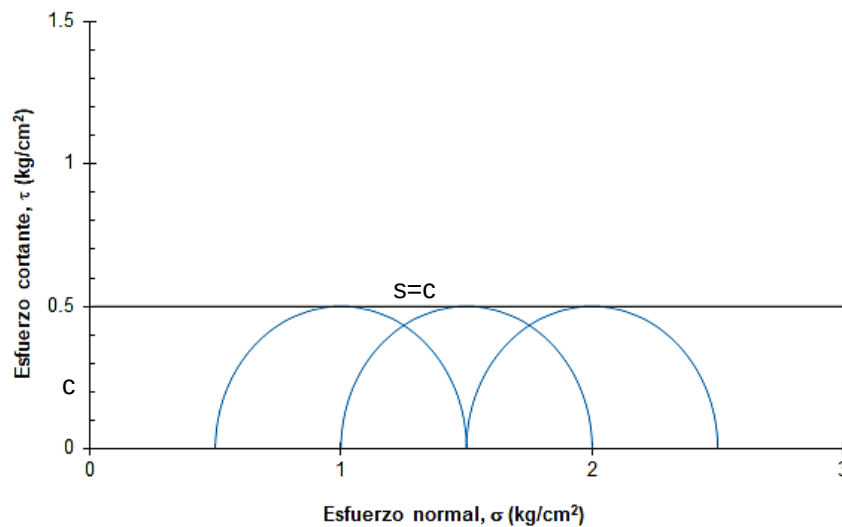


Figura 1.2. Envolvente de falla para un suelo cohesivo (elaboración propia)

En general, según Coulomb, los suelos presentan características de resistencia mixtas, por lo que decidió asignar una ley de resistencia más general que representara ambas propiedades (*figura 1.3*). Esta ecuación, tradicionalmente es conocida con el nombre de Ley de Coulomb:

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{Ec. 1.3})$$

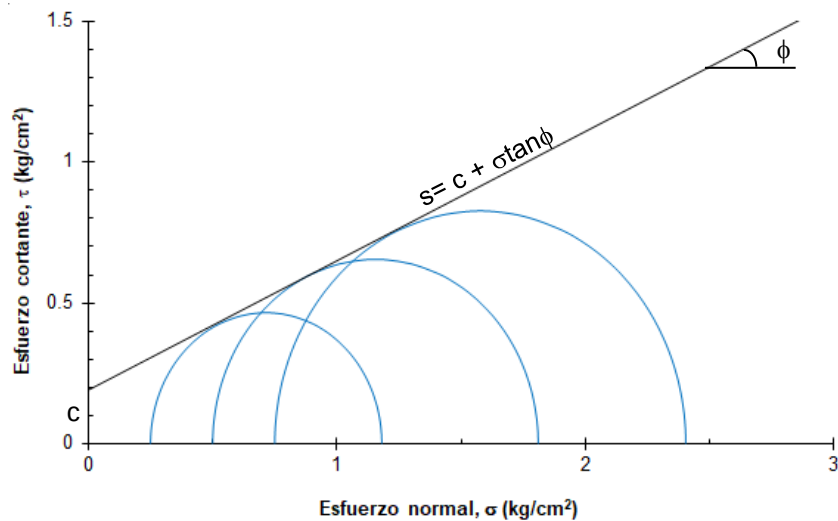


Figura 1.3. Envolvente de falla para un suelo cohesivo-friccionante (elaboración propia)

Ahora bien, una vez conocidas las propiedades principales sobre las cuales se rige la resistencia al esfuerzo cortante, el ángulo de fricción interna y la cohesión, entonces ¿cómo poder determinar sus valores?

El equipo de corte directo fue usado por primera vez en 1847 por Alexandre Collin en una serie de estudios de estabilidad de taludes (Skempton, 1949), y a su vez se atribuye a Arthur Casagrande la idea de utilizar un aparato triaxial para medir la resistencia al corte de los suelos (Wilson et al., 1982), ambos dispositivos se han usado desde hace más de 100 años para determinar los parámetros mecánicos de resistencia al cortante (Saada y Townsend, 1981). Por otra parte, es importante mencionar que los equipos tienen marcadas diferencias en cuanto a la aplicación de esfuerzos en las muestras, de las cuales, las principales son: 1) los esfuerzos en las condiciones de frontera, 2) la orientación de los planos de falla y 3) la orientación de los esfuerzos principales (Terzaghi y Peck, 1948).

A partir de lo descrito anteriormente, se realizó una revisión bibliográfica para localizar las comparaciones previas de la resistencia al corte obtenida utilizando los aparatos de compresión triaxial y de corte directo. A continuación se presentan

cronológicamente los principales estudios que han tenido como propósito comparar los parámetros mecánicos del suelo obtenidos por estos métodos de ensayo:

Nash (1953) encontró que, para una arena fina de río en un estado muy suelto, el ángulo de fricción en la prueba de corte directo es aproximadamente 2 grados menor que el calculado con el ensayo de compresión triaxial CD, mientras que, para un estado denso, los resultados triaxiales CD fueron de 2 a 5 grados más bajos comparados con los proporcionados por el corte directo, y finalmente para una densidad media, los resultados de las dos pruebas fueron virtualmente idénticos.

Por su parte, Bishop (1954), en una carta para la revista *Géotechnique* estableció que el ángulo de fricción interna hallado con la caja de corte directo, para arenas, es de 2 a 7 grados más grande que el calculado por medio de pruebas de compresión triaxial.

En su cuarto reporte de investigación de las características de resistencia y esfuerzo-deformación de arcillas compactas para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, Casagrande y Poulos (1964) encontraron la misma envolvente de resistencia al corte en las pruebas de compresión triaxial CD y de corte directo realizadas en muestras compactadas de una arcilla de baja plasticidad.

A su vez, Skempton (1964), en su investigación: "*Long-term stability of clay slopes*" indicó que se consiguieron los mismos parámetros efectivos de resistencia al esfuerzo cortante a partir de las pruebas realizadas en ocho especímenes de una arcilla de Boulder, Colorado, utilizando los dispositivos de corte directo y cámara triaxial.

En el artículo titulado "*The shear strength of silt*", Schultze y Horn (1966), concluyeron que el ángulo de fricción efectivo de las pruebas de corte directo CD ($\phi' = 32.5^\circ$) es apreciablemente menor que el resultante de la prueba de compresión triaxial CD ($\phi' = 36.2^\circ$), para un limo con 10% de contenido de arcilla.

Thomson y Kjartanson (1985) realizaron pruebas de corte directo CD y pruebas triaxiales CD y CU en muestras no alteradas de una arcilla arenosa y una arcilla de alta

plasticidad y encontraron que los resultados coincidieron en la misma envolvente de falla.

Maccarini (1993) realizó ensayos de corte directo CD y compresión triaxial CD en un suelo residual de Río de Janeiro. Para estas pruebas, los especímenes de prueba se orientaron de modo que el plano de falla en ambos equipos coincidiera con la dirección de estratificación del suelo con ángulo de inmersión de 25 grados. Con base en los resultados presentados, el autor concluye que se tienen valores similares de cohesión, esfuerzo efectivo y ángulo de fricción de ambas pruebas si se toma en cuenta la estratificación.

Rosales (2007), en su trabajo denominado: “Variación de la cohesión y el ángulo de fricción interna obtenidos por los ensayos de corte directo y triaxial con materiales granulares y arcillosos” con base en el estudio realizado a tres materiales de la región de Guatemala, obtuvo la siguiente relación:

$$C_T = 3.196C_{DS} - 123.97 \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$\phi_T = 1.357\phi_{DS} - 28.210 \quad \text{Ec. 1.5}$$

donde:

C_T = Cohesión de la prueba triaxial

C_{DS} = Cohesión obtenida por el ensayo de corte directo

ϕ_T = Ángulo de fricción de la prueba triaxial

ϕ_{DS} = Ángulo de fricción obtenido por el ensaye de corte directo

Por otro lado, Durán y Quesada (2010), en la tesis “Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión simple para arenas limosas”, encontraron a partir de 90 muestras analizadas la siguiente ecuación que relaciona la compresión inconfiada y el ángulo de fricción interna del suelo:

$$\phi = 0.986 q_u^2 - 822.831q_u + 166.420 \quad \text{Ec. 1.6}$$

donde:

q_u = Compresión inconfiada

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo

Asimismo, Díaz y Villamizar (2010), en la tesis: “Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión simple para arenas arcillosas”, únicamente para el suelo estudiado, se encontró una relación entre el ángulo de fricción interno (ϕ) y la resistencia a la compresión axial simple (q_u), la cual obedece al comportamiento de un polinomio de segundo grado, el cual se encuentra regido por la ecuación: $\phi = -0.525 q_u^2 + 8.893 q_u + 11.460$.

En la tesis “Comparación de los parámetros de resistencia al corte obtenidos en los ensayos de corte directo y triaxial de una arena arcillosa”, Peña y Pérez (2012), determinan que el ángulo de fricción interna del suelo en los ensayos triaxiales es dos veces más grande que el proporcionado por las pruebas de corte directo, en lo que respecta a la cohesión se reportó que es cinco veces más grande el valor dado por la prueba triaxial respecto al encontrado con corte directo.

Rincón y Suárez (2012), por otro lado, determinaron que el ángulo de fricción interna del suelo obtenido por el ensaye triaxial es 1.76 veces más grande que el arrojado por corte directo, en lo que respecta a la cohesión se reportó que es 2.10 veces más grande el valor en la prueba de compresión triaxial en relación al resultado del ensaye de corte directo, lo anterior se puede consultar en la tesis “Comparación de parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en el aparato de corte directo y triaxial para arenas limosas”.

En el estudio presentado por Castellanos y Brandon (2013), titulado “*A comparison between the shear strength measured with direct shear and triaxial devices on undisturbed and remolded soils*” hallaron que para materiales aluviales de la región de Nueva Orleans, EE. UU., el ángulo de fricción encontrado por medio del equipo de corte directo resulta de dos a cinco grados más pequeño que el encontrado con la cámara triaxial.

En la tesis titulada: “Correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo y el ensayo de triaxial en un suelo arcilloso típico de la zona Occidental de Bogotá”, Cometa y Méndez (2016), llegaron a las siguientes ecuaciones de correlación:

$$C_T = 0.6912C_{DS} + 0.0383 \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$\phi_T = 1.1899\phi_{DS} - 8.522 \quad \text{Ec. 1.8}$$

donde:

C_T = Cohesión de la prueba triaxial

C_{DS} = Cohesión obtenida por el ensayo de corte directo

ϕ_T = Ángulo de fricción de la prueba triaxial y

ϕ_{DS} = Ángulo de fricción obtenido por el ensayo de corte directo

Dev et al. (2016), basándose en los resultados obtenidos en una serie de ensayos de corte directo y compresión triaxial en suelos de grano fino y arena bajo condiciones consolidadas drenadas, observaron que el ángulo de fricción interna en los ensayos triaxiales es de uno a ocho grados más grande que los hallados con la prueba de corte directo para suelos de grano fino, mientras que para el caso de las arenas ocurre lo contrario, el ángulo de fricción interna por corte directo es 2.5 grados menor que el de la compresión triaxial.

Por último, Mendivil y Saavedra (2016), en su trabajo nombrado: “Correlación entre los métodos de compresión confinada y corte directo en suelos cohesivos, del sector el rodeo en Cartagena”, concluyó que no es técnicamente viable ni recomendable establecer una correlación con muestras reconstituidas ya que la dispersión existente entre los diferentes valores es muy grande debido al alto grado de alteración existente en los especímenes remoldeados.

De los resultados expuestos anteriormente, se puede observar que la información disponible en la literatura técnica se enfoca en ver si estos dos dispositivos proporcionarán los mismos valores de resistencia al esfuerzo cortante o no. Cabe

mencionar que las investigaciones que obtuvieron alguna correlación en los resultados no indicaron si los suelos ensayados presentaron un plano de falla en particular o alguna estratificación que pudiese haber influido en los resultados obtenidos.

1.2 Principales equipos para determinar la resistencia al corte

1.2.1 Equipo de corte directo

El primer dispositivo para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos es la caja de corte directo. la cual consiste en un dispositivo metálico con forma de cofre de forma cuadrada estándar de 60 mm x 60 mm o bien de forma circular de 50 mm de diámetro, la cual se encuentra dividida por la mitad (*figura 1.4*)

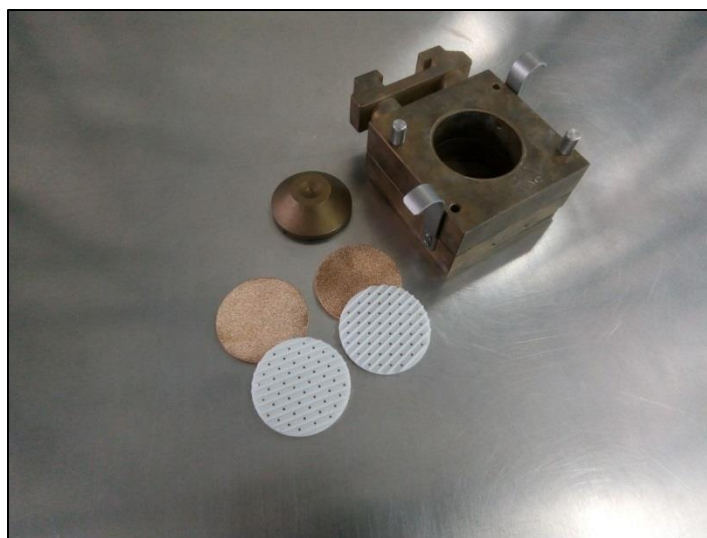


Fig. 1.4. Caja de corte directo de Laboratorio Integral de la FI-BUAP

Para realizar este ensayo, el espécimen de suelo se coloca entre dos placas distribuidoras de cortante y dos piedras porosas, y a continuación se aplica una carga vertical de magnitud tal que permita reproducir las condiciones de esfuerzo a las que estará sometida dicha muestra en su entorno natural. Después el espécimen se somete a la acción del corte mediante una fuerza horizontal aplicada a una velocidad de deformación constante hasta que el suelo se rompe a lo largo del plano entre los dos elementos de la caja (*figura 1.5*).

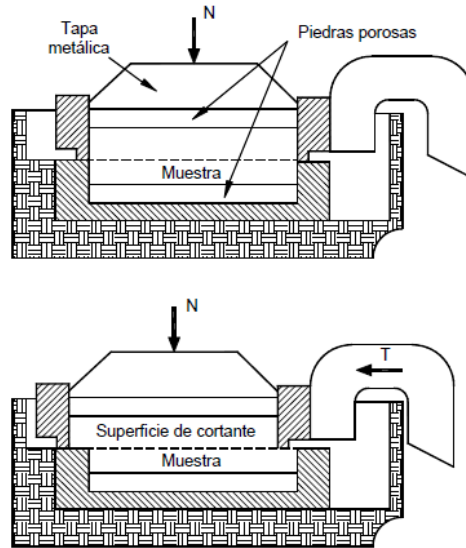


Fig. 1.5. Movimiento de las dos mitades de la caja en el ensayo de corte directo (Cornforth, 2005)

Como parte de ésta investigación se dará uso al equipo de corte directo que se encuentra en el Laboratorio Integral de la Facultad de Ingeniería de la BUAP (figura 1.7), el cual se encuentra inactivo desde su adquisición, por lo que se tiene por objetivo implementar su uso.



Fig. 1.7. Equipo de corte directo del Laboratorio Integral de la FI-BUAP

1.2.2 Cámara de compresión triaxial

Las pruebas de compresión triaxial son mucho más refinadas que las de corte directo y en la actualidad son, con mucho, las más usadas en cualquier laboratorio. De la misma manera que el ensayo de corte directo, su finalidad es obtener parámetros del suelo y la relación esfuerzo-deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante. Es un ensayo complejo, pero la información que proporciona es la más representativa de todas las pruebas para la determinación del esfuerzo cortante, debido a que por su versatilidad permite simular de manera más exacta las condiciones a las que se encuentra sometida la muestra de suelo *in situ*.

El ensayo consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, que se introduce en una cámara especial (*figura 1.8*) y se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección. Alcanzado ese estado de equilibrio, se aumenta la presión normal o axial (σ_1), sin modificar la presión lateral aplicada (σ_3), hasta que se produce la falla.

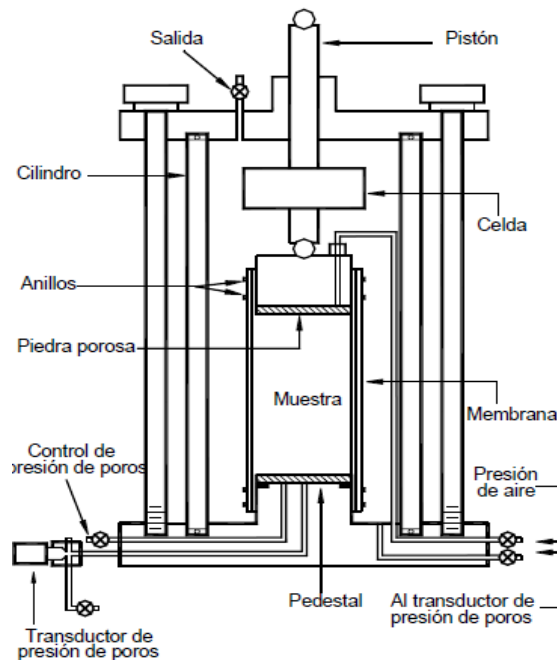


Fig. 1.8. Detalle de una celda para ensayo de compresión triaxial (Cornforth, 2005)

Realizando por lo menos tres pruebas, con presiones de confinamiento diferentes, en un gráfico siguiendo el criterio de Mohr-Coulomb se dibujan los círculos que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y trazando una tangente o envolvente a éstos, se determinan los parámetros ϕ y c del suelo. Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en que este trabajará, las alternativas para realizar el ensayo serán: consolidado no drenado (CU), no consolidado no drenado (UU) o consolidado drenado (CD).

Es importante aclarar que las pruebas de compresión triaxial concernientes a esta tesis se llevaran a cabo en el laboratorio de geotecnia de la FI-BUAP el cual fue puesto en marcha como parte del trabajo de tesis “Instalación e instrumentación del laboratorio de geotecnia (FI-BUAP)” realizado por Vega Báez (2005).



Fig. 1.6. Cámara de compresión triaxial del Laboratorio Integral de la FI-BUAP

CAPÍTULO 2. SUELOS A ENSAYAR

2.1 Selección de muestras

La determinación precisa de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante es esencial para un correcto análisis geotécnico; sin embargo, dichos valores dependen de muchos factores, especialmente de la calidad de las muestras, su tamaño y el método de análisis. Para este trabajo de tesis, los ensayos se realizaron en probetas de suelo labradas de muestras cúbicas inalteradas, de aproximadamente 40 cm por lado, obtenidas de pozos a cielo abierto lo suficientemente grandes para evitar los efectos de borde, la mayoría de las cuales fueron donadas por las empresas SICC y ROCCA las cuales se encuentran en la ciudad de Puebla.

En la tabla 2.1 se resumen las principales características físicas de los suelos ensayados, los cuales son representativos de las cuatro regiones de la carta de plasticidad, de aquí se obtiene entonces que las conclusiones que se deriven de esta tesis sean de alcance general.

Tabla 2.1. Características físicas de las muestras ensayadas

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Límite líquido (%W _L)	Límite plástico (%W _P)	Índice plástico (%IP)	Clasificación SUCS
M-1	5.77	41.55	52.68	30.55	14.73	15.82	CL
M-2	2.02	58.54	39.44	25.67	23.90	1.77	SM
M-3	0.00	2.20	97.80	67.64	44.10	23.54	MH
M-4	0.00	2.50	97.50	68.24	41.87	26.37	MH
M-5	0.00	1.70	98.30	62.41	25.30	37.11	CH
M-6	0.00	22.30	77.70	47.31	21.24	26.07	CL
M-7	0.00	44.90	55.10	32.37	21.05	11.32	SM
M-8	5.17	51.10	43.73	27.02	15.15	11.87	SC
M-9	0.00	3.70	96.30	43.06	24.15	18.91	CL
M-10	0.00	7.80	92.20	66.59	31.40	35.19	CH
M-11	0.00	1.10	98.90	55.33	33.33	22.00	MH
M-12	0.00	10.10	89.90	39.48	20.63	18.85	CL
M-13	5.32	52.05	42.63	25.07	23.02	2.05	SM
M-14	0.00	58.44	41.56	28.62	12.23	16.39	SC
M-15	0.00	79.30	20.70	38.72	21.75	16.97	CL
M-16	0.00	64.77	35.23	40.80	23.26	17.54	SC
M-17	0.00	20.32	79.68	24.55	12.23	12.32	CL

Tabla 2.1. Características físicas de las muestras ensayadas (continuación)

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Límite líquido (% ω_L)	Límite plástico (% ω_P)	Índice plástico (%IP)	Clasificación SUCS
M-18	0.00	15.07	52.48	29.56	14.40	15.16	CL
M-19	6.63	40.89	52.48	28.95	25.00	3.95	ML
M-20	0.00	31.80	68.20	40.89	21.59	19.30	CL
M-21	0.00	12.90	87.10	36.85	22.00	14.85	CL
M-22	0.00	87.00	13.00	22.55	20.43	2.12	SM
M-23	0.00	90.00	10.00	24.85	22.26	2.59	SP-SM
M-24	0.00	4.00	96.00	30.94	29.69	1.25	ML
M-25	0.00	70.48	29.52	24.39	21.87	2.52	SM
M-26	0.79	64.83	34.38	26.17	22.20	3.97	SM
M-27	0.00	35.85	64.15	27.14	23.66	3.48	ML
M-28	0.37	16.53	83.10	50.47	26.05	24.42	CH
M-29	0.08	70.65	29.27	27.24	23.47	3.77	SM
M-30	0.00	15.23	84.77	39.17	21.92	17.25	CL
M-31	0.00	31.84	68.16	35.28	18.37	16.91	CL
M-32	0.00	59.28	40.72	39.10	23.23	15.87	SC
M-33	0.00	14.05	85.95	57.24	42.42	14.82	MH
M-34	0.00	15.13	84.87	52.20	27.10	23.10	CH
M-35	0.00	9.74	90.26	66.49	19.05	47.44	CH
M-36	0.00	54.68	45.32	26.20	23.29	2.91	SM
M-37	0.00	31.64	68.36	27.52	16.67	10.85	CL
M-38	0.00	34.33	65.67	25.39	23.68	1.71	ML
M-39	1.91	27.05	71.04	27.96	25.00	2.96	ML
M-40	0.00	0.95	99.05	59.47	36.67	22.80	MH
M-41	0.00	47.99	52.01	24.02	15.84	8.18	CL
M-42	0.00	42.03	57.97	34.73	18.18	16.55	CL
M-43	0.00	13.27	86.73	60.98	35.29	25.69	MH
M-44	0.00	7.53	92.47	72.38	39.02	33.36	MH
M-45	0.00	1.72	98.28	52.81	22.84	29.97	CH
M-46	0.00	1.35	98.65	43.45	18.40	25.05	CL
M-47	0.00	1.40	98.60	42.93	20.82	22.11	CL
M-48	0.00	1.03	98.97	47.15	20.62	26.53	CL
M-49	0.00	1.40	98.60	57.10	20.62	36.48	CH
M-50	0.00	1.22	98.78	40.13	19.06	21.07	CL
M-51	0.00	1.95	98.05	51.14	25.61	25.53	CH
M-52	0.00	10.30	89.70	37.46	18.43	19.03	CL
M-53	0.00	1.61	98.39	47.47	21.98	25.49	CL
M-54	0.00	1.49	98.51	46.79	19.59	27.20	CL
M-55	0.00	2.75	97.25	56.11	23.37	32.74	CH
M-56	0.00	1.83	98.17	44.97	21.25	23.72	CL
M-57	0.00	1.47	98.53	58.15	22.47	35.68	CH
M-58	0.00	0.75	99.25	49.37	23.70	25.67	CL
M-59	0.00	39.93	60.07	35.17	21.67	13.50	CL
M-60	0.00	14.57	85.43	34.16	21.90	12.26	CL

2.2 Localización de las muestras

Por motivos de confidencialidad de algunas muestras que fueron donadas, no se utilizará la localización exacta de dónde se obtuvieron, sin embargo se mencionará de manera general la zona de muestreo y el tipo de muestreo utilizado. En la tabla 2.2 se recopila dicha información.

Tabla 2.2. Localización de las muestras ensayadas

Localización	Muestra	Principales características geológicas
Chalco, Edo. de México	9	Presenta un suelo cubierto en un 70% de rocas volcánicas del Mioceno con depósitos de ceniza y arena, así como de depósitos fluviales y lacustres producidos por el vulcanismo.
	10	
	11	
	12	
Oaxaca, Oaxaca	1	Consiste en rocas metamórficas, volcánicas y sedimentarias. Las rocas metamórficas son las más antiguas, pues datan de la Era Precámbrica y están representadas por el gneis. Las rocas volcánicas son de formación más reciente y fueron originadas por la actividad ígnea extrusiva ocurrida en el Período Terciario, particularmente en el Oligoceno y Mioceno de Era Cenozoica. Las rocas características de este período geológico son las andesitas y tobas ácidas. Las rocas sedimentarias presentan mayor variedad, ya que están representadas por calizas, lutitas, areniscas y conglomerados, las cuales aparecieron en la Era mesozoica. De todas las rocas existentes descritas en la región, las metamórficas son las más importantes por ocupar la mayor extensión.
	2	
	6	
	16	
	17	
	32	
	33	
Puebla, Puebla	34	Se encuentran presentes diversos afloramientos de rocas ígneas y sedimentarias, así como depósitos de suelos tobáceos, aluviales y lacustres. Las rocas que lo constituyen son principalmente volcánicas del Cenozoico. La unidad base del paquete volcánico, característico de la provincia, está constituida por rocas andesíticas y basálticas que sobreyacen discordantemente a rocas sedimentarias del Mesozoico, las cuales se encuentran cubiertas por rocas ácidas, ignimbritas, tobas y ceniza volcánica del Terciario Superior y Cuaternario.
	13	
	14	
	18	
	19	
	22	
	25	
	27	
	26	
	29	
	36	
	38	
	39	

Tabla 2.2. Localización de las muestras ensayadas (continuación)

Localización	Muestra	Principales características geológicas
San Andrés Cholula, Puebla	15	Presenta depósitos vulcanoclásticos de diferentes
	20	granulometrías abarcando desde bloques, bombas,
	21	arenas y cenizas, sobresaliendo un sistema de
	30	lomeríos bajos orientados sensiblemente de norte a
	31	sur, constituidos de vulcanoclastos empacados en
	37	arenas tobáceas en estado firme, mostrando una
	41	coloración café claro en la parte superior intemperizada
	42	y castaño amarillento a gris oscuro en la parte sana,
	28	observando este comportamiento en los afloramientos
Tuxpan, Veracruz	35	descritos en campo.
	45	Se encuentra sobre las estribaciones de la Huasteca,
	46	que se compone de rocas sedimentarias detríticas del
	47	Terciario, depositadas en la Cuenca Tampico-Misantla.
	48	En algunas áreas dichas unidades se encuentran
	49	cubiertas por rocas volcánicas del Cenozoico Superior.
	50	Las rocas más antiguas en esta región son las del
	51	Cretácico Superior, en tanto que las más recientes son
	52	depósitos de suelos, formados por materiales detríticos
	53	derivados de las rocas preexistentes. El Oligoceno está
	54	constituido por la secuencia de lutitas y areniscas en un
	55	ambiente marino de aguas marginales a profundas. Las
Villahermosa, Tabasco	56	lutitas a veces son arenosas, con coloración gris claro
	57	a gris obscuro. Las areniscas son de textura que va de
	58	grano medio a fino, en algunos lugares son arcillosas y
	59	ocasionalmente muestran huellas de oleaje.
	60	
Villahermosa, Tabasco	23	Los depósitos más antiguos son del Terciario Inferior (Paleoceno) y aparecen en los bordes de contacto con la provincia Sierras de Chiapas y Guatemala. Estos depósitos son de alternancia rítmica de capas clásticas (lutitas-areniscas), y sobreyacen concordantemente sobre rocas carbonatadas del Cretácico Superior. Sobre los depósitos anteriores aparecen alternancias de capas clásticas discordantes (areniscas, lutitas, limolitas y conglomerados), que contienen algunas intercalaciones de caliza del Eoceno. Durante el Oligoceno se formaron depósitos discordantes de caliza de plataforma, con influencia de terrígenos.
	5	
	7	Asimismo, se despostaron alternancias de lutitas, areniscas, calizas y margas, formadas en ambiente litoral.
Xicotepec de Juárez, Puebla	3	En la zona podemos observar rocas del Mesozoico,
	4	que corresponden a rocas de origen continental y
	8	marino del Jurásico Medio y Superior, así como del
	40	Cretácico Inferior y Superior. A su vez se encuentra
	43	presencia de horizontes de arenisca, limolita,
	44	conglomerado, calizas, lutitas y margas

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ENSAYO

3.1 Prueba de corte directo

Para este apartado se siguió lo estipulado en la norma ASTM D-3080, que presenta cómo realizar un ensayo de corte directo en condición drenada y consolidada, sin embargo, en este trabajo de tesis, se realizó un ligero ajuste para poder ejecutar los ensayos en la su variante no consolidada no drenada, razón por la cual no se saturó la muestra para evitar el efecto de la consolidación de ésta.

A grandes rasgos, el ensayo de corte directo es utilizado para obtener el valor de la resistencia al corte de manera directa del suelo ensayado y es aplicable a todo tipo de suelos, teniendo limitaciones únicamente en las dimensiones de la caja de corte del equipo que se emplee y en la imposibilidad de medir el exceso de presión de poro generado al someter a un esfuerzo normal a la muestra.

El ensaye básicamente consta de tres partes principales las cuales son:

1. Labrado de probetas
2. Montaje de la caja de corte y colocación de la muestra
3. Ejecución de la prueba

3.1.1 Labrado de las probetas de ensaye

Para realizar el ensayo se requiere un mínimo de tres probetas de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura obtenidas de una muestra inalterada, por lo tanto se deben tomar todos los cuidados necesarios para mantener las condiciones naturales de ésta, incluyendo no sólo precauciones en los procedimientos de muestreo, sino también en el transporte, conservación y manipulación al momento de realizar el labrado de la probeta.

La obtención de las muestras se realiza con ayuda de un anillo de labrado el cual permite obtener especímenes con dimensiones y densidades similares (ver figura

3.1). Se debe tener en cuenta que mientras se ensaya una probeta, las restantes deben conservar su humedad natural, por lo tanto éstas deberán ser guardadas dentro de una bolsa de polietileno.



Figura 3.1. Labrado de probetas para la prueba de corte directo con ayuda de un anillo de labrado

3.1.2 Montaje de la caja de corte y colocación de la muestra

En primera instancia se ensamblan los componentes de la caja de corte respetando las consideraciones siguientes:

- a) Se debe colocar el plato de soporte dentro de la mitad inferior de la caja de corte, sobre este la piedra porosa, y finalmente la placa ranurada (ver figura 3.2), teniendo cuidado que esta última debe quedar orientada con las ranuras en su parte superior y en dirección perpendicular al desplazamiento producido por el esfuerzo cortante. Esto último es importante para poder permitir una distribución uniforme del esfuerzo cortante sobre la superficie de la muestra que se estará ensayando.

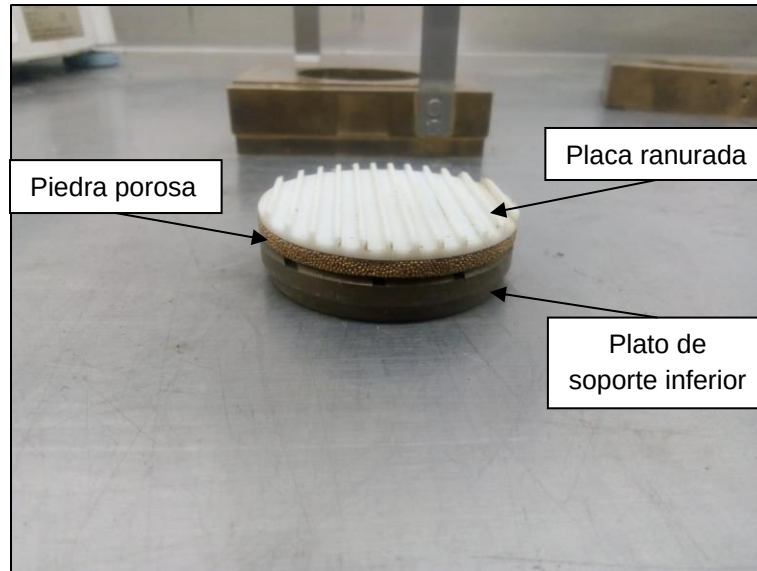


Figura 3.2. Disposición en la que deberán colocarse el plato de soporte, la piedra porosa y la placa ranurada

- b) El segundo paso consiste en fijar la parte superior de la caja de corte, con la parte inferior de la caja de corte montada, la cual debe ser asegurada con los tornillos de alineación (ver figura 3.3).

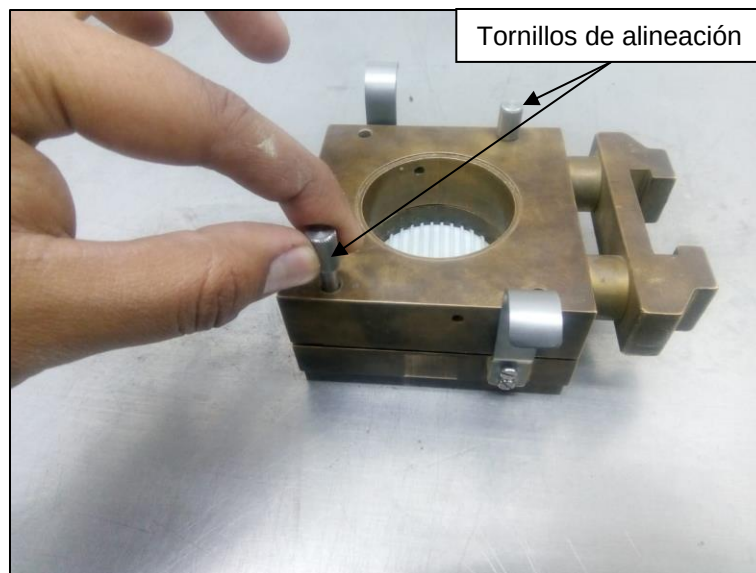


Figura 3.3. Ensamble de la caja de corte con ayuda de los tornillos de alineación

- c) Una vez ensamblada la caja de corte, a continuación se coloca la muestra dentro de la caja de corte, para lo cual se hará uso de un pisón de madera para

poder pasar la muestra del anillo de labrado a la caja de corte con sumo cuidado (ver figura 3.4).

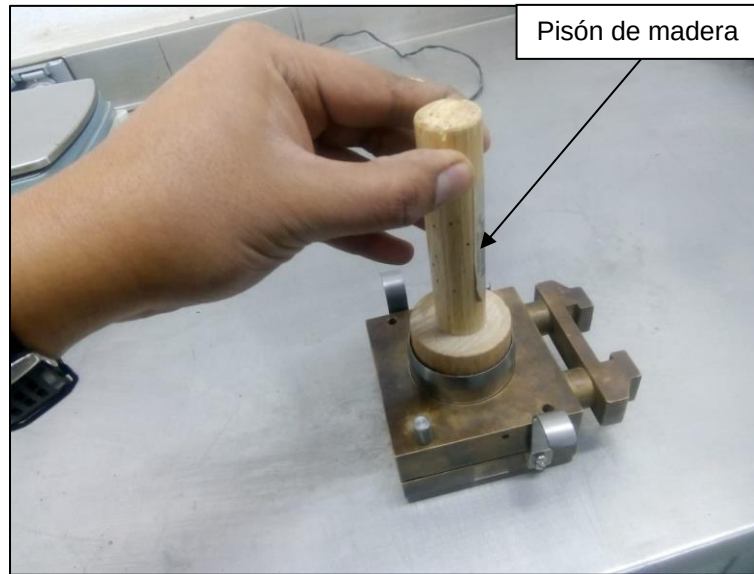


Figura 3.4. Colocación de la muestra en la caja de corte

- d) Finalmente se coloca sobre la muestra otra placa ranurada teniendo la misma consideración que para la placa ranurada inferior (las ranuras deben de estar en contacto con la muestra y deben orientarse de manera perpendicular a la dirección del desplazamiento), otra piedra porosa y la almohadilla de presión (ver figura 3.5).

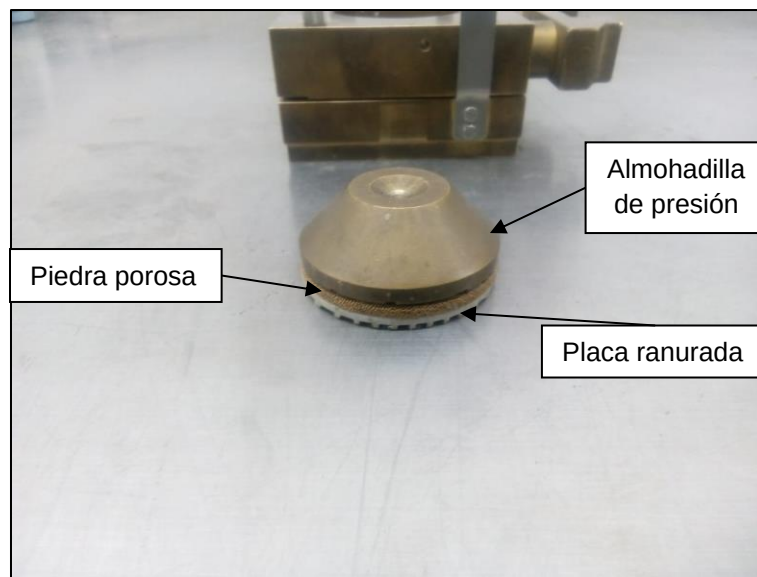


Figura 3.5. Disposición en la que deberán colocarse la placa ranurada, la piedra porosa y el cabezal

3.1.3 Ejecución de la prueba

- a) Para poder realizar la ejecución del ensayo de corte directo es necesario colocar la caja de corte dentro del carro deslizante y acoplarla al brazo del anillo de carga (ver figura 3.6).

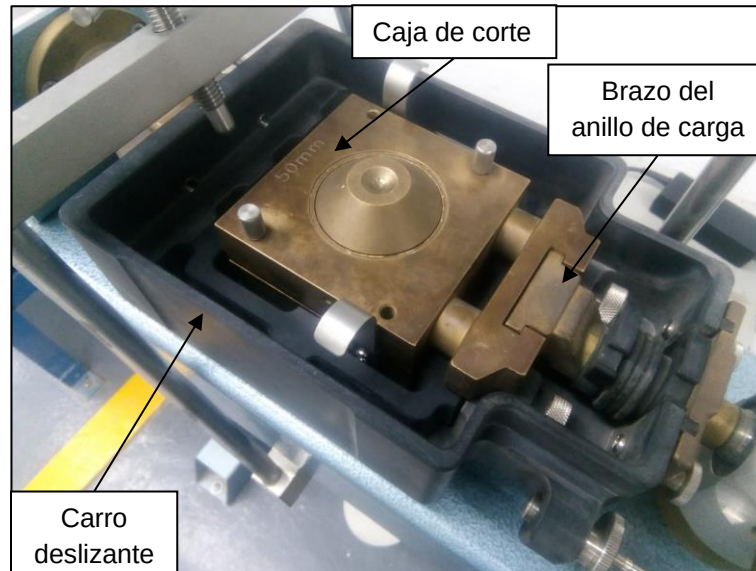


Figura 3.6. Colocación de la caja de corte dentro del carro deslizante

- b) Después se debe montar el marco de carga del suspensor estático de pesas sobre la almohadilla de presión (ver figura 3.7).

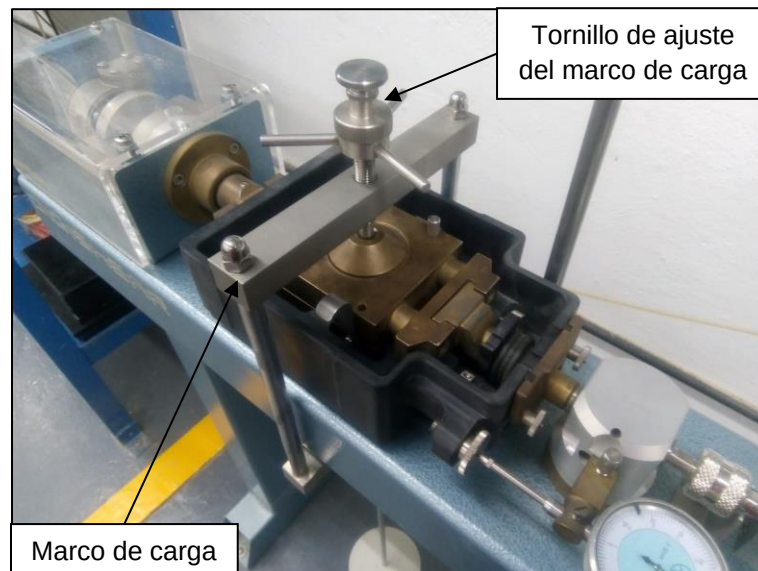


Figura 3.7. Montaje del marco de carga sobre la muestra

- c) A continuación, se deposita sobre el portapesas los contrapesos necesarios para generar el esfuerzo normal solicitado en el ensayo (ver figura 3.8).

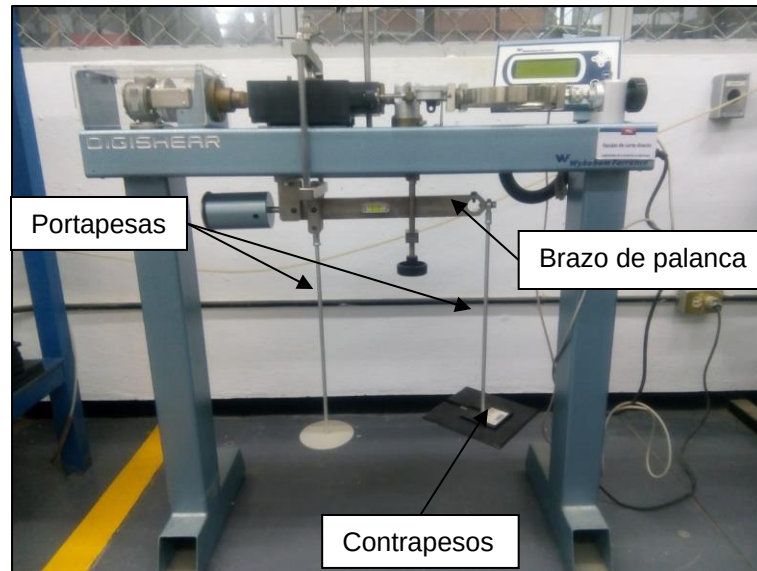


Figura 3.8. Aplicación de la carga normal a la probeta de ensayo

Es importante aclarar que si el esfuerzo normal que se desea aplicar es muy pequeño se puede hacer uso del contrapeso que se encuentra directamente debajo del marco de carga; por otra parte si el esfuerzo normal necesario es muy grande se recomienda el uso del portapesas que se encuentra al final del brazo de palanca el cual nos permitirá incrementar 10 veces el peso de la carga original colocada.

- d) Una vez colocada los contrapesos es importante revisar que el brazo de palanca se encuentre correctamente nivelado, esto se puede hacer verificando el nivel de burbuja que se encuentra acoplado a dicho brazo (ver figura 3.9), de lo contrario será necesario colocarlo a nivel con ayuda del tornillo de ajuste del marco de carga (ver figura 3.9).

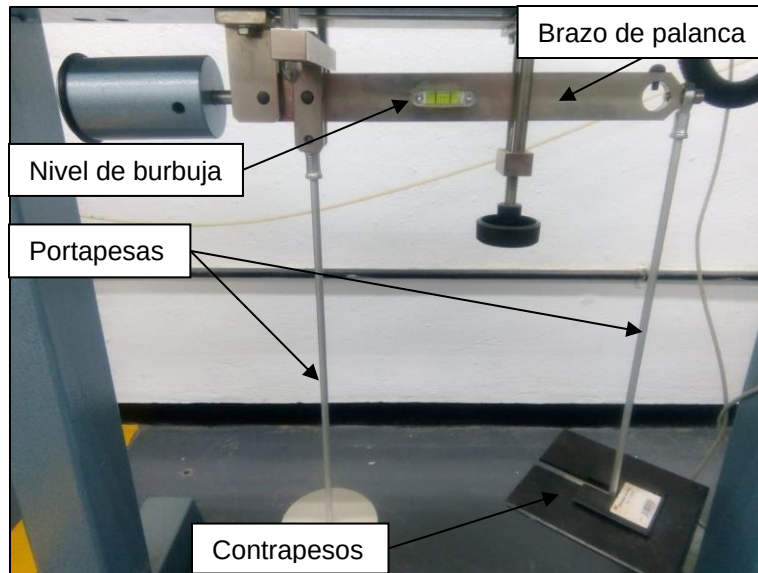


Figura 3.9. Revisión del nivel del brazo de palanca

- e) Inmediatamente, después de haber colocado los contrapesos se ajustan los micrómetros del anillo de carga y del deformímetro en la posición de ceros (ver figura 3.10).

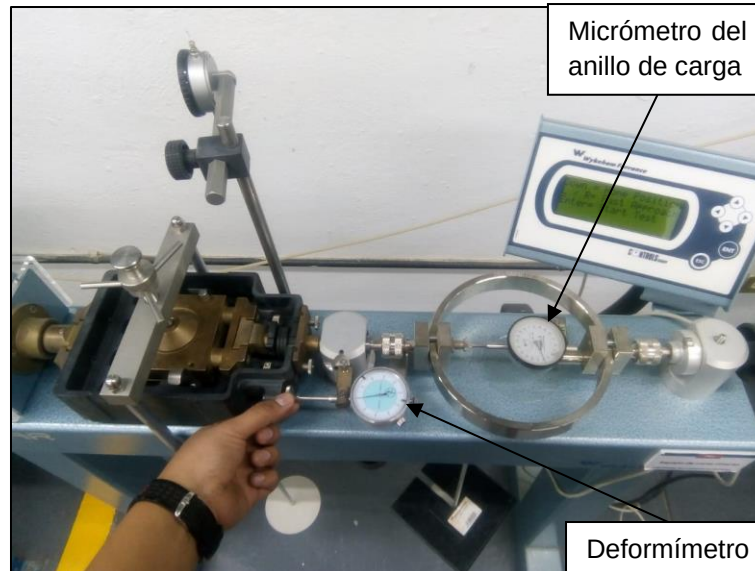


Figura 3.10. Ajuste de los micrómetros en ceros

- f) Finalmente se comienza a aplicar una carga horizontal a una velocidad de 0.50 mm/min a 2.00 mm/min hasta que haya un decremento en la lectura de carga aplicada o se haya logrado una deformación igual al 10% del diámetro inicial de la muestra (ver figura 3.11).

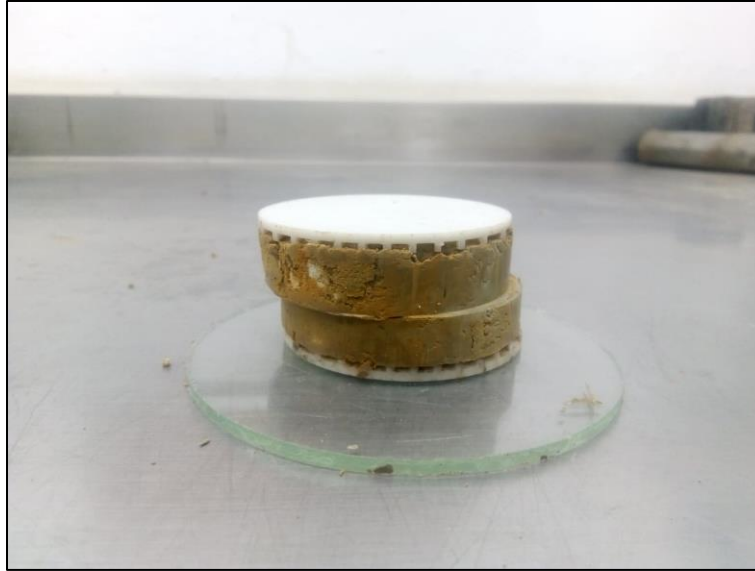


Figura 3.11. Probeta al final del ensaye de corte directo

3.2 Prueba de compresión triaxial UU

El ensayo de compresión triaxial UU es un ensayo que no considera etapa de saturación ni de consolidación. La carga axial es aplicada en condiciones no drenadas y sin medición de la presión de poros, esto último se explica en parte por el hecho de que la probeta puede estar en un estado de saturación parcial, en el presente apartado se describirá la metodología adoptada de acuerdo a la norma ASTM D-2850.

A grandes rasgos, el ensaye consiste esencialmente en:

1. Labrado de probetas
2. Montaje de la muestra
3. Llenado de la cámara triaxial
4. Ejecución de la prueba

3.2.1 Labrado de las probetas de ensaye

Antes de iniciar los ensayos se requiere de tres probetas de aproximadamente 3.60 cm de diámetro y 9.00 cm de altura obtenidas de una muestra cúbica inalterada. El labrado de las muestras se realiza con ayuda de un torno vertical de labrado y un cortador de alambre o una navaja (ver figura 3.12).

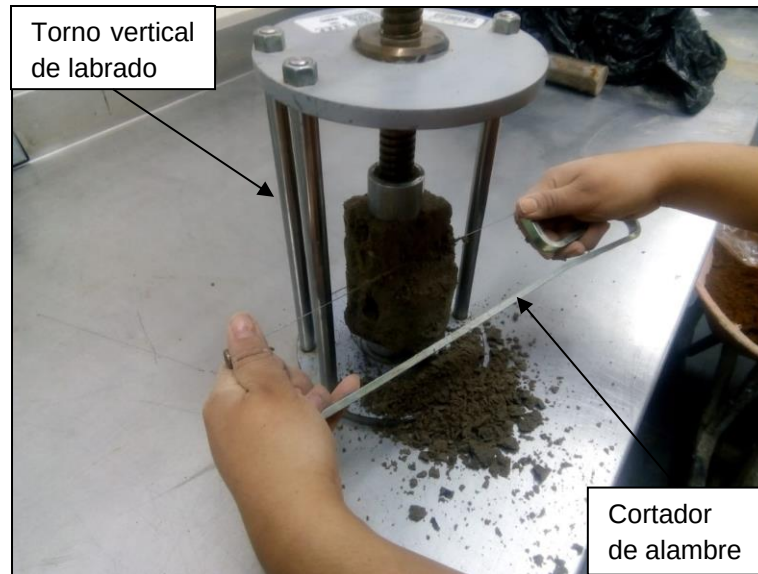


Figura 3.12. Labrado de probetas para la prueba de compresión triaxial

3.2.2 Montaje de la muestra y ensamble de la cámara

- a) Una vez labrada la probeta, se coloca sobre el pedestal en la base de la cámara (ver figura 3.13)

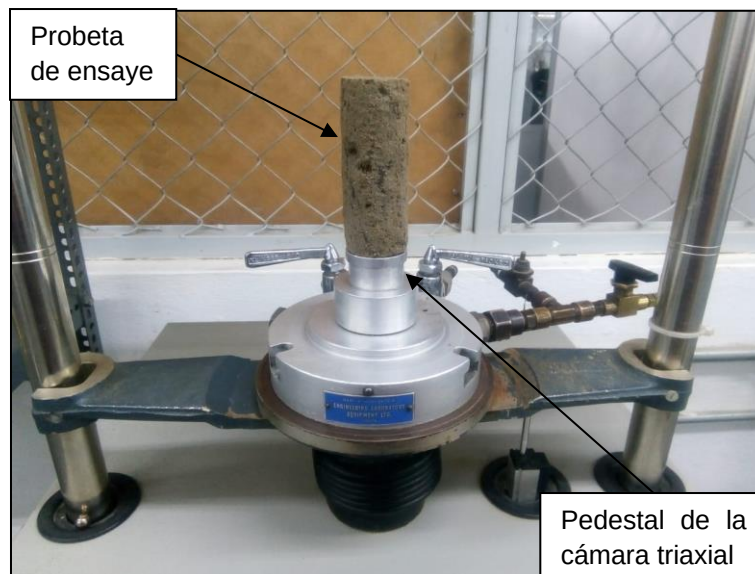


Figura 3.13. Probeta colocada sobre el pedestal de la cámara triaxial

- b) Después se coloca un cabezal de aplicación de carga sobre la probeta e inmediatamente se recubre con una membrana de hule látex (ver figura 3.14)

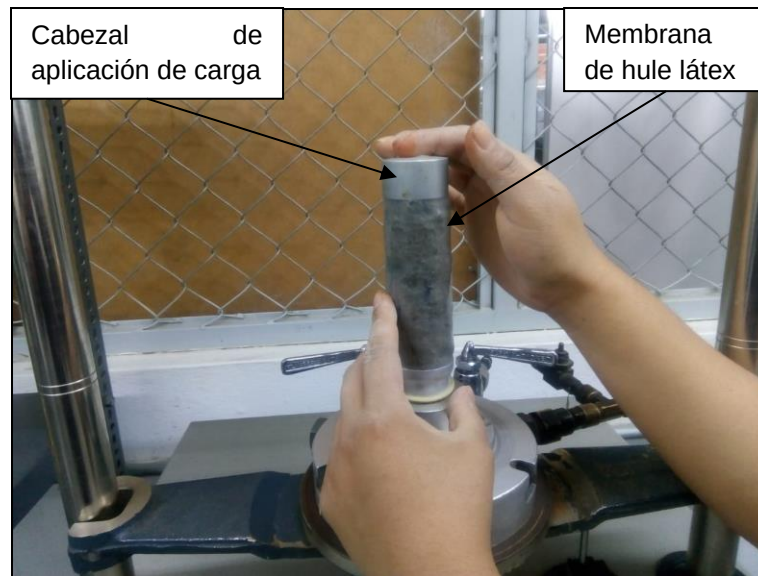


Figura 3.14. Colocación de la membrana de látex

- c) A continuación se coloca la cámara de lucita y se fija con ayuda de los postes de alineación (ver figura 3.15)



Figura 3.15. Ensamble de la cámara triaxial

3.2.3 Llenado de la cámara y ejecución de la prueba

- a) Una vez que la cámara se encuentra ensamblada se procede a llenarla con agua destilada y se aplica la presión de confinamiento (ver figura 3.16).



Figura 3.16. Llenado de la cámara triaxial con agua destilada

- b) Después se cierra el orificio de entrada del agua, se ajusta el pistón de aplicación de carga hasta que haga contacto con la base del anillo de carga y se colocan los micrómetros del anillo de carga y del deformímetro en ceros (ver figura 3.17)

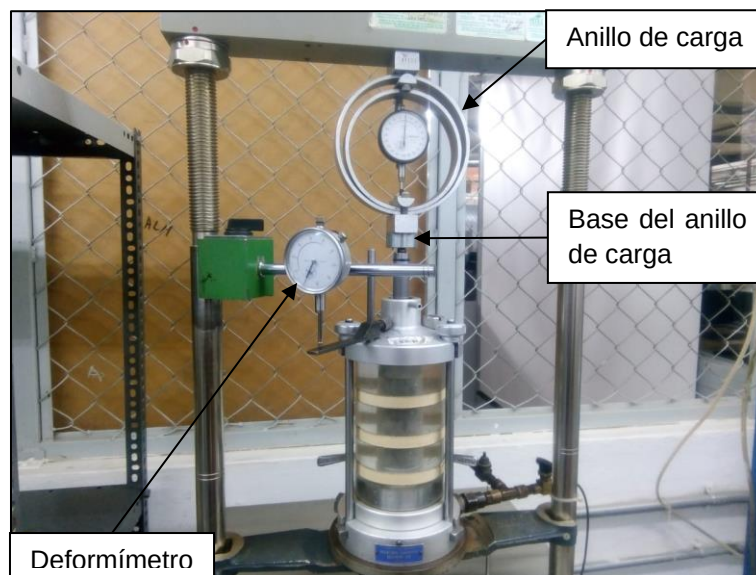


Figura 3.17. Ajuste del marco de carga y colocación de micrómetros en ceros.

- c) Finalmente se aplica un esfuerzo desviador a una velocidad de 75 mm/min hasta llevar la probeta a la falla (ver figura 3.18) y halla un descenso en la carga axial aplicada.



Figura 3.18. Probeta al final del ensaye de compresión triaxial

CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados obtenidos

En la figura 4.1 se presentan de manera gráfica los parámetros obtenidos de las pruebas de compresión triaxial (Φ_{TX} y c_{TX}) y de corte directo (Φ_{CD} y c_{CD}). Para revisar a detalle cada uno de los resultados presentados en cada ensayo es necesario consultar el apartado de anexos.

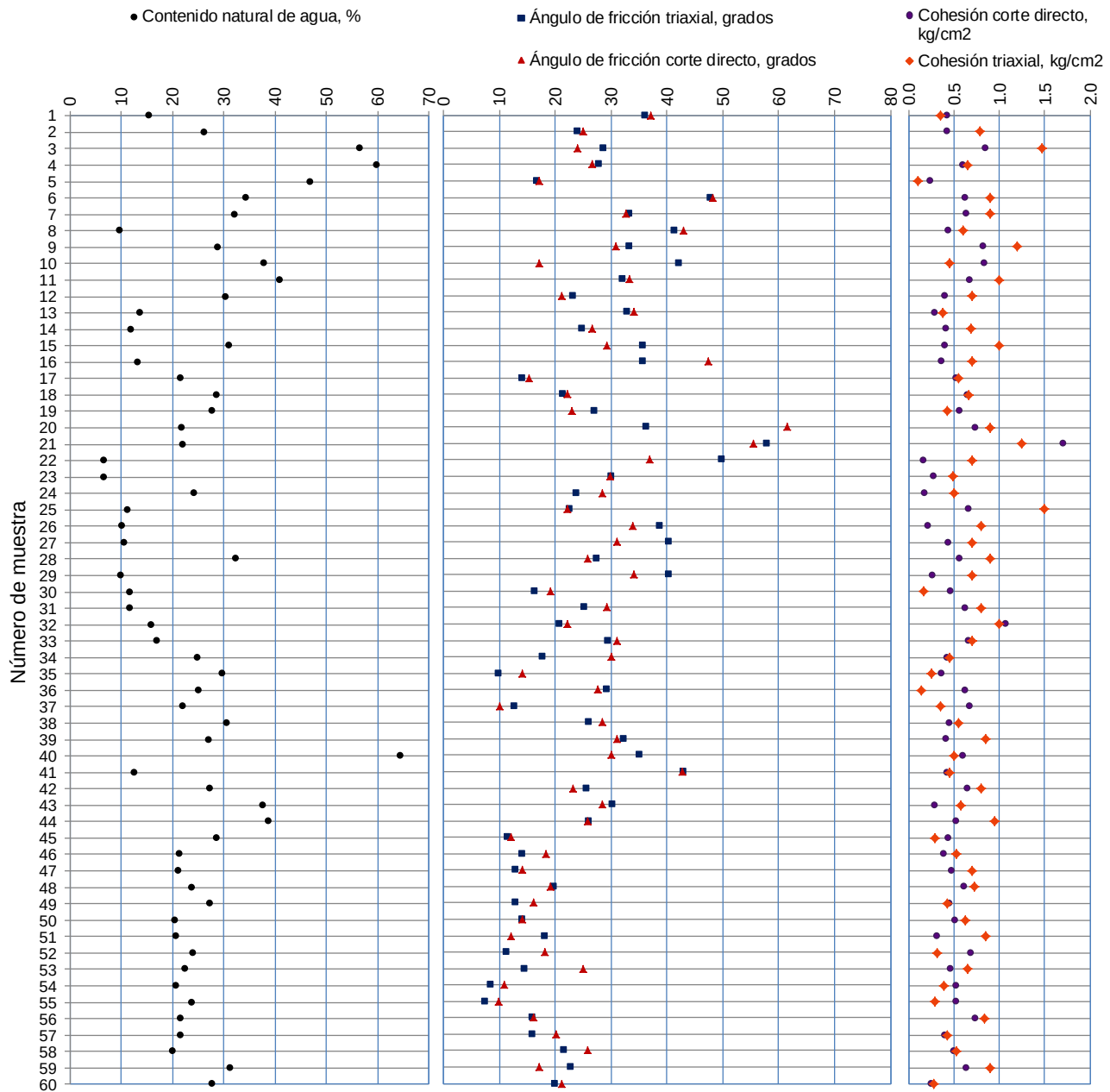


Figura 4.1. Resultados obtenidos de las pruebas de compresión triaxial y corte directo

4.2 Correlaciones obtenidas

Para poder formular las correlaciones deseadas se procedió a realizar el análisis con todos los pares de datos. De tal manera que se obtuvieron las gráficas que se muestran en la figura 4.2 y 4.3.

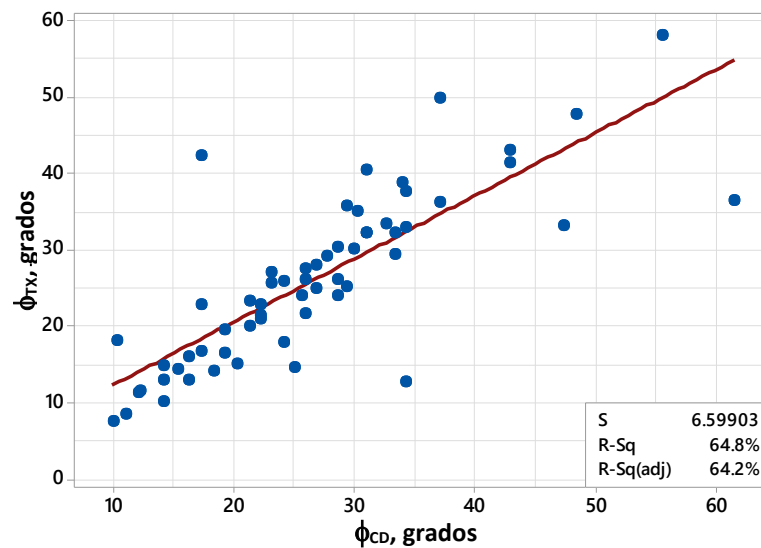


Figura 4.2. Correlación entre los ángulos de fricción interna encontrados con las pruebas de compresión triaxial, ϕ_{TX} , y corte directo, ϕ_{CD}

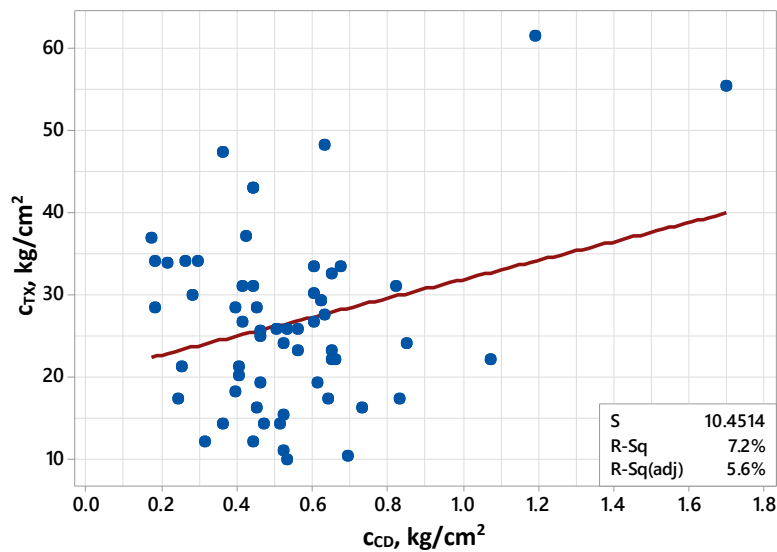


Figura 4.3. Correlación entre la cohesión aparente encontrada con las pruebas de compresión triaxial, c_{TX} , y corte directo, c_{CD}

De los valores graficados en la figura 4.2 se observa que el coeficiente de correlación de Pearson (R) es del 80%, sin embargo, para el caso de la cohesión es de 27.42%, razón por la cual se tomó la decisión de realizar un análisis para cada tipo de suelo; debido a esto, únicamente se tomaron en cuenta los suelos arcillosos debido a que son los que tienen mayor predominancia en el programa de pruebas (ver figura 4.4).

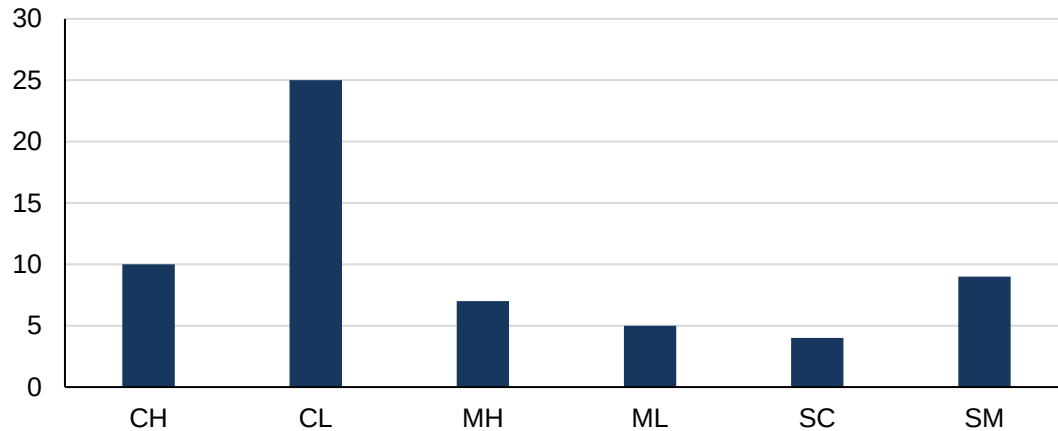


Figura 4.4. Histograma simple de frecuencias de la clasificación de muestras

Por otra parte, teniendo en cuenta que el coeficiente de correlación de Pearson es muy sensible a valores de datos extremos, se descartaron los datos que se encontraron asociados a eventos anormales y únicos, por lo tanto, sólo se consideraron 21 muestras clasificadas como arcillas de baja plasticidad (CL) y 8 como arcillas de alta plasticidad (CH) (ver figura 4.5).

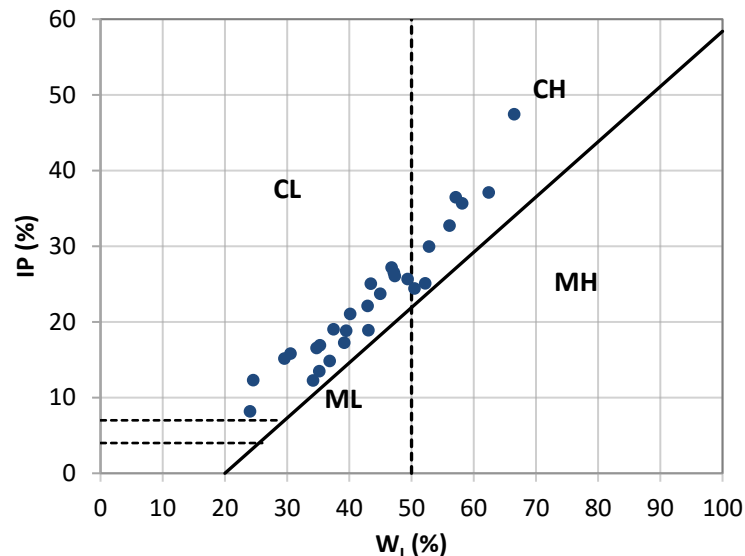


Figura 4.5. Ubicación de las muestras ensayadas en la carta de plasticidad

Derivado de lo anterior se encontró que la ecuación que se ajusta a la línea de tendencia de la figura 4.6, con un coeficiente de correlación de Pearson del 98% se encuentra representada por la ecuación 1.9:

$$\phi_{TX} = 1.050 \phi_{CD} - 2.208 \quad (\text{Ec. 1.9})$$

donde:

ϕ_{TX} = Ángulo de fricción interna obtenido por la prueba de compresión triaxial

ϕ_{CD} = Ángulo de fricción interna obtenido por la prueba de corte directo

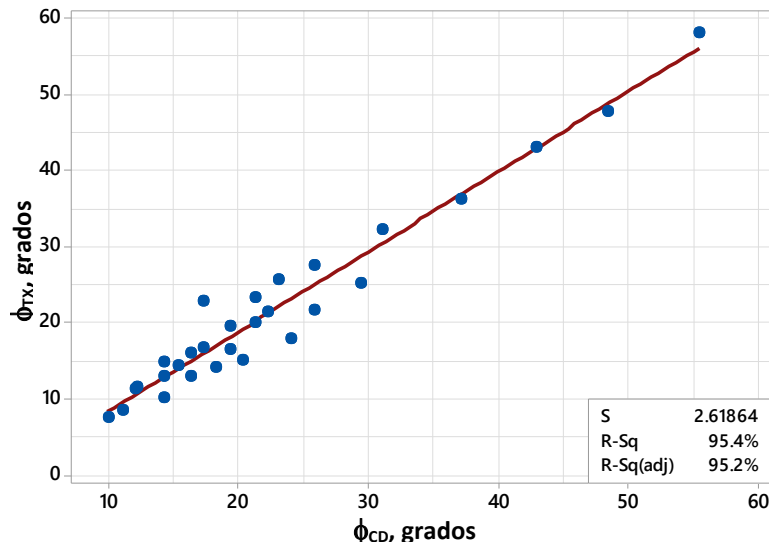


Figura 4.4. Correlación entre los ángulos de fricción interna encontrados con las pruebas de compresión triaxial, ϕ_{TX} , y corte directo, ϕ_{CD} , para arcillas

Finalmente, como se observa en la figura 4.5 la ecuación que permite relacionar los pares de valores de la cohesión con un coeficiente de correlación de Pearson del 75% es:

$$c_{TX} = 0.8443 c_{CD} + 0.1233 \quad (\text{Ec. 1.10})$$

donde:

c_{TX} = Cohesión obtenida por la prueba de compresión triaxial

c_{CD} = Cohesión obtenida por la prueba de corte directo

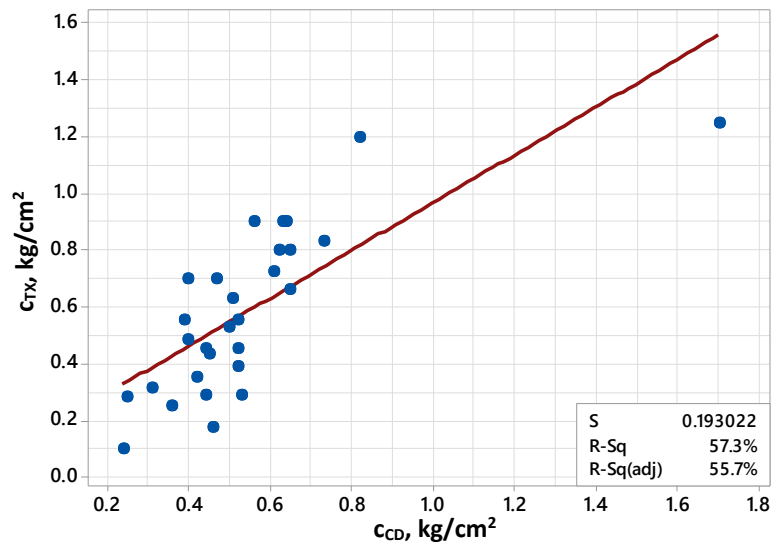


Figura 4.5. Correlación entre la cohesión aparente encontrada con las pruebas de compresión triaxial, c_{TX} , y corte directo, c_{CD} , para arcillas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados de los ensayos de corte directo y compresión triaxial UU se puede concluir que el tratar de encontrar una ecuación general que correlacione los parámetros obtenidos entre ambas pruebas resultó no viable debido a la enorme dispersión de datos que se presentó, lo cual proporciona una confiabilidad baja para algún uso práctico, sin embargo, si los datos se separan de acuerdo al tipo de suelo, esta incertidumbre en la predicción tiende a reducirse, permitiendo la formulación de ecuaciones con una confiabilidad aceptable.

Es importante remarcar que las ecuaciones obtenidas en el presente estudio tienen la limitante de haberse efectuado en suelos arcillosos con un índice plástico del 8% al 47%, un contenido de arena del 1% al 48% y una humedad natural del 11% al 46%.

Por otra parte, un aspecto primordial a tener en cuenta al realizar las pruebas de corte directo son las condiciones reales de carga bajo las que se encontrará sometido el suelo, pues de esto depende el esfuerzo normal que se utilizará en el ensaye, debido a que para suelos preconsolidados o muy cementados, se presenta un cambio de pendiente antes y después de sobrepasar el valor del esfuerzo de preconsolidación, por lo que se recomienda realizar tres ensayos por debajo y tres por arriba de dicho esfuerzo para tener una mejor apreciación de la variación de la envolvente de falla y así poder tomar una mejor decisión sobre qué parámetros utilizar.

A su vez, al tratarse de suelos parcialmente saturados ensayados bajo condiciones no consolidadas no drenadas, deben considerarse otros factores tales como la succión y las curvas características de cada tipo de suelo y utilizar expresiones modificadas presentes en la literatura para tener un modelo más completo.

Finalmente se exhorta a continuar la línea de investigación realizando un mayor número de pruebas para precisar las ecuaciones aquí presentadas y corroborar lo hecho en esta tesis, así como continuar con la investigación en otros tipos de suelo de acuerdo con su clasificación.

REFERENCIAS

- Bishop, A. W. (1954). Discussion on: Penman A. D. M. Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression. *Géotechnique*, 4(1), 43-45. doi: 10.1680/geot.1954.4.1.43
- Bowles, J. (1986). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil* (1ra ed.). Bogotá: McGraw-Hill.
- Casagrande, A., y Poulos, S. J. (1964). *Fourth report on investigation of stress-deformation and strength characteristics of compacted clays* (1ra ed.) Cambridge, Mass.: Harvard University.
- Castellanos, B. A. y Brandon, T. L. (2013). A Comparison between the Shear Strength Measured with Direct Shear and Triaxial Devices on Undisturbed and Remolded Soils. *Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique* (p. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering). Paris, Francia. Recuperado de <http://www.cfms-sols.org/sites/default/files/Actes/317-320.pdf>
- Cometa Trujillo, S. y Méndez Bohórquez, N. (2016). *Correlación entre los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo y el ensayo de triaxial en un suelo arcilloso típico de la zona occidental de Bogotá* (Tesis de licenciatura). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4108/1/TESIS%20FINAL.pdf>
- Cornforth, D.H. (2005). *Landslides in practice: Investigation, análisis and remedial/preventative options in soils* (1ra ed.). Nueva Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- Díaz Gutiérrez, J. y Villamizar Lemos, A. (2010). *Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión simple para arenas arcillosas*. (Tesis de licenciatura). Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de

http://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/963/digital_19689.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Duran Rueda, L. y Quesada Orejarena, S. (2010). *Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión simple para arenas limosas*. (Tesis de licenciatura). Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de http://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/963/digital_19689.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Dev, K. L., Rakesh J. P. y Retnamony G. R. (2016). Drained angle of internal friction from direct shear and triaxial compression tests. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 10(3), 283-287. doi: 10.1080/19386362.2015.1133754
- Lee, K. (1970). Comparison of plane strain and triaxial tests on sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(3), 901-923.
- Maccarini, M. (1993). A comparison of direct shear box tests with triaxial compression tests for a residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 11(2), 69–80. doi: 10.1007/BF00423336
- Mendivil Padilla, P. y Saavedra Jiménez, M. (2016). *Correlación entre los métodos de compresión inconfiada y corte directo en suelos cohesivos, del sector el rodeo en Cartagena*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Cartagena. Recuperado de <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/4252/1/TESIS-FINAL-Documento-a-imprimir.pdf>
- Nash, K. L. (1953). The shearing resistance of a fine closely grade sand. En A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands (Eds.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 160-164). Zurich, Suiza: ICOSOMEF.

- Peña Rojas, K. y Pérez Ballen, I. (2012). *Comparación de los parámetros de resistencia al corte obtenidos en los ensayos de corte directo y triaxial de una arena arcillosa*. (Tesis de licenciatura). Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2094/digital_23485.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rincón Gómez, B. y Suárez Pinzón, L. (2012). *Comparación de parámetros de resistencia al esfuerzo cortante en el aparato de corte directo y triaxial para arenas limosas*. (Tesis de licenciatura). Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2192/digital_24005.pdf?sequence=1

- Rosales Bermúdez, R. (2007). *Variación de la cohesión y el ángulo de fricción interna obtenidos por los ensayos de corte directo y triaxial con materiales granulares y arcillosos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2749_C.pdf

- Schultze, E. y Horn, A. (1966). The shear strength of silts. En Associate Committee on Soil and Snow Mechanics (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 350-353). Toronto, Canadá: University of Toronto Press.

- Saada, A. S., y Townsend, F. C. (1981). State of the art: Laboratory strength testing of soils. En R. N. Yong and F. C. Townsend (Eds.), *Laboratory shear strength of soil. ASTM STP 740* (pp. 7-77). Baltimore, MD: American Society for Testing and Materials.

- Skempton, A. W. (1949). Alexandre Collin. A note on his pioneer work in soil mechanics. *Géotechnique*, 1(4), 215-222. doi: 10.1680/geot.1949.1.4.215

- Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77-102. doi: 10.1680/geot.1964.14.2.77

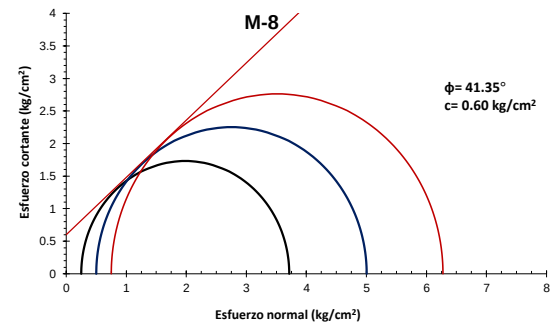
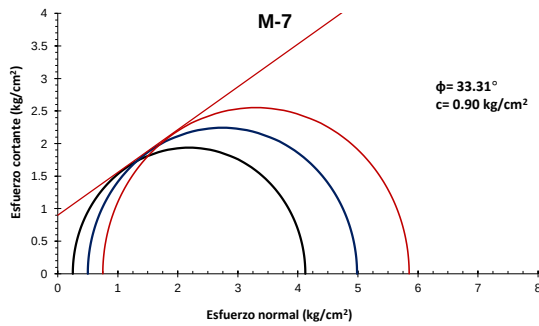
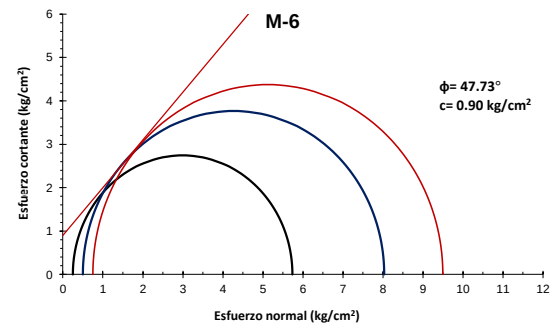
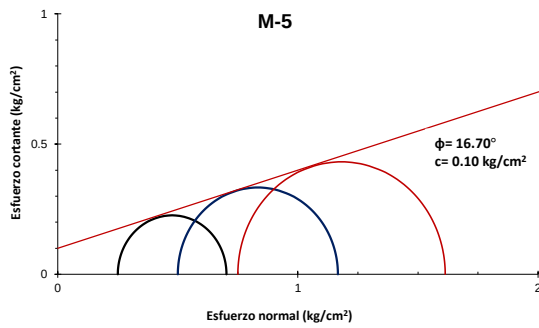
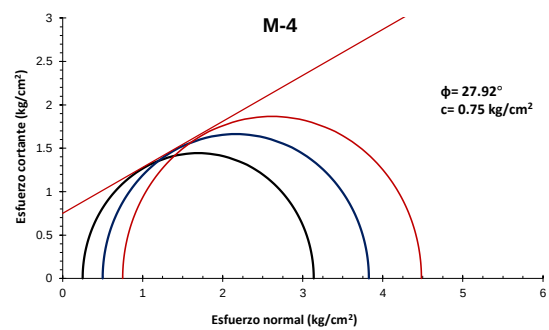
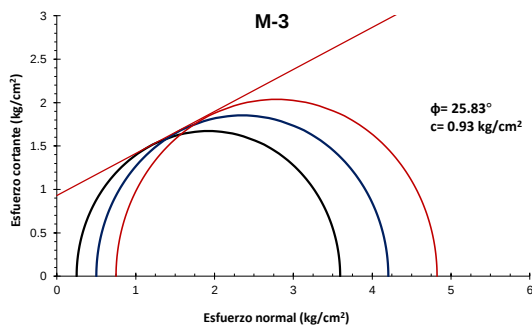
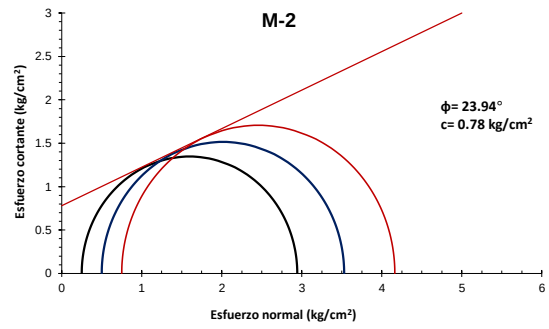
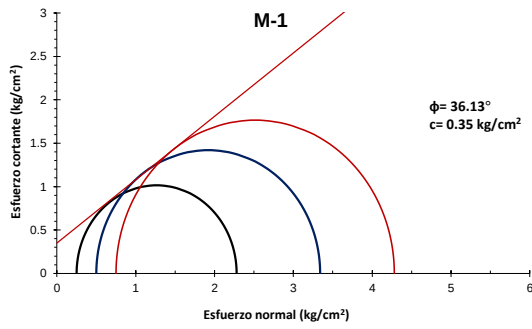
- Suárez Díaz, J. (2013). *Deslizamientos. Tomo I: Análisis geotécnico* (1rd ed.). Colombia: Geotecnología S.A.S.
- Terzaghi, K., y Peck, R. (1948). *Soil mechanics in engineering practice* (1rd ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.
- Thermann, K., Gau, C. y Tiedemann, J. (2006). Shear strength parameters from direct shear tests-influencing factors and their significance. *The geological society of London*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/237718044_Shear_strength_parameters_from_direct_shear_tests_-_influencing_factors_and_their_significance
- Thomson, S., y Kjartanson, B. H. (1985). Study of delayed failure in a cut slope in stiff clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 286–297. doi: 10.1139/t85-042
- Wilson, S. D., Seed, H. B., y Peck, R. B., (1982). Arthur Casagrande, 1902–1981 a tribute. *Géotechnique*, 32(2), 87-94. doi: 10.1680/geot.1982.32.2.87

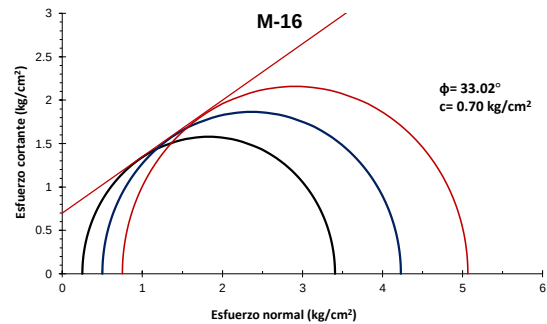
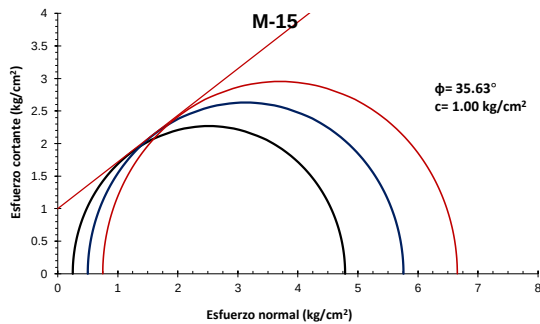
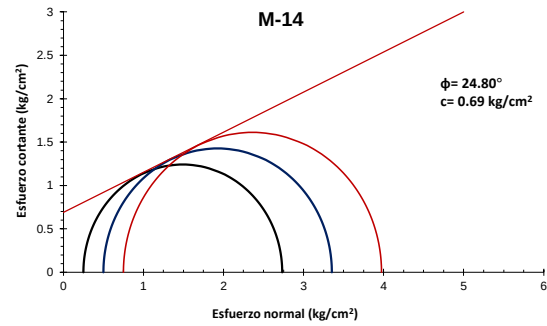
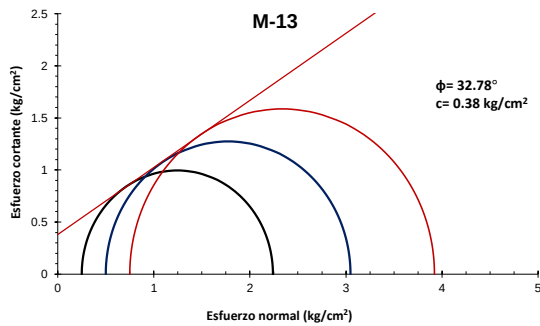
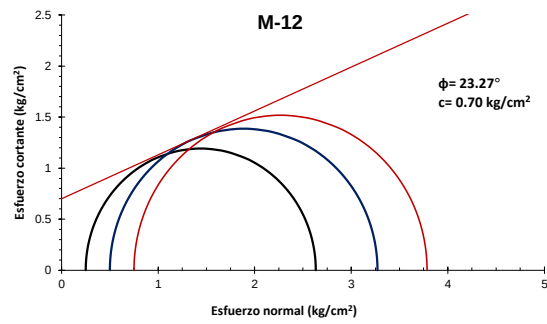
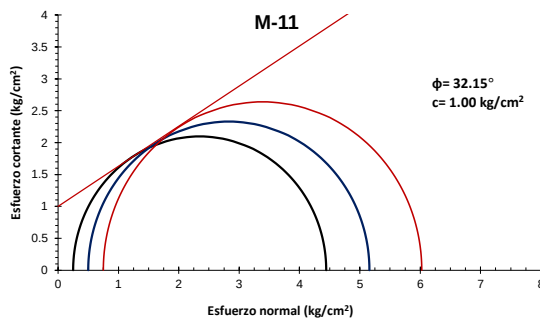
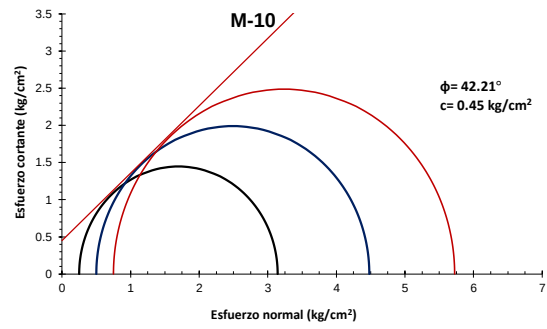
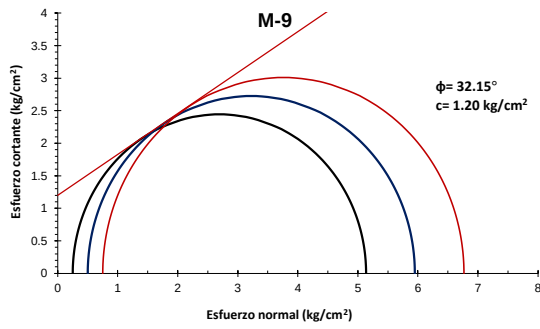
BIBLIOGRAFÍA:

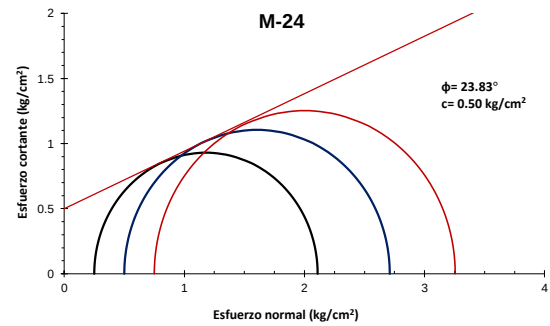
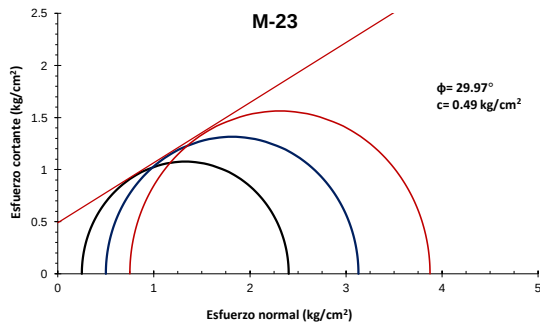
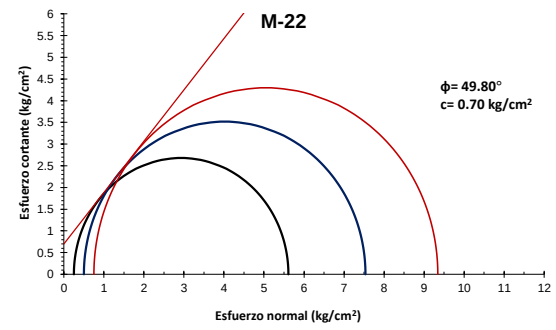
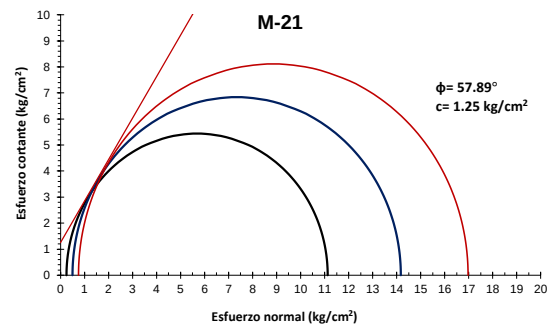
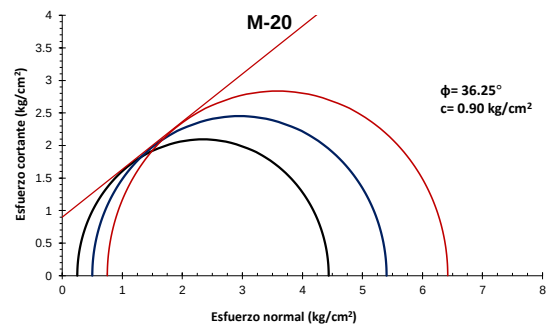
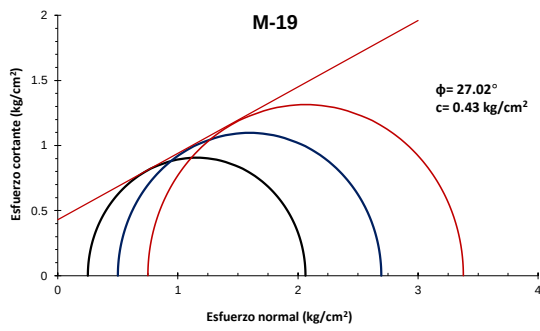
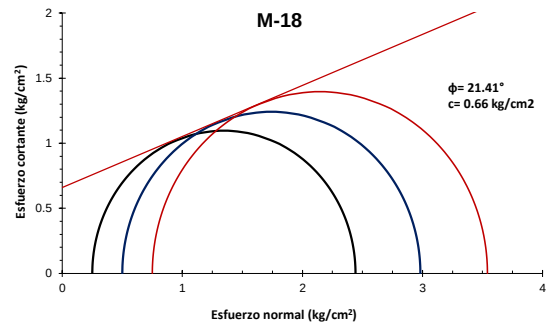
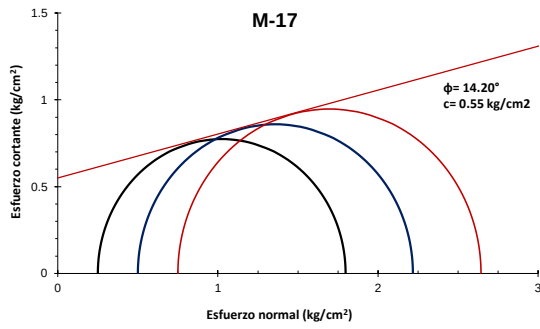
- Das, B. (2007). *Principios de ingeniería de cimentaciones* (7ma ed.). México: CENGAGE Learning.
- Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A. (2000). *Mecánica de suelos. Tomo I* (9na ed.). México: Limusa.
- Terzaghi, K., y Peck, R. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.

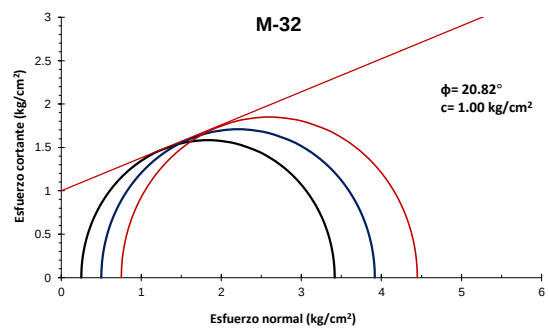
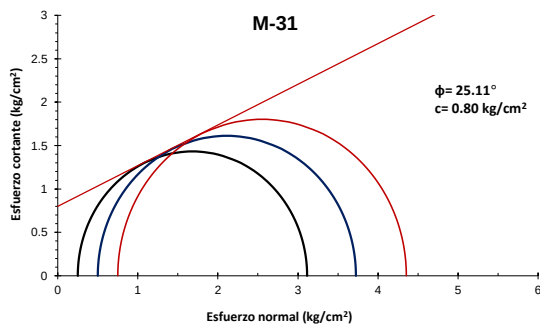
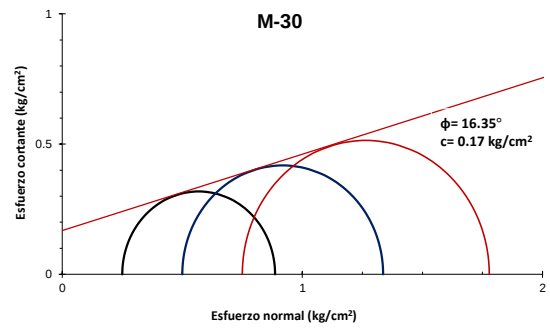
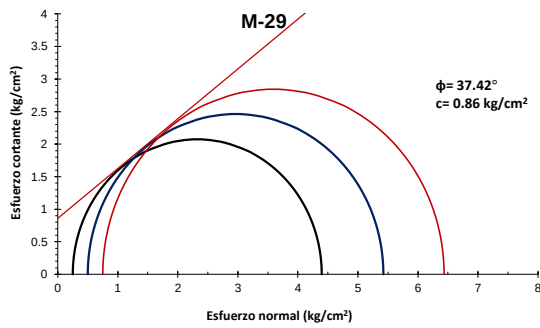
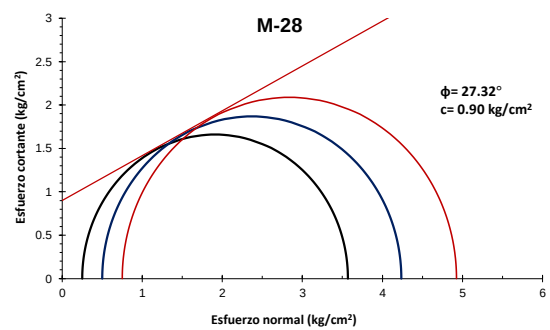
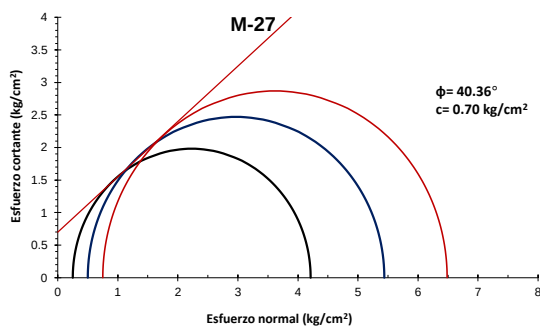
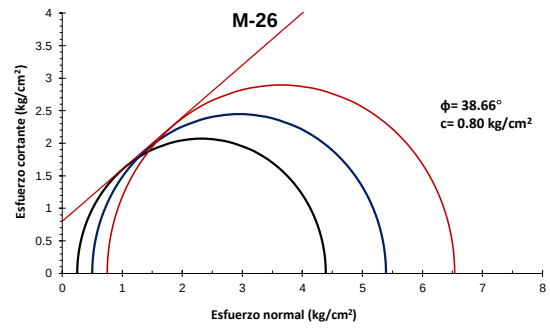
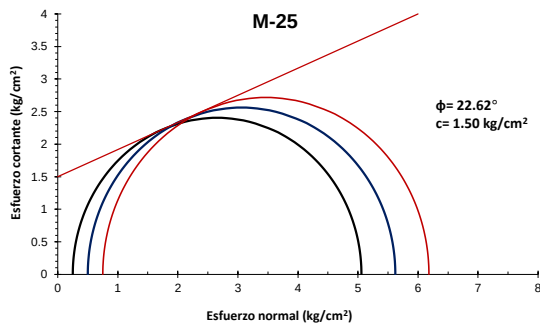
ANEXO A

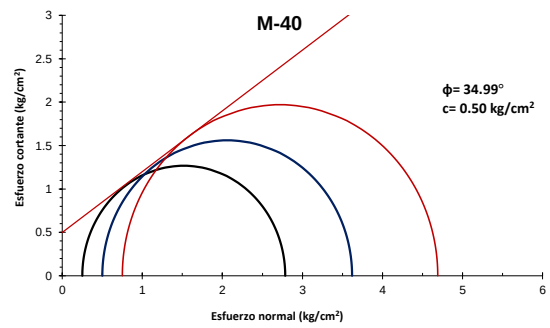
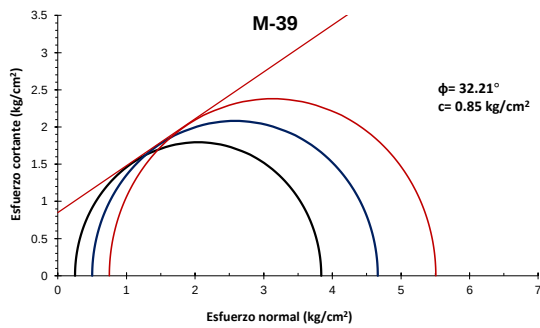
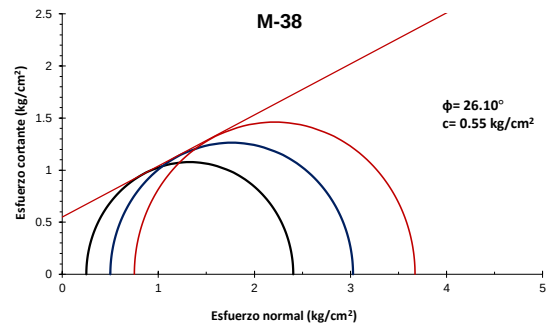
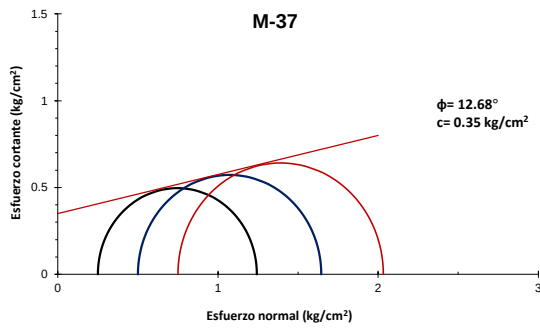
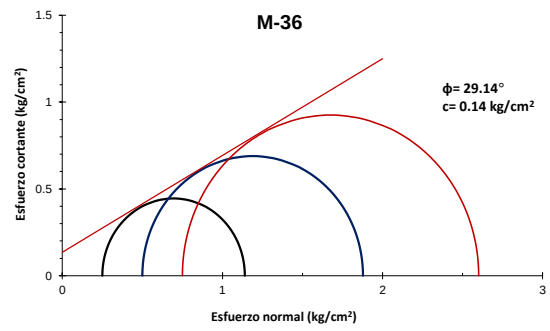
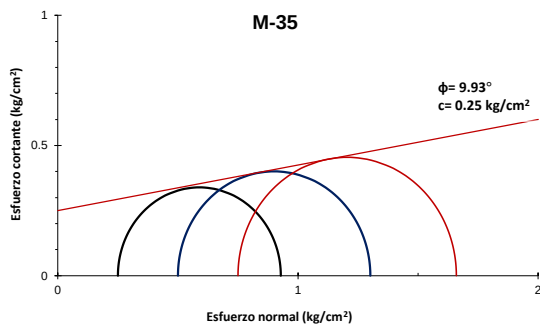
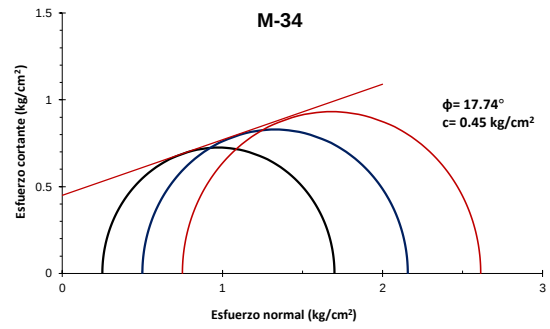
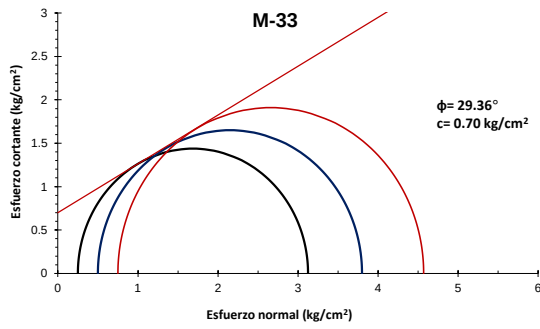
**PRUEBAS DE
COMPRESIÓN TRIAXIAL**

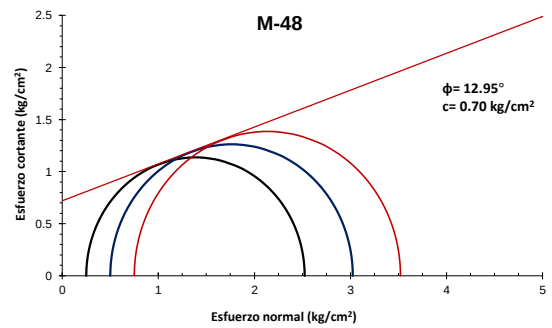
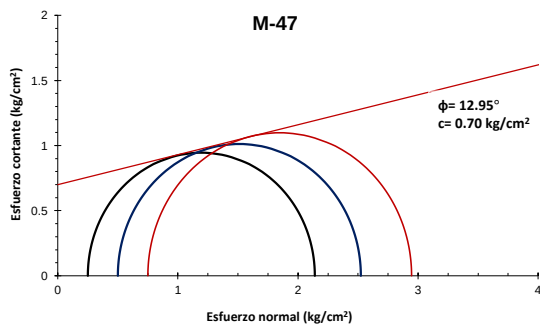
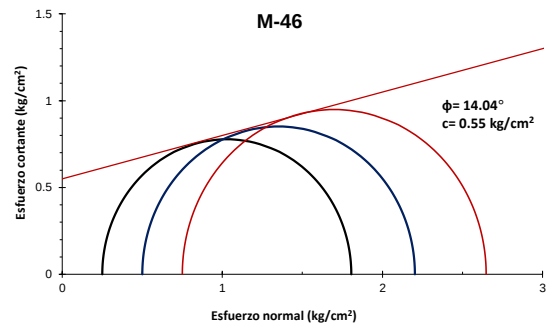
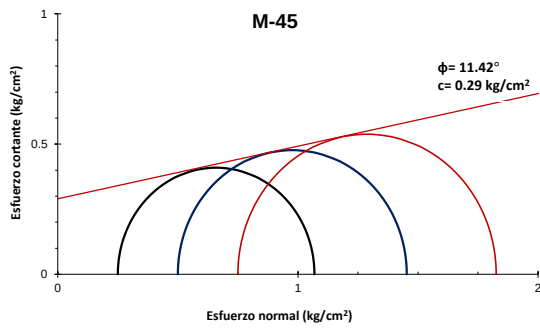
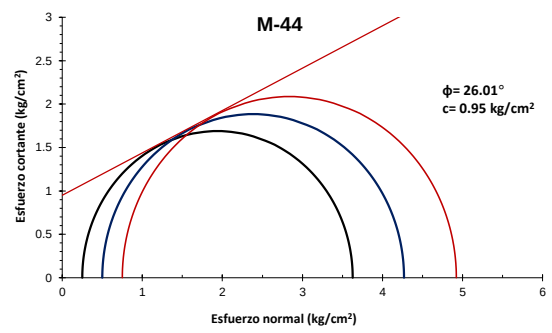
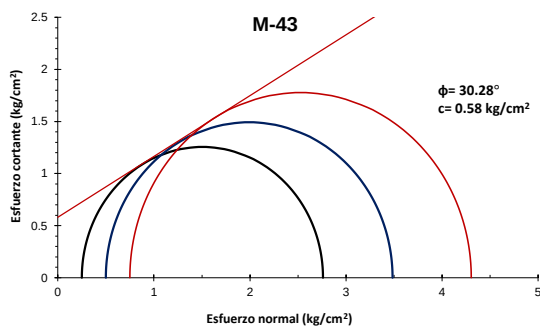
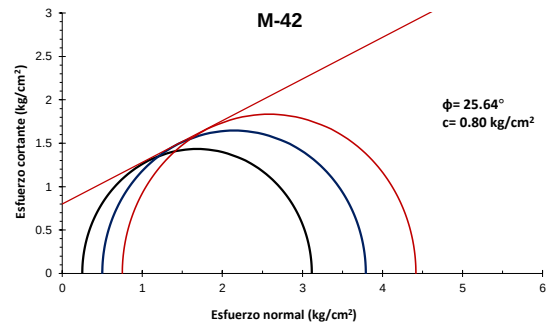
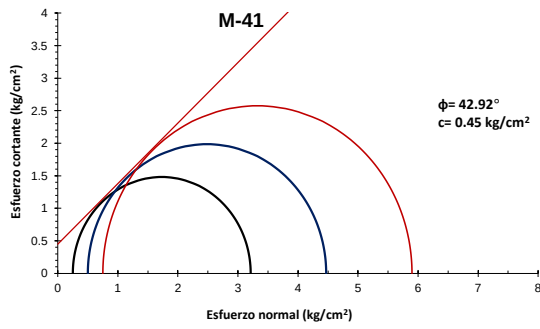


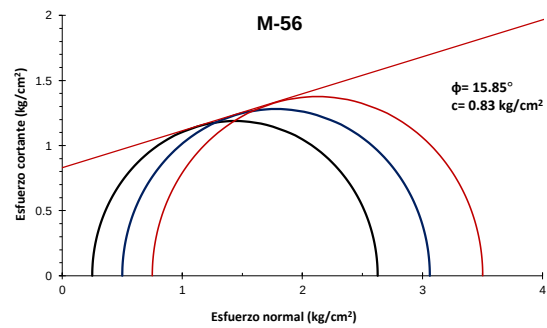
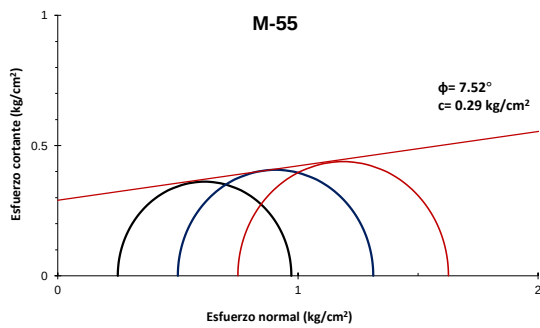
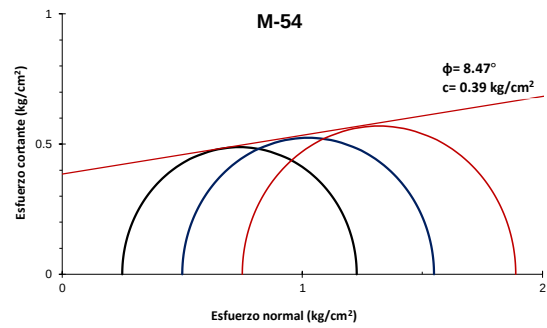
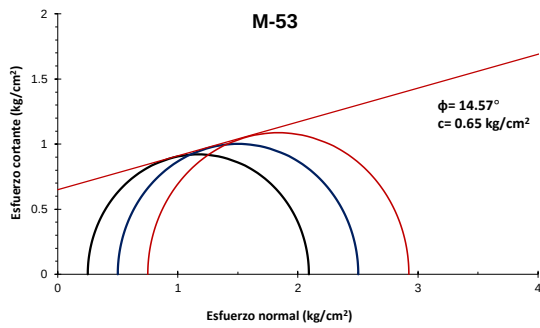
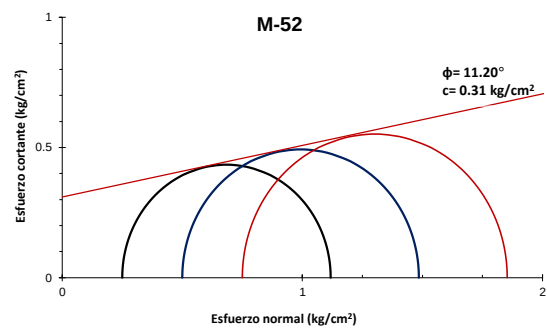
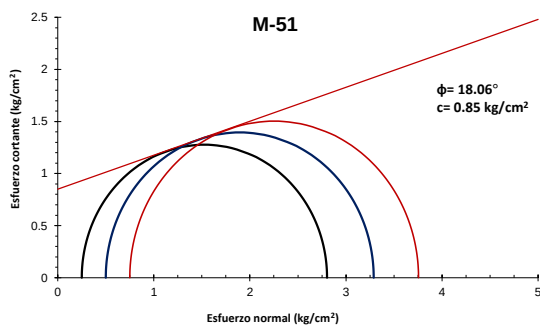
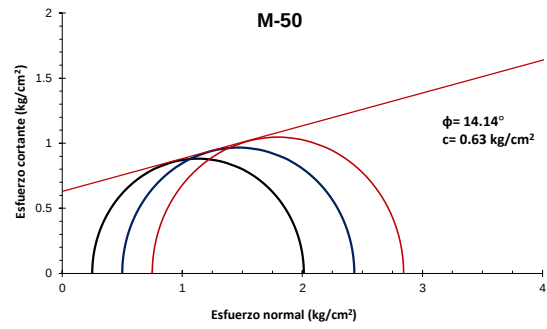
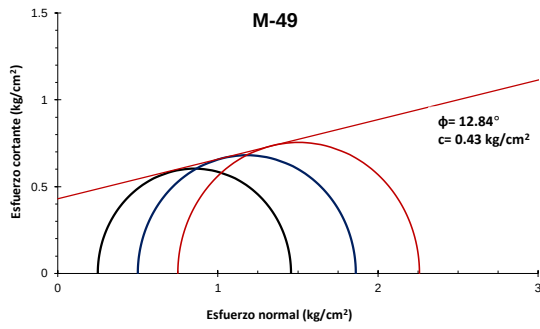


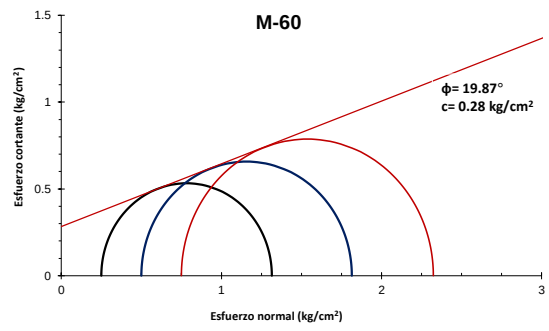
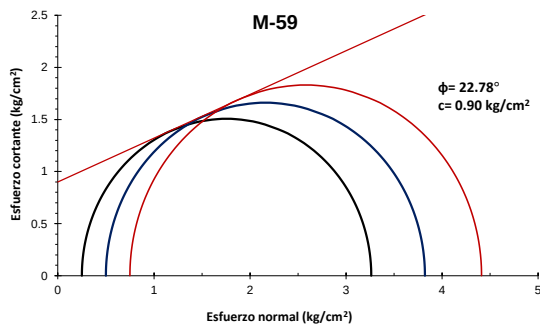
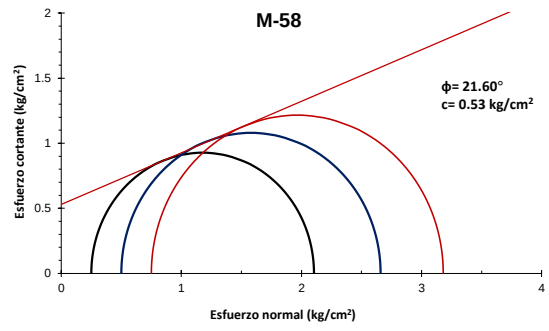
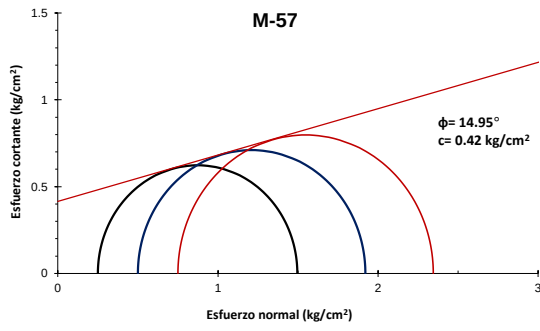












ANEXO B

**PRUEBAS DE CORTE
DIRECTO**

