



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES
CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL
APARATO DE BISHOP**

Joseph Evarist Moreno

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, febrero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES
CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL
APARATO DE BISHOP**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSEPH EVARIST MORENO

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Ángel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Oscar Humberto Galicia Núñez |
| VOCAL V | Br. Carlos Enrique Gómez Donis |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. José Gabriel Ordóñez Morales |
| EXAMINADOR | Ing. Omar Enrique Medrano Méndez |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel López Juárez |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES
CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL
APARATO DE BISHOP**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha de octubre de 2015.


Joseph Evarist Moreno

Guatemala, 27 de octubre de 2017

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

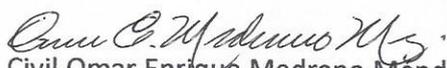
Ingeniero Ordoñez Morales.

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que el trabajo de graduación **"MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL APARATO DE BISHOP"**, elaborado por el estudiante Joseph Evarist Moreno con carné 200980015, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado 6842
Jefe de Sección Mecánica de Suelos

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 6842



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
10 de noviembre de 2017

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL APARATO DE BISHOP** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Joseph Evarist Moreno quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Joseph Evarist Moreno MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL APARATO DE BISHOP da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, febrero 2018

/mrm.

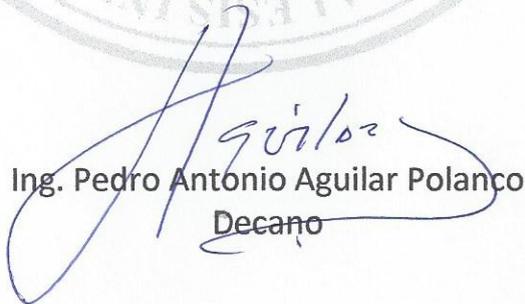


Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEDICIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y CAMBIO VOLUMÉTRICO EN ENSAYO TRIAXIALES CONSOLIDADOS NO DRENADOS Y CONSOLIDADOS DRENADOS, POR MEDIO DEL APARATO BISHOP**, presentado por el estudiante universitario: **Joseph Evarist Moreno**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por amarme, darme vida y haberme permitido llegar a este punto en mi vida.
- Mi padre** José Armando Moreno, por su amor y apoyo incondicional durante todo este tiempo. Por confiar y creer en mí siempre. Sin su apoyo nunca hubiera conseguido este logro.
- Mi abuelo** Armando Moreno, por su amor y su apoyo desde niño. Siempre fue mi segundo padre.
- Mi abuela** Gloria Guerra de Moreno, por amarme y educarme desde niño. Por enseñarme desde muy pequeño cómo ser un caballero. Que en paz descansa.
- Mis hermanitos** Aunque estuve lejos de casa por mucho tiempo, siempre estuvieron al tanto de mí, todos estos años.
- Mis amigos** Por todos esos momentos alegres que tuvimos. Por todo su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|---|
| La Universidad de San Carlos de Guatemala | Por permitirme realizar mis estudios en esta institución y permitirme haberme formado como profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por todo el conocimiento aportado y por guiarme a culminar este camino. |
| Ing. Omar Medrano | Por compartir su conocimiento y asesorarme en este trabajo de graduación. |
| Sr. Byron García | Por su amistad y su ayuda en la realización de este trabajo. |
| Centro de Investigaciones de Ingeniería | En especial a la sección de mecánica de suelos, por toda la ayuda y conocimientos que me brindaron. |
| Mi familia | Por apoyarme todo este tiempo, nunca abandonarme y mostrarme que no importa qué tan difícil se vieran las cosas, siempre podría contar con ellos. |

La familia

Morales Ruano

Por estar siempre al tanto de mí y ayudarme todos estos años. A mi Tía Tita por cuidarme siempre como su propio hijo. A Rubencito por estar conmigo en las buenas y en las malas.

Srta. Tanya Mai

Por tu apoyo, cariño y amistad. Te quiero mucho.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | IV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN | XI |
| OBJETIVOS | XIII |
| INTRODUCCIÓN | XV |
| 1. PARÁMETROS DE CORTE EN LOS SUELOS | 1 |
| 1.1. Esfuerzos efectivos en suelos | 1 |
| 1.2. Presión intersticial | 4 |
| 1.3. Parámetros de presión de poro A y B..... | 5 |
| 1.4. Pruebas de resistencia al corte | 9 |
| 1.4.1. Ensayo de corte directo | 9 |
| 1.4.2. Ensayo triaxial | 11 |
| 2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL | 15 |
| 2.1. Cámara de confinamiento..... | 15 |
| 2.2. Sistema de presión de poro | 15 |
| 2.3. Sistema de medición de Bishop | 17 |
| 2.3.1. Indicador nulo | 17 |
| 2.3.2. Cilindro de control..... | 20 |
| 2.3.3. Manómetro tipo Bourdon | 21 |
| 2.3.4. Manómetro de tubo U | 21 |
| 2.3.5. Calibración del aparato | 21 |
| 2.3.6. Conexión a la cámara de confinamiento..... | 23 |
| 2.3.7. Observaciones generales | 24 |
| 2.4. Sistema de medición de cambio volumétrico..... | 25 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.4.1. | Cambio volumétrico en ensayos no drenados | 25 |
| 2.4.2. | Cambio volumétrico en ensayos drenados | 26 |
| 3. | DESARROLLO EXPERIMENTAL | 29 |
| 3.1. | Preparación de la muestra | 29 |
| 3.1.1. | Preparación de muestras inalteradas..... | 29 |
| 3.1.1.1. | Equipo a utilizar | 30 |
| 3.1.1.2. | Procedimiento | 30 |
| 3.1.2. | Preparación de muestras remoldeadas..... | 31 |
| 3.1.2.1. | Equipo a utilizar | 31 |
| 3.1.2.2. | Procedimiento | 32 |
| 3.2. | Procedimiento para muestras no drenadas..... | 33 |
| 3.2.1. | Ejemplo ilustrativo | 33 |
| 3.2.2. | Análisis de resultados | 36 |
| 3.3. | Procedimiento para muestras no consolidadas no drenadas... 36 | |
| 3.3.1. | Ejemplo ilustrativo de ensayo tipo no consolidado no drenado | 37 |
| 3.3.2. | Análisis y comparación de resultados | 39 |
| 3.4. | Procedimiento para muestras consolidadas no drenadas..... | 49 |
| 3.4.1. | Ejemplo ilustrativo de ensayo tipo consolidado no drenado | 51 |
| 3.4.2. | Análisis y comparación de resultados | 53 |
| 3.5. | Procedimiento para muestras drenadas..... | 60 |
| 3.5.1. | Ejemplo ilustrativo | 61 |
| 3.5.2. | Análisis y comparación de resultados | 67 |
| 4. | GUIA PARA EL MANTENIMIENTO Y USO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL | 69 |
| 4.1. | Aparato de ensayos triaxiales | 69 |
| 4.2. | Cámara de confinamiento | 69 |
| 4.3. | Aparato de medición de cambio volumétrico..... | 70 |

| | |
|------------------------------|----|
| 4.4. Aparato de Bishop | 70 |
| CONCLUSIONES | 73 |
| RECOMENDACIONES | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 77 |
| ANEXOS | 79 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Mecanismos de los fenómenos de fricción | 2 |
| 2. | Matriz de suelo..... | 5 |
| 3. | Sistema de esfuerzos aplicados a un elemento..... | 6 |
| 4. | Elemento sometido a carga axial para inducción de los parámetros de presión intersticial..... | 7 |
| 5. | Aparato del ensayo de corte directo | 10 |
| 6. | Aparato de ensayo triaxial | 12 |
| 7. | Círculo de Mohr..... | 13 |
| 8. | Envolvente de Mohr | 13 |
| 9. | Esquema de sistema de presión de confinamiento | 16 |
| 10. | Indicador nulo..... | 18 |
| 11. | Esquema del aparato original para medición de presión de poro y cambio volumétrico..... | 19 |
| 12. | Esquema de Cilindro de Control | 20 |
| 13. | Equipo para tallar muestra de suelo | 31 |
| 14. | Equipo para remoldear la muestra..... | 32 |
| 15. | Muestra cubierta con membrana | 34 |
| 16. | Cámara de confinamiento..... | 35 |
| 17. | Esquema del aparato para muestras no drenadas para suelos parcialmente saturados..... | 37 |
| 18. | Esfuerzos principales totales del ensayo tipo UU de la muestra no. 1..... | 44 |
| 19. | Esquema de aparato utilizado para consolidar muestras de suelo parcialmente saturadas..... | 51 |
| 20. | Envolvente de falla y círculos de Mohr, para el ensayo de compresión triaxial tipo CD..... | 66 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Humedad de la muestra no. 1 | 40 |
| II. | Densidad específica de la muestra no. 1 | 40 |
| III. | Datos de la tabla de cargas del ensayo tipo UU de la muestra no. 1 medido con el aparato de Bishop | 41 |
| IV. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 1 (aparato de Bishop) | 43 |
| V. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop | 45 |
| VI. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Humboldt | 45 |
| VII. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 1 (aparato de Humboldt) | 46 |
| VIII. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Bishop | 47 |
| IX. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 7 (aparato de Bishop) | 47 |
| X. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Humboldt | 48 |
| XI. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 7 (aparato de Humboldt) | 48 |
| XII. | Datos de la muestra no. 1 antes de consolidar | 53 |
| XIII. | Parámetros de consolidación de la muestra no. 1 | 53 |
| XIV. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop | 54 |
| XV. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 1 (aparato de Bishop) | 54 |
| XVI. | Datos de la muestra no. 1 antes de consolidar | 55 |
| XVII. | Parámetros de consolidación de la muestra no. 1 | 55 |

| | | |
|---------|---|----|
| XVIII. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Humboldt..... | 55 |
| XIX. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 1 (aparato de Humboldt) | 56 |
| XX. | Datos de la muestra no. 7 antes de consolidar | 57 |
| XXI. | Parámetros de consolidación de la muestra no. 7 | 57 |
| XXII. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Bishop | 57 |
| XXIII. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 7 (aparato de Bishop) | 58 |
| XXIV. | Datos de la muestra no. 7 antes de consolidar | 58 |
| XXV. | Parámetros de consolidación de la muestra no. 7 | 59 |
| XXVI. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Humboldt..... | 59 |
| XXVII. | Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 7 (aparato de Humboldt) | 59 |
| XXVIII. | Humedad de la muestra, para el ensayo triaxial tipo CD | 62 |
| XXIX. | Datos del ensayo de compresión triaxial consolidado- drenado (CD) | 63 |
| XXX. | Determinación del esfuerzo desviador σ y el esfuerzo desviador en rotura $q_{m\acute{a}x}$, para el ensayo triaxial tipo CD | 65 |
| XXXI. | Determinación del porcentaje de humedad, densidad húmeda y densidad seca, para el ensayo triaxial tipo. | 65 |
| XXXII. | Esfuerzos principales totales y efectivos para dibujar los círculos de Mohr, para el ensayo triaxial tipo CD | 66 |
| XXXIII. | Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop | 67 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|---|
| ϕ | Ángulo de fricción interna. |
| A | Área de la sección paralela al plano de deslizamiento. |
| Δu_e | Cambio de presión de poro inducido por esfuerzo de confinamiento. |
| Δu_d | Cambio de presión de poro inducido por esfuerzo desviador. |
| Δu | Cambio de presión de poro o presión intersticial. |
| $\Delta \sigma$ | Cambio en el esfuerzo normal total. |
| $\Delta \sigma_3$ | Cambio en la presión lateral de confinamiento. |
| $\Delta \sigma_1$ | Cambio en la presión total vertical. |
| ΔV | Cambio en volumen. |
| μ | Coeficiente de fricción entre superficies en contacto. |
| c | Cohesión aparente. |
| C_c | Compresibilidad de la estructura de suelo. |

| | |
|-----------------------------|---|
| S | Esfuerzo cortante actuante máximo |
| τ | Esfuerzo de cortante actuante. |
| σ' | Esfuerzo efectivo. |
| σ | Esfuerzo normal total. |
| F | Fuerza paralela a superficie de contacto. |
| P | Fuerza perpendicular al plano de deslizamiento. |
| u | Presión de poro o presión intersticial. |
| V | Unidad de volumen de suelo. |

GLOSARIO

| | |
|---------------------------------------|---|
| Aparato de Bishop | Accesorio utilizado en los aparatos de compresión triaxial para medir la presión de poro de agua y de aire, durante las pruebas de compresión triaxial. |
| Confinamiento | Fuerza que se le aplica a una muestra de suelo para juntar sus partículas y reducir espacios vacíos. |
| Consolidación | Se refiere al acto de reducción de volumen de una muestra de suelo provocado por una carga determinada a lo largo de cierto tiempo. |
| Desairar | Es el acto de separar y remover burbujas de aire de un líquido. |
| Drenado | Tipo de ensayo en la que se deja escapar el aire y agua de los poros de la probeta de suelo durante la consolidación. |
| Isotrópico | Que un material tenga las mismas propiedades físicas en todas sus direcciones. |
| Presión Intersticial o de Poro | Presión de los fluidos que existe entre las granulas de la estructura del suelo que actúa entre estos, afectando las presiones efectivas y alterando, por lo tanto, la estabilidad y resistencia del suelo. |

Probeta

Muestra de suelo tallada con forma cilíndrica utilizada en las pruebas de compresión triaxial.

Remoldeada

Proceso de rehacer una probeta de suelo con volumen predeterminado tomando en cuenta la densidad y humedad correspondiente a la muestra original de suelo.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se rehabilitó un aparato para medición de presión de poro conocido como el aparato de Bishop, junto con un dispositivo utilizado para la medición de cambio volumétrico para muestras parcialmente saturadas. Se utilizaron los partes necesarios para reponer partes que ya no existían o se perdieron en el transcurso del tiempo, ya que este aparato empezó a funcionar desde los años 70. Se tuvo que improvisar y utilizar materiales para reconstruir los componentes necesarios para realizar la medición de cambio volumétrico en muestras parcialmente saturadas, ya que en estas muestras se tienen que medir la cantidad de agua que entra a la cámara de confinamiento para saber el cambio volumétrico de la muestra ensayada.

Las muestras ensayadas con este aparato fueron analizadas y comparadas con muestras del mismo tipo suelo ensayadas con un aparato de Humboldt más moderno, utilizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en la Sección de Mecánica de Suelos. Las pruebas realizadas fueron triaxiales no consolidado no drenado y triaxiales consolidadas no drenadas para muestras parcialmente saturadas. Los resultados fueron comparados en términos de la presión de poro obtenido de cada muestra y cambio volumétrico que ocurrió en cada muestra. Se aseguró que primero todas las muestras fueran del mismo tipo de suelo y tuvieran las mismas propiedades, como contenido de humedad y densidad.

Finalmente, se realizó una guía detallada del procedimiento a seguir durante la operación del aparato para cada tipo de ensayo triaxial. También se hizo una guía de los pasos a tomar para el mantenimiento del aparato con posibles problemas que pudieran resultar conforme se fuera utilizando. Este aparato contiene muchas partes mecánicas que se desgastan conforme se

utiliza y muchas partes que puedan producir fugas de presión que nos pudo alterar las lecturas de nuestros instrumentos.

OBJETIVOS

General

Rehabilitar y calibrar el aparato de Bishop en la máquina triaxial para la medición de presión de poro y cambio volumétrico para suelos cohesivos.

Específicos

1. Reemplazar y adaptar todas las piezas necesarias para rehabilitar el aparato de Bishop.
2. Redactar una guía para el uso del aparato Bishop.
3. Hacer una guía para realizar el ensayo triaxial No Consolidado No Drenado y Consolidado No Drenado.
4. Calibrar el aparato para poder realizar ensayos y comparar los datos de este aparato con los datos de la máquina triaxial existente.

INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala es necesaria la medición de presión de poro y cambio volumétrico en probetas de ensayos triaxiales de los tres tipos, con el fin de conocer de una forma más certera el comportamiento de suelos cohesivos totalmente saturados respecto a sus esfuerzos efectivos. La presión de poro contribuye en la capacidad de carga en suelos saturados y parcialmente saturados, ya que cuando las partículas de los suelos se encuentran en contacto con el agua se puede crear una presión negativa que puede ayudar con la cohesión del suelo o una presión positiva que puede expandir el suelo y alejar las partículas.

Para la medición de presión de poro en suelos cohesivos se pretende utilizar el Aparato de Medición de Presión de Poro de Bishop. Este utiliza un manómetro tipo Bourdon con capacidad de 150 lb/plg² para la medición de altas presiones positivas; un manómetro en forma U de mercurio para la medición de presiones bajas o negativas, y una bureta para la medición del cambio volumétrico de las probetas. También se utiliza un indicador nulo para igualar presiones en las dos secciones del aparato, antes y después de este.

La medición de la presión de poro con el aparato de Bishop y el cambio volumétrico en probetas de los ensayos triaxiales permitirá hacer un mayor número de ensayos en una menor cantidad de tiempo, ya que el laboratorio cuenta únicamente con una máquina que realiza estos tipos de ensayos. Habilitando este aparato se intentará aliviar la demanda de estos tipos de ensayos, así mismo ayudar con la comprobación de resultados de la máquina triaxial existente.

1. PARÁMETROS DE CORTE EN LOS SUELOS

1.1. Esfuerzos efectivos en suelos

Las características de esfuerzo y deformación de los suelos se entienden mejor si se visualiza una estructura de partículas sólidas que encierran espacios vacíos. En casos de suelos saturados estos vacíos se encuentran ocupados por agua y, en casos de suelos parcialmente saturados, se encuentran ocupados por aire y agua. Esfuerzos de corte solo pueden ser resistidos por la estructura de partículas sólidas del suelo.

Se sabe por la mecánica elemental que a un objeto sobre el cual actúa una fuerza normal, sobre una superficie rugosa (figura 1), se hace deslizar en sentido horizontal por una fuerza F . La fuerza F que provoca este deslizamiento es proporcional a P , teniéndose que:

$$F = \mu P$$

Donde μ es el coeficiente de fricción entre las superficies de contacto.

Según el científico francés C. A. Coulomb (1776), los suelos fallan por esfuerzos cortantes a lo largo de planos de deslizamiento y que por el principio mencionado anteriormente rige la resistencia al cortante para ciertos tipos de suelos. El explica que dada una masa de suelo y un plano potencial de falla AA' (figura 1 b) el esfuerzo cortante máximo susceptible de equilibrio y, por lo tanto, la resistencia al esfuerzo cortante del suelo por unidad de ese plano, es proporcional al valor de σ , presión normal en el plano AA' , teniéndose:

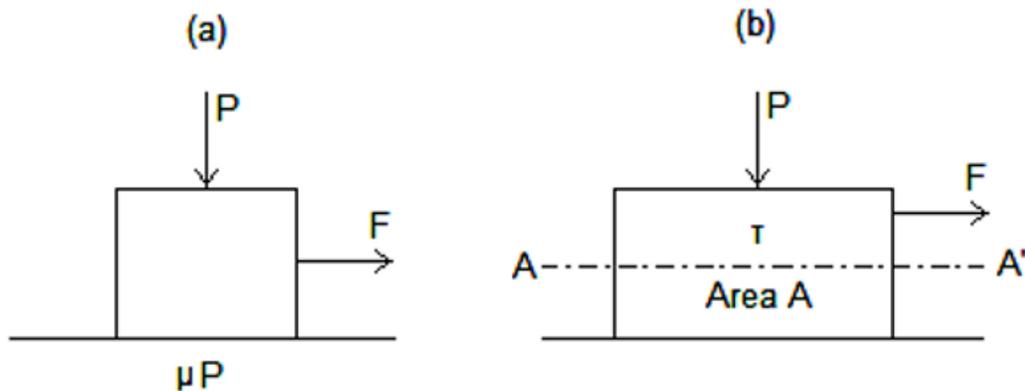
$$\frac{F}{A} = S = \tau_{max} = \sigma \tan \phi$$

De esta relación nace una ley de resistencia, según la cual la falla se produce cuando el esfuerzo cortante actuante, τ , alcanza un valor, S , tal que:

$$S = \sigma \tan \phi$$

La constante de proporcionalidad entre S y σ , $\tan \phi$, fue definida por Coulomb, en términos de un ángulo al cual llamó “ángulo de fricción interna” y definió como una constante del material.

Figura 1. **Mecanismos de los fenómenos de fricción**



Fuente: JUÁREZ BADILLO, E. y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos*. p. 374.

Por otra parte, el esfuerzo normal sobre cualquier plano de las partículas que forman parte de la estructura, es la suma de dos componentes. La primera parte es el esfuerzo resistido por las partículas sólidas y la segunda, la presión del fluido que se encuentra entre los espacios vacíos del suelo.

Esto tiene dos implicaciones importantes desde el punto de vista práctico. En primer lugar, entre la relación del esfuerzo normal y el cambio volumétrico, el factor que controla la relación no es el esfuerzo normal total, si no, la diferencia entre el esfuerzo normal total y la presión del fluido entre los espacios vacíos del suelo, lo que se conoce como *presión de poro*. Esta relación se ilustra mejor en la siguiente formula:

$$\frac{\Delta V}{V} = -C_c(\Delta\sigma - \Delta u)$$

Donde:

$\Delta V/V$ es el cambio volumétrico por unidad de volumen de suelo,

$\Delta\sigma$ es el cambio en esfuerzos normal total,

Δu es el cambio en presión de poro y

C_c es la compresibilidad de la estructura de partículas sólidas del suelo.

La diferencia $\sigma - u$ se conoce como el esfuerzo efectivo y se denota con la sigla σ' .

En segundo lugar, la resistencia a corte de los suelos, como en cualquier material granular, se debe en mayor parte a la resistencia por fricción que resulta entre los puntos de contacto entre partículas de suelo. Esto va en función del componente de esfuerzo normal que resiste la estructura de partículas de suelo y no el esfuerzo normal total. El esfuerzo máximo a corte de cualquier superficie se tiene por medio de la expresión:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u)\tan\phi'$$

Donde:

c' es la cohesión aparente del suelo

φ' es el ángulo de resistencia a corte

σ es la presión normal total al plano considerado y

u es la presión de poro.

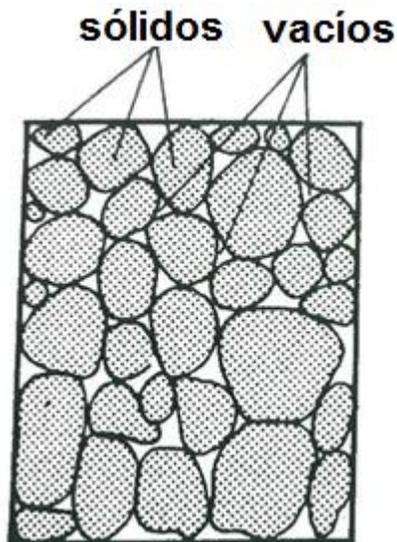
1.2. Presión intersticial

La presión intersticial, también conocido como la presión de poro o presión neutra, se refiere a la presión del fluido que se mantiene dentro de las partículas de un suelo. La presión de poro por debajo del nivel freático se puede medir usando piezómetros, pero solo funciona cuando el suelo se encuentra totalmente saturado. En la zona no saturada, la presión de poro se determina por medio de capilaridad y también se refiere como tensión o succión. Presión de poro en condiciones no saturadas se miden usando tensiómetros.

En los casos más simples, como el caso de agua subterráneo estacionaria, la magnitud de la presión de poro se determina con la posición del elemento de suelo bajo consideración, relativo al nivel freático. La presión de poro es una variable independiente y su magnitud no está relacionada con el esfuerzo normal total.

Se considera que la presión de poro puede mejorar la capacidad de carga de un suelo parcialmente saturado, mientras que la presión entre los espacios del suelo sea bajo en comparación de la presión fuera del suelo. La baja presión entre los vacíos del suelo crea succión debido a la diferencia de presiones que hace que las partículas se junten, haciendo que el suelo pueda resistir mayor carga.

Figura 2. **Matriz de suelo**



Fuente: SMITH, M. J. *Soil mechanics*. p. 1.

1.3. Parámetros de presión de poro A y B

Este concepto se puede entender mejor al imaginar el caso que el suelo es como un esqueleto de partículas comprimible y que el material se comporta de forma elástico isotrópico y que el fluido en los espacios del suelo muestran una relación lineal con el cambio de volumen y esfuerzo. Si se incrementa los tres esfuerzos principales $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, y $\Delta\sigma_3$ resulta una disminución en el volumen $-\Delta V$, donde V es el volumen inicial; a causa de esto incrementa la presión de poro Δu . El incremento en el esfuerzo efectivo sería entonces:

$$\Delta\sigma_1' = \Delta\sigma_1 - \Delta u$$

$$\Delta\sigma_2' = \Delta\sigma_2 - \Delta u$$

$$\Delta\sigma_3' = \Delta\sigma_3 - \Delta u$$

La disminución de volumen en la muestra, sería entonces:

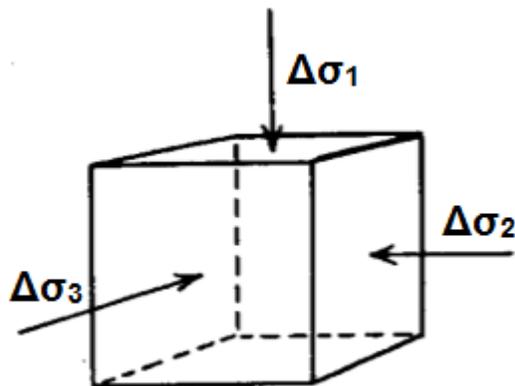
$$-\Delta V = V \cdot \frac{(1 - 2\mu)}{E} \{\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3'\}$$

Donde E y μ son respectivamente el módulo de Young y la relación de Poisson con relación al cambio de esfuerzo efectivo.

El cambio de volumen de la estructura del suelo se debe en mayor parte a la disminución de los espacios vacíos debido a la aplicación de los esfuerzos principales. Si asumiéramos que n es la porosidad inicial, y C_w la compresibilidad del fluido en los espacios vacíos del suelo, el cambio de volumen se relaciona con el cambio de presión con la expresión:

$$-\Delta V = n \cdot V \cdot C_w \cdot \Delta u$$

Figura 3. **Sistema de esfuerzos aplicados a un elemento**



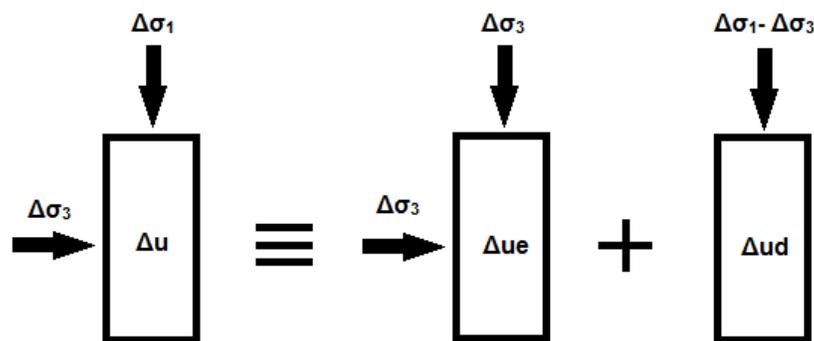
Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. p. 9.

Entonces sigue que:

$$n \cdot C_w \cdot \Delta u = \frac{1 - 2\mu}{E} \{\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3'\}$$

El ensayo triaxial más común que se realiza en trabajos de investigación son con muestras de forma cilíndrica. Estos ensayos normalmente se realizan en dos partes, la primera siendo la consolidación de la muestra en una cámara de confinamiento. Esto provoca que la muestra sea afectada por un esfuerzo normal a la superficie del cilindro en toda su circunferencia. Luego la muestra se incrementa el esfuerzo axial que provoca un cambio en el esfuerzo desviador. En estas condiciones, el esfuerzo menor $\Delta\sigma_3$ y el esfuerzo intermedio $\Delta\sigma_2$, ambos igualan a la presión de confinamiento. El incremento en el esfuerzo desviador es igual a $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$.

Figura 4. **Elemento sometido a carga axial para inducción de los parámetros de presión intersticial**



Fuente: BERRY, Peter L. y REID, David. *Mecánica de Suelos*. p. 198.

El exceso de presión intersticial que se genera en el interior del elemento resulta del cambio en el esfuerzo isotrópico que existe alrededor del elemento y por el cambio del esfuerzo desviador. Siendo Δu_e el exceso de la presión intersticial generado por la aplicación de $\Delta\sigma_3$ y Δu_d , la presión que se induce por la aplicación de $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$, tal que:

$$\begin{aligned}\Delta u &= \Delta u_d + \Delta u_e \\ \Delta u_d &= B \cdot \Delta \sigma_3 \\ \Delta u_e &= A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)\end{aligned}$$

Poniendo $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$ en la ecuación de cambio de volumen se consigue una expresión para el cambio de presión de poro que se puede organizar para representar el cambio de la presión de confinamiento ($\Delta \sigma_3$) y el esfuerzo desviador ($\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$):

$$\Delta u = \frac{1}{1 + n \left(\frac{C_w}{C_c} \right)} \left\{ \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right\}$$

Donde $C_c = 3(1 - 2\mu)/E$, es la compresibilidad de la estructura del suelo.

Se entiende ahora que el cambio en la presión de poro generalmente se va a provocar primeramente por un cambio en la presión de confinamiento, y segundo, por el cambio en el esfuerzo desviador. Se debe de entender que las características del cambio volumétrico de la estructura de suelo son relaciones no lineales y que el principio de superposición es válido solamente bajo ciertas condiciones. El valor de C_w es constante solo si el suelo está completamente saturado. Los cambios correspondientes de la presión de poro entonces son expresados en dos parámetros experimentales **A** y **B**, donde:

$$\Delta u = B \{ \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \}$$

En el caso de muestras de suelo completamente saturadas, el valor de C_w es tan pequeño que $B=1$ dentro de los límites de exactitud del experimento. El valor de A depende mayormente en que si la muestra es normalmente

consolidada o sobre consolidada y la proporción del esfuerzo a la falla aplicada. Para muestras parcialmente saturadas, el valor de C_w es mucho mayor debido a la presencia de vacíos en la muestra. El valor de B en este caso resulta siendo menor que 1, pero varía dependiendo del rango de esfuerzos aplicados. El valor de B que aplica durante la aplicación del esfuerzo desviador es menor a la que aplica durante la incrementación del esfuerzo de la cámara. Por esta razón, nos resulta conveniente que no se separen los términos del producto entre A y B pero denotarlo como \bar{A} y escribir la ecuación anterior como:

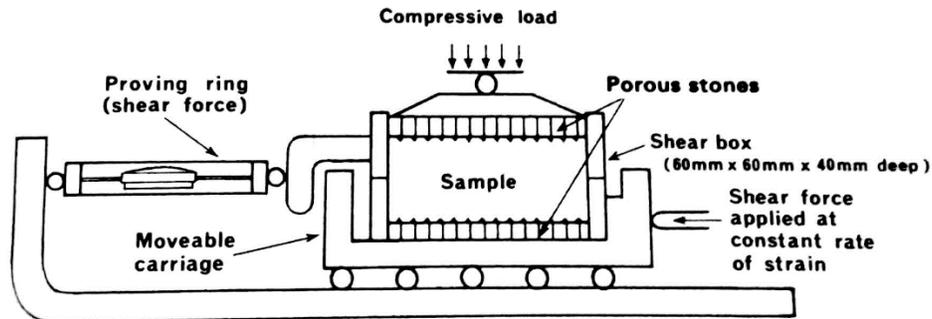
$$\Delta u = B \cdot \Delta \sigma_3 + \bar{A}(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

1.4. Pruebas de resistencia al corte

1.4.1. Ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo es un ensayo simple para encontrar la resistencia a corte de un suelo. Se trata de aplicar una fuerza a la muestra a ensayar, de tal forma que la muestra se corte y se deforme a una razón constante. La resistencia a corte se mide con un anillo de carga y el valor máximo que se alcanza al fallar, es el esfuerzo cortante que resiste la muestra. La resistencia a corte se puede buscar con la muestra siendo sujetado a cargas compresivas variables que emulan esfuerzos de confinamiento al punto donde se aplica el esfuerzo cortante. Luego, se plotea una gráfica de la resistencia a corte contra carga de compresión, que normalmente describe una recta.

Figura 5. Aparato del ensayo de corte directo



Fuente: SMITH, M. J. *Soil mechanics*. p. 83.

De este método se obtiene la ecuación de la recta, la cual se conoce como la Ley de Coulomb, que en su forma más simple se denota como:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante

σ es el esfuerzo compresivo total

c es la cohesión aparente del suelo

ϕ es el ángulo de fricción interna

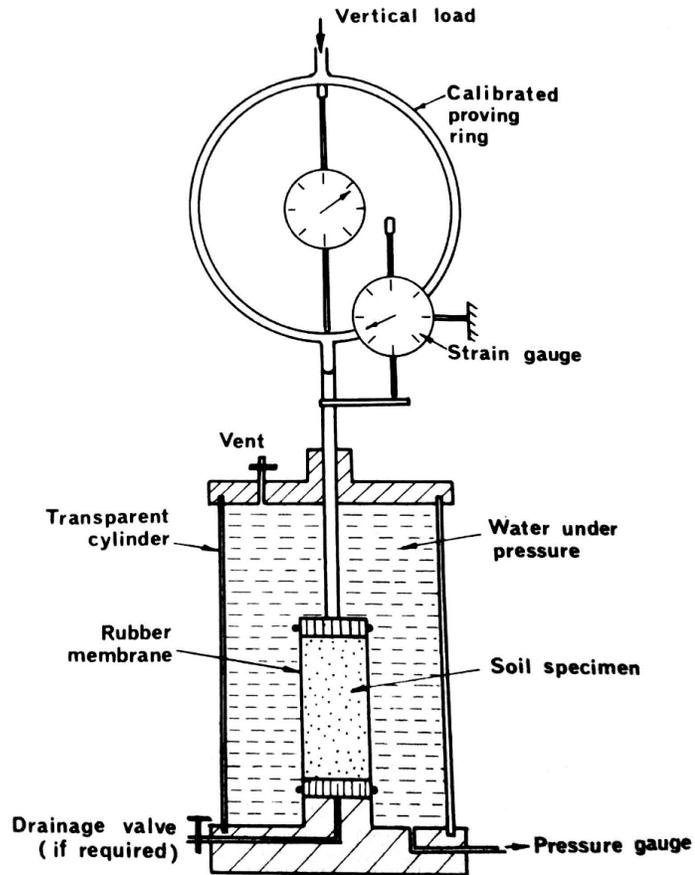
Aunque el método de corte directo sea simple para demostrar la Ley de Coulomb, es difícil para realizar el ensayo con una muestra inalterada y la distribución de esfuerzos no se puede determinar con mucha certeza.

1.4.2. Ensayo triaxial

El ensayo triaxial es el método más común de realizar ensayos de resistencia a corte en los laboratorios de mecánica de suelos. La muestra que se utiliza en este tipo de ensayo se extrae con un tubo de 2,5 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de altura, con tapas en los extremos y cubierta, con una membrana para prevenir pérdida de humedad. También se utilizan cilindros de 1,5 pulgadas de diámetro y 3 pulgadas de alto, en casos de suelos altamente cohesivos.

La muestra preparada se coloca en posición dentro de la cámara de confinamiento para ser ensayada. A la cámara de confinamiento luego se le aplica una presión medida y a la muestra se le aplica esta carga de confinamiento, de tal forma que simule las condiciones del estado del suelo en que se extrajo la muestra. Esta presión es similar a la presión que ejerce todo el suelo que rodea la muestra. Esta carga de confinamiento se conoce como el Esfuerzo Principal Mínimo.

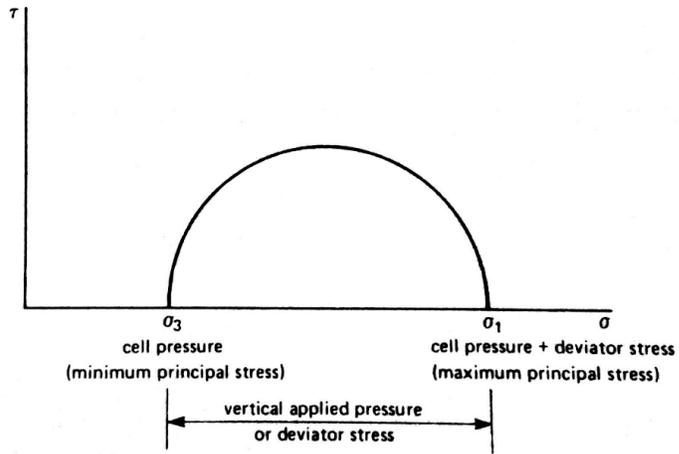
Figura 6. **Aparato de ensayo triaxial**



Fuente: SMITH, M. J. *Soil mechanics*. p. 86.

Luego se procede a cargar verticalmente la muestra a una razón constante de deformación, hasta que la muestra falle. Esta presión aplicada al momento de falla, conocido como esfuerzo desviador, se mide por medio de un anillo de carga y se suma a la presión de confinamiento para conseguir el esfuerzo principal máximo.

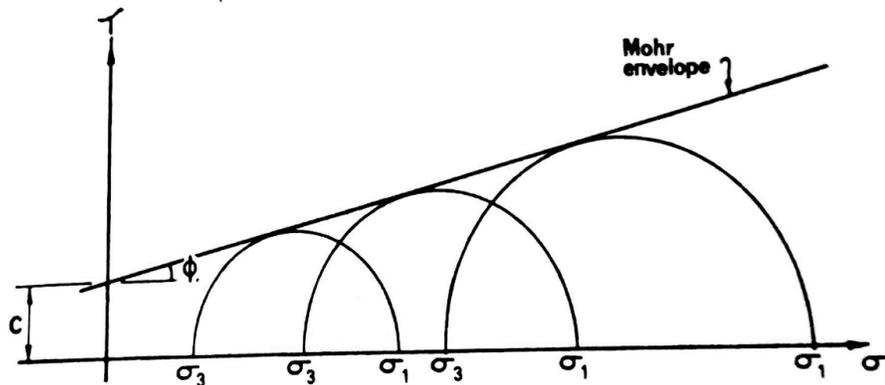
Figura 7. **Círculo de Mohr**



Fuente: SMITH, M. J. *Soil mechanics*. p. 87.

Con el valor máximo y mínimo de esfuerzo principal al punto de falla obtenido del suelo, se puede dibujar un círculo de Mohr. Si se realiza una serie de estas pruebas con diferentes presiones de confinamiento, se puede dibujar una serie de círculos de Mohr. Esta serie de círculos deben de tener una tangente común que se conoce como la, Envolvente de Mohr.

Figura 8. **Envolvente de Mohr**



Fuente: SMITH, M. J. *Soil mechanics*. p. 87.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

2.1. Cámara de confinamiento

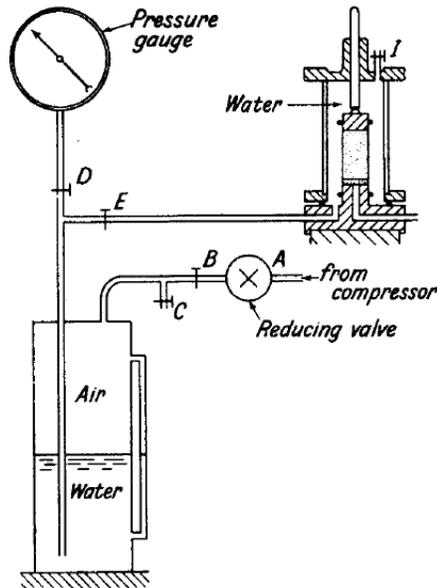
Por lo regular la cámara de confinamiento se fabrica utilizando una plancha de plexiglás de 3/8 de pulgada de grosor, la cual se dobla y se junta para hacer el cilindro de confinamiento. La junta se reconoce como punto débil en esta estructura y se puede fatigar y romper, por lo cual se utilizan unas bandas de metal circunferenciales. En los ensayos con suelos parcialmente saturados, donde se tiene que medir con precisión la cantidad de agua que entra y sale de la cámara de confinamiento, estas bandas ayudan con las deformaciones, reduciendo las correcciones que se deben realizar por la elasticidad del plexiglás.

Para reducir la carga en el collar de en parte debajo del cilindro, las 6 barras que amarran el cilindro en su lugar pasan la plancha de base de abajo. El sello se logra con un empaque que se encuentra en la base.

2.2. Sistema de presión de poro

El sistema de presión de confinamiento del laboratorio de suelos se compone de un compresor de aire que proporciona la presión necesaria de confinamiento en los ensayos de triaxial realizados. El aire interactúa con la superficie de agua que suministra agua a la cámara de confinamiento del aparato.

Figura 9. Esquema de sistema de presión de confinamiento



Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. p. 45.

El aire pasa por una válvula reductora A y la admisión de aire al depósito con agua se controla con otra válvula ordinaria B. La válvula C ayuda a controlar la presión en el tanque de agua con aire. La válvula D controla el paso de agua al manómetro para medir la presión del agua, y la válvula E controla el paso del agua a la cámara de confinamiento.

La dificultad de este esquema es la variación de presión dentro del sistema debido a los cambios de temperatura después de sellar el depósito de aire y agua, también la solubilidad de aire en el agua y la pérdida por medio de fugas en el sistema. El agua en la cámara de confinamiento también puede contener agua disuelta. Esto puede causar que se registren datos erróneos a la hora de medir cambio volumétrico o presión de poro, debido a la alta permeabilidad con respecto al aire de la membrana que contiene la muestra.

2.3. Sistema de medición de Bishop

Los métodos más comunes de medir presión son el manómetro de mercurio y el manómetro tipo tubo de Bourdon. Estos métodos de medición no se pueden aplicar directamente a la medición de presión de poro en una muestra pequeña de suelo, debido al volumen de agua contenido en los poros del suelo que debería fluir a los aparatos de medición para que puedan registrar un valor.

Hacer fluir el agua en el poro del suelo modifica el valor de presión de poro real del espécimen que se quiere medir. También en muestras de alta plasticidad, hacer fluir el agua que contiene la muestra puede resultar en un atraso en la medición de este dato. Estas dificultades se pueden minimizar utilizando el método de indicador nulo, en conjunto con el aparato Bishop para la medición de presión de poro y cambio volumétrico.

2.3.1. Indicador nulo

La conexión para medición de presión de poro se conecta por medio de una válvula al extremo de un manómetro en U de mercurio por medio de b. En el extremo del manómetro en U en c, se coloca un manómetro tipo Bourdon en d y un pequeño cilindro en e, que contiene un émbolo por el cual se puede desplazar el agua y ajustar la presión en el sistema.

Un cambio de presión por causa de la presión de poro en la muestra tiende a desplazar el mercurio en el manómetro en U por el lado b. Esto se regresa a su posición original por medio del cilindro y émbolo en e, para incrementar la presión del otro lado del sistema, y se registra en el manómetro en d; el único flujo de presión de poro ocurre en

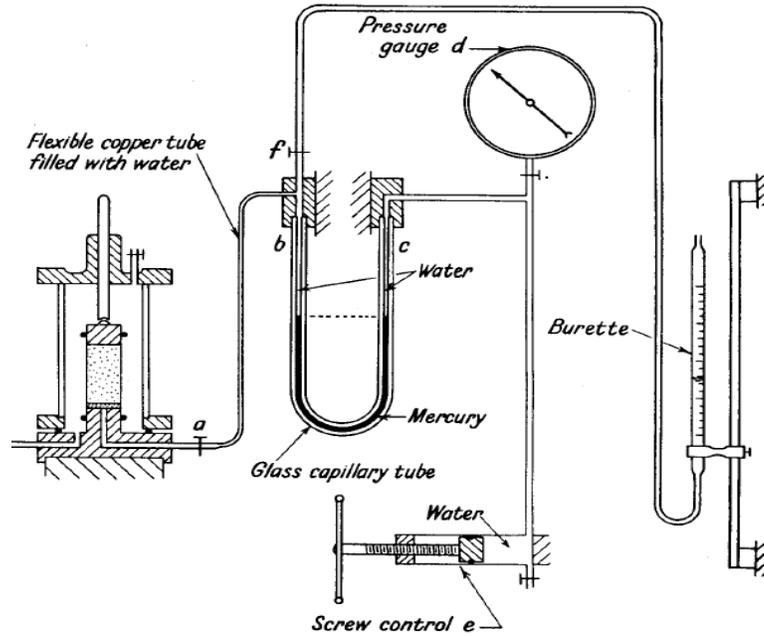
la manguera que une los puntos a y b. La deformación en esta manguera se toma como nulo en casos prácticos.

Figura 10. **Indicador nulo**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 14 de diciembre 2016.

Figura 11. Esquema del aparato original para medición de presión de poro y cambio volumétrico.



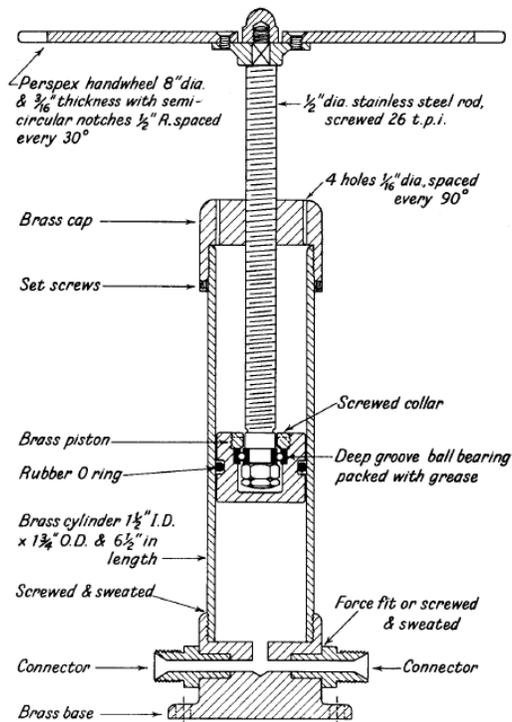
Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. p. 53.

Las burbujas de aire en el sistema son las principales causas de la toma de datos erróneos. Para eliminar esta posibilidad y evitar el problema que podría resultar del alineamiento de los puntos del manómetro en su posición original, se cambió el manómetro en U por una única pieza de vidrio, un tubo capilar. El proceso de desairado se logra por medio de la remoción del depósito de mercurio por debajo del tubo capilar y permitir que agua fluya por el sistema, hasta eliminar el aire del sistema.

2.3.2. Cilindro de control

El cilindro de control es un tubo de latón de 1 ½" de diámetro interno y 1 ¾" de diámetro externo. Este cilindro de 1/8" de grosor resiste hasta 150 libras por pulgada de presión. El émbolo está hecho de un pistón de latón con una junta tórica. Este pistón se ajusta por medio de un tornillo y dentro del pistón se encuentra un cojinete que amortigua el golpe de ariete. La barra con rosca contiene 26 roscas por pulgada de largo de barra que pasa por una tuerca que forma la tapa del cilindro. La barra se ajusta por medio de una rueda de plexiglás de 8 pulgadas de diámetro y puede mover el pistón hasta 5 pulgadas dentro del cilindro.

Figura 12. Esquema de Cilindro de Control



Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test.* p. 57.

2.3.3. Manómetro tipo Bourdon

El Manómetro tipo Bourdon es el tipo más común para medir presiones en muchas aplicaciones de ingeniería y se utilizan para medir medias a altas presiones. Tienen un rango de medida de 600 milibares hasta 4,000 bares. El elemento de medición es un tubo curvo con una forma en espiral, comúnmente llamado un tubo Bourdon. Este tubo se mueve hacia afuera cuando la presión dentro del tubo es mayor que la presión externa, y hacia el interior cuando la presión interna es menor. Este movimiento es proporcional a la presión a medir, y que está acoplado al mecanismo puntero.

2.3.4. Manómetro de tubo U

El manómetro de mercurio en U sirve para medir presiones de poro negativas o muy pequeñas. En algunos casos, al momento de medir la presión de poro del suelo, pueda ser que esta presión sea muy pequeña o los vacíos entre partículas se encuentren en succión. Como el manómetro tipo Bourdon solo registra datos de gran magnitud positivos, es necesario el manómetro tipo U. En el aparato de medición que se pretende rehabilitar, se usará un tubo de polietileno de 1/8" de diámetro interno, relleno de mercurio para ser utilizado como manómetro de medición de presiones pequeñas o negativas.

2.3.5. Calibración del aparato

Primero que todo se debe asegurar que el aparato sea desairado. En los aparatos nuevos, o que no se usan en mucho tiempo, pequeñas burbujas de aire u otros gases tienden a adherirse a las paredes de los varios tubos que tiene el aparato. Se desenrosca el traste de mercurio de la parte de abajo del

tubo de vidrio del indicador nulo en g (figura 6), hasta que el mercurio queda fuera del tubo. Esto permite la libre circulación del agua por todo el sistema, hasta que se desaira toda la línea.

No se acostumbra a colocar la presión del manómetro al mismo nivel de presión de la muestra. La diferencia de presiones entre la superficie de mercurio en el tubo capilar y el traste de mercurio necesita una lectura de cero presión de poro en el manómetro en U y el manómetro tipo Bourdon. Es de cierta ventaja dejar los niveles de mercurio con una diferencia considerable de nivel, ya que esto asegura que los manómetros tienen una presión positiva ejercida sobre ellos.

Para obtener la lectura en cero, después de que el aparato se haya desairado, se abre la válvula f (figura 6), y el agua en el tubo con graduaciones llegue a la mitad de la altura de la muestra siendo ensayada. El control de rosca se utiliza para ajustar la altura del mercurio en el tubo capilar a cierta altura conveniente para realizar el ensayo que está marcado; las lecturas de los manómetros se anotan. Estas son las lecturas en cero que corresponden a la presión atmosférica a la mitad de la altura de la muestra siendo ensayada, y todos los cambios de presión de poro se toman con respecto a estas lecturas.

Las lecturas en cero dependen del nivel del mercurio que se escoja. Por lo regular se escoge un nivel que dé una lectura de un número entero en la escala manómetro. Luego la escala se coloca en cero a este nivel para luego no tener que realizar más correcciones. Suponiendo que el nivel de la muestra siendo ensayado quede aproximadamente constante, la lectura en cero también debe quedar constante. Se debe de tomar unos pocos segundos para realizar este chequeo, porque este indicará si hay presencia de aire en el sistema,

desplazamiento en la calibración de manómetro tipo Bourdon, o pérdida de mercurio del sistema.

Un punto importante que cuando el esfuerzo de confinamiento y la presión de poro son valores relativamente altos, se tiene que saber con precisión estos valores cuando se quiere saber el esfuerzo efectivo, ya que es la diferencia entre ellos. Se puede calibrar directamente el aparato de medición de presión de poro contra la presión de cámara de confinamiento, utilizando primero, una cámara de confinamiento que contenga solamente agua. La presión del manómetro tipo Bourdon, en este caso, queda igual al de la cámara de confinamiento. El uso de este tipo de calibración directo minimiza errores que puedan resultar en la medición de la diferencia de dos grandes cantidades.

2.3.6. Conexión a la cámara de confinamiento

También es importante que no haya aire atrapado entre la base de la cámara de confinamiento, y que la conexión entre la cámara y el tubo de cobre que sale de ella esté completamente sin fugas. Cuando se utilizan uniones de cobre en forma de cono, es buena idea girar el tubo en los dos sentidos con la tuerca floja para asientar el cono en su lugar antes de apretar la tuerca. Esto minimiza la posibilidad de tener fugas en este tipo de unión.

Luego, la base de la cámara de confinamiento se debe de sumergir en agua caliente, antes de desairar el sistema. Después de desairar el sistema, el agua que aparece en el orificio del pedestal central, debe de estar libre de burbujas de aire cuando agua de la bureta (figura 6) regrese al orificio por medio de la válvula a.

En el caso de ensayos consolidados no drenados en una muestra de arcilla no saturada, es buena idea conectar una bureta directamente a la base de la cámara de confinamiento para poder medir cambio volumétrico durante la consolidación o hinchamiento, y para conectar el equipo para medición de presión de poro, solo cuando sea necesario al momento de comenzar el ensayo triaxial. Es suficiente sumergir la base de la cámara de confinamiento en agua helada desairada al momento de intercambiar las conexiones. Como precaución, ante una burbuja de gas que se pueda quedar atrapada entre la base de la muestra y el conector, un pedazo de tubería de polietileno de pequeño diámetro se puede colocar en el paso de la línea de succión. Esto circula el agua y remueve las burbujas de aire.

Aire también se debe eliminar de los discos porosos que se colocan en la base de la muestra. Esto se logra sumergiendo las piedras en agua e hirviéndolas en un vacío y manteniéndolas bajo agua hasta que se necesiten.

2.3.7. Observaciones generales

La presión de poro se puede medir con una certeza de 0,1 lb/pulg² si el tubo capilar está relativamente limpio, el único factor limitante es la calibración de los manómetros. La certeza de la medición de presión de poro en condiciones sin flujo depende de la efectividad de la técnica del proceso de desairado y de la habilidad del operador de mantener el nivel del mercurio a una altura constante durante todo el ensayo. La mantención del nivel de mercurio no resulta siendo problema cuando el cambio de presión de poro se debe a cambios de esfuerzo de corte y estos ocurren de manera suave y frecuente. Puede haber dificultades cuando se baja la presión de confinamiento, si se efectúa muy rápidamente. Es mejor realizar buen control sobre la razón de cambio de presión.

Un error que se comete comúnmente en el aparato de medición de presión de poro es en la operación, cuando se deja abierto la válvula a antes de aliviar la presión de la cámara de confinamiento al final del ensayo. El cambio de presión drástico entre las dos partes del aparato hace que el mercurio se dispare hacia la base donde se coloca la muestra ensayada.

2.4. Sistema de medición de cambio volumétrico

2.4.1. Cambio volumétrico en ensayos no drenados

En muestras saturadas, el cambio en volumen se asume ser cero, y ninguna medición se toma. En muestras parcialmente saturadas, ocurre un cambio volumétrico por la compresibilidad y solubilidad del aire u otros gases en el agua en los poros. Esto se mide observando la cantidad de agua que entra o sale de la celda donde está la muestra o cómo va variando la carga de confinamiento y la carga axial. Para realizar esta observación es necesario medir el desplazamiento del agua de la superficie libre entre la fuente de agua a la celda y otro fluido. Esta superficie puede ser la franja entre agua y mercurio en un cilindro de control de presión constante.

Por lo general se desea utilizar un cilindro de diámetro pequeño para que el instrumento pueda proporcionar datos más precisos a la hora de medir volúmenes. En estos casos se busca un instrumento como un manómetro de mercurio de auto compensación, con un resorte que se ajuste, de tal forma que no permita una significativa pérdida de presión a la hora de desplazar el mercurio.

2.4.2. Cambio volumétrico en ensayos drenados

Con una muestra completamente saturada, un cambio volumétrico solo se puede lograr bajo la acción de una carga de confinamiento o de una carga axial, si se deja drenar agua de la muestra. El volumen de agua que se extrae de la muestra es una medida directa del cambio volumétrico, y se puede medir usando una bureta. Por lo regular se utiliza una bureta de 10cc para muestras altamente cohesivas y, para muestras con partículas de mayor tamaño, se tiende a utilizar una bureta de 100cc.

Con suelos altamente cohesivos un error significante ocurre al aplicar la carga de confinamiento, debido al aire atrapado entre la membrana y la muestra a ensayar. Como este aire puede afectar las lecturas en otras etapas del ensayo, si este aire pasa a la conexión de la bureta, la mayoría de las veces se remueve el aire llenando el espacio entre la membrana y la muestra con agua, antes de sellar la membrana. La mayor parte de esta agua se puede remover con bajar la bureta unos pies debajo de la celda que contiene la muestra para crear una succión, pero siempre queda un poco de probabilidad de que haya errores en la lectura. Este error se puede estimar determinando el cambio en contenido de agua durante el ensayo, que proporciona una medida independiente del cambio de volumen total de una muestra completamente saturada.

Alternativamente se puede utilizar una mayor presión de confinamiento para mantener una presión positiva en el agua de los poros de la muestra, para conducir el aire a solución. Esto significa que se necesitaría un indicador de volumen que trabaje bajo presión. Para medidas precisas en muestras que tengan cambios de volumen pequeñas, se puede usar un tubo en U calibrado que contenga mercurio, donde uno de los extremos se conecte a la salida de la

celda que contiene la muestra, y el otro se conecte a un sistema de presión constante.

Drenaje de muestras parcialmente saturadas resulta en una mezcla de agua y aire que llega a la bureta. Para medir el volumen de las dos fases de fluido, se puede utilizar dos buretas. Se utiliza una bureta invertida para medir el volumen del gas, y el segundo se utiliza para medir el cambio de volumen total de la muestra. Se deben igualar los niveles de agua antes de tomar medidas.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Preparación de la muestra

La selección, preparación y ensayo de muestras de suelo depende de muchos factores y es considerada la primera parte de una investigación completa del sitio sobre la cual se hará el estudio. Un ingeniero que se familiarice con los factores de planeamiento del sitio de investigación y la selección de muestras a ensayar, debe encargarse del laboratorio de suelos o, por lo menos, supervisarla. El ingeniero debe saber el tipo de geología que existe en el sitio y el tipo de estabilidad o análisis de la deformación en la que se deben aplicar los resultados.

3.1.1. Preparación de muestras inalteradas

Las muestras inalteradas se extraen del suelo por medio de un pozo a cielo abierto con la profundidad indicada por un experto en mecánica de suelos. Normalmente el tamaño de la muestra es de 1 pie cúbico y al momento de extraerlo del suelo, la muestra se cubre con una capa de parafina para evitar su contaminación o la pérdida de humedad. La pérdida de humedad en la muestra puede cambiar propiedades mecánicas del suelo.

Para poder realizar un ensayo triaxial de la muestra de suelo, se puede extruir anteriormente o se talla una porción lo más cerca de un cilindro de dimensiones de su altura, siendo dos veces su diámetro. En el caso del experimento conducido en este reporte, la altura de los cilindros utilizados es de 5,6 pulgadas con diámetro de 2,8 pulgadas.

3.1.1.1. Equipo a utilizar

- Martillo de goma
- Cuchillo
- Espátula
- Tallador de muestra
- Cierra de hilo
- Enrasador
- Bandeja

3.1.1.2. Procedimiento

Se corta un prisma de suelo del pie cúbico de muestra inalterada. Luego se arma el tallador de muestras con sus platinas para detener el prisma de suelo. Las platinas se colocan en el lado superior e inferior del prisma de suelo.

Se coloca el tallador encima de una bandeja. Ya colocada y asegurada la muestra en el tallador, se ajusta para darle el diámetro deseado a la probeta. Utilizando la cierra de hilo, se procede a cortar los lados del prisma de suelo hasta que el lado de la probeta quede del diámetro deseado.

Se retira la probeta del tallador y se coloca inmediatamente en el enrasador. Utilizando un cuchillo o espátula se corta la probeta a la altura requerida para realizar el ensayo.

Figura 13. **Equipo para tallar muestra de suelo**



Fuente: HUMBOLDT, *Testing equipment for Construction materials*. p. 69.

3.1.2. **Preparación de muestras remoldeadas**

Las muestras remoldeadas de suelo se hacen para tipos de suelos que no son tan cohesivos. Cuando la muestra es muy difícil de manejar o se siente que se deshace al intentar darle forma, sea porque el suelo este muy seco o las propiedades mecánicas del suelo no lo permitan.

3.1.2.1. **Equipo a utilizar**

- Cilindro moldeador con base
- Molde de diámetro de 2,8 pulgadas
- Espátula
- Cuchara pequeña
- 3 casquetes
- Martillo de goma
- Brocha
- Bandeja

Figura 14. **Equipo para remoldear la muestra**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.1.2.2. Procedimiento

Primero que todo se debe tener antemano la densidad de suelo. Esta densidad se multiplica por el volumen del molde de diámetro de 2,8 pulgadas para obtener el peso de la probeta. Este peso se divide en tres y se utiliza para llenar cada casquete.

Se procede a engrasar los lados del molde de la probeta con un poco de aceite, o se puede colocar una lámina de plástico sobre cada lado, para evitar que se pegue la probeta de suelo al molde. Se arma el molde de la probeta sobre la base del moldeador y se llena la primera capa del molde con un casquete. Se martilla la capa con el cilindro moldeador hasta que llegue a la primera línea desde arriba del moldeador que está marcada en él y se retira.

Para la segunda capa se echa el segundo casquete y se coloca el cilindro moldeador. Se procede a martillar el cilindro hasta que llegue a la segunda línea desde arriba del moldeador y se retira.

Se coloca el adaptador de altura del molde y se echa la última capa. Se coloca el cilindro moldeador y se procede a martillar hasta llegar a la segunda línea macada desde arriba del cilindro y se retira. Se enrasa la parte de arriba de la probeta y se desarma el molde.

3.2. Procedimiento para muestras no drenadas

El ensayo estándar de compresión triaxial no drenado se realiza bajo presión constante en la cámara de confinamiento. Esto significa que la presión mínima de confinamiento se mantiene en un valor constante y la presión mayor principal se incrementa hasta provocar la falla. Este ensayo se puede realizar con o sin la medida de presión de poro, dependiendo del tipo de material que se va ensayar y el tipo de análisis en que se desea utilizar los resultados.

Para ensayos no drenados con medición de presión de poro, se coloca un disco de piedra porosa en la base de la cámara de confinamiento para poder habilitar el aparato de Bishop. Este ensayo normalmente se utiliza para ensayar materiales compactados utilizados como relleno de terreno. La presencia de vacíos en el material provoca una disminución de volumen que causa un incremento en el esfuerzo efectivo.

3.2.1. Ejemplo ilustrativo

Una membrana se coloca encima de la muestra con la ayuda de un cilindro de metal de aproximadamente 5 pulgadas de largo y 3 pulgadas de diámetro. La membrana se dobla por encima de las puntas del cilindro y se aplica succión al espacio entre la membrana y la pared del cilindro. Esto ayuda a que la membrana pase por encima de la muestra y no la dañe.

Figura 15. **Muestra cubierta con membrana**

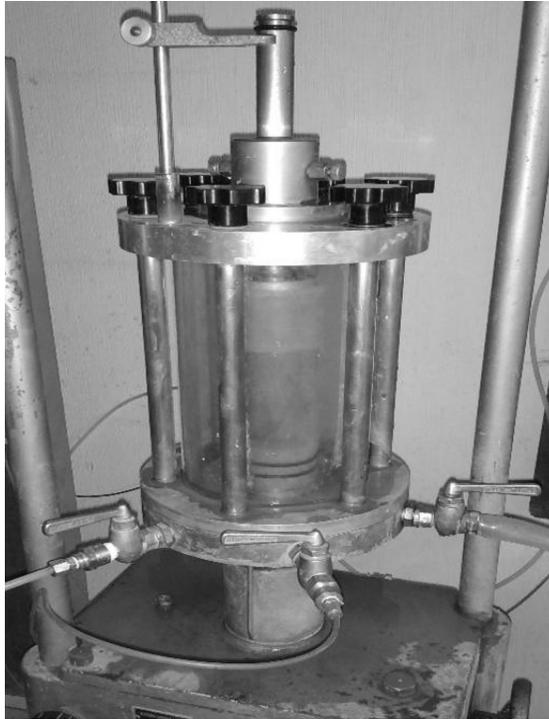


Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dos anillos tóricos se utilizan para sellar los extremos de la membrana en la parte inferior y en la parte superior. Se pueden estirar los anillos sobre el tubo que sostiene la membrana y se resbalan encima de los extremos utilizando los dedos. Esto sujetará la membrana contra el disco de plexiglás en la parte inferior y en la tapa de carga en la parte superior y así prevenir la infiltración del agua de la cámara de confinamiento hacia la muestra.

La parte superior de la cámara de confinamiento se coloca por encima de la muestra cuidadosamente con el pistón de carga alzada al límite superior de su desplazamiento. Con la cámara en su posición final se suelta el pistón de forma lenta hasta llegar a tocar con la tapa de carga y se revisa el alineamiento de la muestra. Al estar bien colocado el pistón, se procede a apretar los tornillos que aseguran o sellan la cámara de confinamiento.

Figura 16. **Cámara de confinamiento**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

La cámara de confinamiento se procede a llenar de la fuente principal. Se asegura que los tornillos en la parte superior de la cámara de confinamiento se encuentren flojos y permitan el desairado de la cámara de confinamiento. Se prefiere que el llenado sea de forma lenta y se trate de evitar el flojo turbulento de agua, ya que esto permite que generen burbujas de aire que son difíciles de remover. Las burbujas de aire en la cámara de confinamiento pueden modificar las lecturas de presión al realizar el ensayo, ya que estos colapsan y permiten mayor compresibilidad del agua.

3.2.2. Análisis de resultados

Estos ensayos se pueden realizar de dos formas: (a) sin medición de presión de poro o (b) con medición de presión de poro. Los ensayos sin la medición de presión de poro, normalmente se utilizan solo para muestras cohesivas completamente saturadas, sean inalteradas o muestras remoldeadas. Se coloca un disco de plexiglás en la base de la cámara de confinamiento antes de colocar la muestra para deshabilitar el aparato de Bishop.

3.3. Procedimiento para muestras no consolidadas no drenadas

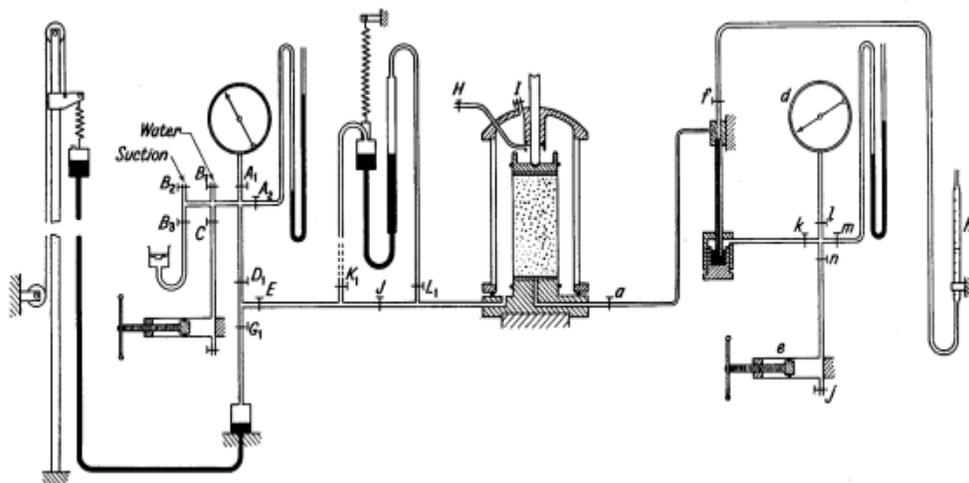
Este método de ensayo normalmente se utiliza para ensayar muestras compactadas de materiales con el propósito de ser utilizado como relleno. Como en estos ensayos se encuentran muchos espacios vacíos en el interior de la muestra, un incremento en la cámara de confinamiento tiende a causar un decremento en el volumen de la muestra y, a la vez, un incremento del esfuerzo efectivo. Con los resultados obtenidos del ensayo a diferentes presiones de confinamiento, se puede plantear una envolvente de falla y determinar el esfuerzo efectivo si se mide y determina la presión.

Para estos tipos de ensayos normalmente se utilizan probetas de 4 pulgadas de diámetro. Para fines de este trabajo se utilizaron probetas de 2,8 pulgadas con una altura de dos veces el diámetro, 5,6 pulgadas de altura en este caso.

3.3.1. Ejemplo ilustrativo de ensayo tipo no consolidado no drenado

A continuación se puede ver el esquema completo del aparato de Bishop junto con el aparato para medir volumen. Se debe revisar la base de la cámara de confinamiento para asegurar que no haya burbujas de aire en él, ya que esto puede arrojar datos erróneos al correr el ensayo e intentar medir la presión de poro. Se corre agua de la bureta *h* con las válvulas deletreadas *a* y *f* abiertas, a la vez se aumenta la presión en el sistema utilizando el cilindro de control en el punto *e*. Durante este proceso se nota si se liberan burbujas de aire de la base de la cámara de confinamiento. La parte que mide presión de poro se revisa para ver el nivel de mercurio. Aumentando la presión en la parte que mide presión de poro cerrando el cilindro de control en *e*, asegurándose de cerrar la válvula *a* y *f*, se observa cómo se expulsa el mercurio de la base del indicador nulo.

Figura 17. Esquema del aparato para muestras no drenadas para suelos parcialmente saturados



Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. p. 99

Se coloca un disco poroso en el pedestal en la base de la cámara de confinamiento. Este disco se debe saturar por completo en agua hervida o en una cámara con agua al vacío.

La muestra se procede a ser pesada, se toma nota de las dimensiones de la probeta y se coloca en el pedestal sobre la piedra porosa que se encuentra completamente saturada. En la parte superior de la muestra se coloca una tapa con la conexión del drenaje tapado y enseguida se le coloca la membrana alrededor de la muestra, con el aparato para estirar la membrana. Se le coloca, por lo menos, una rondana de hule en la tapa de arriba de la muestra y una en la parte de abajo en el pedestal, esto es necesario para que se selle la muestra y no le entre agua de la cámara de confinamiento.

Luego de posicionar la muestra y aplicarle la membrana, se procede a colocar la parte de arriba de la cámara de confinamiento con el pistón levantado en la máxima posición de arriba de su recorrido. Se aseguran los seis tornillos a la base del pedestal con la misma presión cada uno. Luego se abren las válvulas **D₁**, **E**, **J**, **H**, e **I** y se deja que se llene la cámara de confinamiento. La válvula **D₁**, **E** y **J** permiten el paso de agua de la fuente a la cámara de confinamiento, mientras que las válvulas **H** e **I** permiten que escape el aire de la cámara de confinamiento y evita que se genere presión en la cámara que pueda perturbar la muestra.

Se procede a elevar la presión de la cámara de confinamiento utilizando el sistema de aire como se muestra en la siguiente figura. Esto se logra simplemente al sustituir el sistema de mercurio en la válvula **G₁** con el sistema de aire. Después de llegar a la presión de confinamiento deseada, se ajusta el cilindro de control en el punto **e** para asegurar que el sistema tenga suficiente presión positiva en ese lado del sistema, para hacer subir el mercurio en el

indicar nulo. Esto asegura que se pueda registrar lecturas de presión de poro en el aparato de Bishop. Se deja la muestra con la presión requerida por lo menos media hora para que llegue al equilibrio la presión en ambos lados del sistema. Se habilita el aparato de medición de cambio volumétrico cerrando la válvula **J** y abriendo las válvulas **K₁** y **L₁** simultáneamente. En este punto la muestra está lista para ser ensayada.

La presión de poro y la lectura de volumen se notan. El pedestal de carga se levanta para hacer llegar el pistón, de la cámara de confinamiento al anillo de carga. Luego se hace correr el motor para levantar el pedestal y hacer que el dial de carga empiece a registrar lecturas. Esta acción también asegura que el pistón esté haciendo contacto con el anillo de carga.

3.3.2. Análisis y comparación de resultados

En este trabajo de graduación se realizó un par de ensayos triaxial no consolidado no drenado. A continuación se presentan los resultados de dichos ensayos.

Fecha: Guatemala 20 de julio de 2017

Muestra no: 1

Descripción de suelo: limo arenoso color café

Tipo de ensayo: no consolidado no drenado (UU)

Tipo de muestra: Remoldeada

Máquina utilizada: Aparato de Bishop

Tabla I. **Humedad de la muestra no. 1**

| Humedad | | |
|--------------|-------|-------|
| # Recipiente | E-9 | E-10 |
| PBH (gr.) | 48,93 | 45,94 |
| PBS (gr.) | 39,82 | 38,16 |
| Tara (gr.) | 24,22 | 24,67 |
| DIF (gr.) | 9,11 | 7,78 |
| PNH (gr.) | 24,71 | 21,27 |
| PNS (gr.) | 15,60 | 13,49 |
| W (%) | 58,40 | 57,67 |
| W prom. | 58,30 | |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla II. **Densidad específica de la muestra no. 1**

| Muestra No. 1 | | |
|----------------------------------|--------|--------|
| W_h (gr.) | 448,76 | 468,07 |
| W_p (gr.) | 495,40 | 514,32 |
| W_a (gr.) | 117,26 | 118,00 |
| γ_p (gr/cm ³) | 0,88 | 0,88 |
| $W_p - W_h$ | 46,64 | 46,25 |
| V_p (cm ³) | 53,00 | 52,55 |
| $V_a = W_p - W_a$ | 378,14 | 396,32 |
| $V_h = V_a - V_p$ | 325,14 | 343,77 |
| γ_h (gr/cm ³) | 1,38 | 1,36 |
| γ_h prom. | 1,37 | |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla III. **Datos de la tabla de cargas del ensayo tipo UU de la muestra no. 1 medido con el aparato de Bishop**

| Muestra no. 1 | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|------------------|------------|--------|-------------------------------------|-----------------------------|------|--------------------|--------------------|
| Presión de Conf. σ_3 | Lectura de Deform. | Lectura de Carga | ϵ | Fuerza | Esfuerzo principal mayor σ_1 | Esfuerzo desviador σ | u | u | q max |
| Ton/m ² | 0.001" | X | % | Kg | Ton/m ² | Ton/m ² | Psi | Ton/m ² | Ton/m ² |
| 7,03 | 0 | 0,0 | 0,0 | -1,9 | 6,44 | -0,594 | 9,0 | 6,327 | 6,73 |
| 7,03 | 5 | 1,5 | 0,1 | 5,1 | 8,65 | 1,616 | 9,0 | 6,327 | 7,84 |
| 7,03 | 10 | 2,0 | 0,2 | 7,5 | 9,38 | 2,351 | 9,0 | 6,327 | 8,21 |
| 7,03 | 15 | 3,0 | 0,3 | 12,1 | 10,85 | 3,818 | 9,0 | 6,327 | 8,94 |
| 7,03 | 20 | 4,0 | 0,4 | 16,8 | 12,31 | 5,283 | 9,0 | 6,327 | 9,67 |
| 7,03 | 25 | 5,0 | 0,5 | 21,5 | 13,77 | 6,745 | 9,0 | 6,327 | 10,40 |
| 7,03 | 50 | 9,0 | 1,0 | 40,1 | 19,58 | 12,550 | 9,0 | 6,327 | 13,30 |
| 7,03 | 75 | 15,0 | 1,5 | 68,2 | 28,23 | 21,201 | 9,0 | 6,327 | 17,63 |
| 7,03 | 100 | 21,0 | 2,0 | 96,2 | 36,79 | 29,763 | 9,0 | 6,327 | 21,91 |
| 7,03 | 125 | 26,0 | 2,5 | 119,5 | 43,83 | 36,800 | 9,0 | 6,327 | 25,43 |
| 7,03 | 150 | 28,0 | 3,0 | 128,9 | 46,50 | 39,471 | 9,0 | 6,327 | 26,77 |
| 7,03 | 175 | 28,0 | 3,5 | 128,9 | 46,30 | 39,268 | 9,0 | 6,327 | 26,66 |
| 14,06 | 200 | 33,0 | 4,0 | 152,2 | 60,20 | 46,142 | 10,0 | 7,029 | 37,13 |
| 14,06 | 225 | 35,0 | 4,5 | 161,6 | 62,78 | 48,718 | 10,0 | 7,029 | 38,42 |
| 14,06 | 250 | 36,0 | 5,0 | 166,2 | 63,92 | 49,864 | 10,0 | 7,029 | 38,99 |
| 14,06 | 275 | 37,0 | 5,5 | 170,9 | 65,05 | 50,995 | 10,0 | 7,029 | 39,56 |
| 14,06 | 300 | 38,0 | 6,0 | 175,6 | 66,17 | 52,111 | 10,0 | 7,029 | 40,12 |
| 14,06 | 325 | 38,0 | 6,5 | 175,6 | 65,89 | 51,834 | 10,0 | 7,029 | 39,98 |
| 28,12 | 350 | 43,0 | 7,0 | 198,9 | 86,53 | 58,413 | 12,0 | 8,435 | 57,33 |
| 28,12 | 375 | 46,0 | 7,5 | 212,9 | 90,31 | 62,190 | 12,0 | 8,435 | 59,22 |
| 28,12 | 400 | 48,0 | 8,0 | 222,3 | 92,69 | 64,567 | 12,5 | 8,787 | 60,40 |
| 28,12 | 425 | 50,0 | 8,5 | 231,6 | 95,03 | 66,915 | 12,5 | 8,787 | 61,58 |
| 28,12 | 450 | 51,0 | 9,0 | 236,3 | 96,01 | 67,891 | 13,0 | 9,138 | 62,07 |
| 28,12 | 475 | 52,0 | 9,5 | 240,9 | 96,97 | 68,852 | 13,0 | 9,138 | 62,55 |
| 28,12 | 500 | 52,0 | 10,0 | 240,9 | 96,59 | 68,472 | 13,0 | 9,138 | 62,36 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

El factor de conversión de ton/m² a psi es 1,42. Para determinar la fuerza se utilizan las tablas que proporciona el anillo de carga y se interpolan los valores.

Deformación unitaria ε , se presenta en porcentaje

$$\varepsilon = (\text{lectura de deformacion})(0,001") * 100/5"$$

Valor de factor de corrección de área K

$$K = (1 - \varepsilon_r) * 10/A_0$$

Donde:

ε_r es la deformación unitaria, en decimales

A_0 es el área de la probeta antes del ensayo

Esfuerzo desviador σ

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = (F)(K)$$

$$\sigma(\text{Ton}/\text{m}^2) = (\text{Carga "F"})(\text{Factor "K"})$$

Esfuerzo desviador en rotura $q_{\text{máx}}$, el cual representa el centro del círculo de Mohr medido desde el origen.

$$q_{\text{max}} = \left[\frac{\sigma + 2\sigma_3}{2} \right]$$

Donde:

σ_3 es la presión de confinamiento que son 7,03, 14,06, y 28,12 Ton/m²

Esfuerzo principal mayor σ_1

$$\sigma_1 = \sigma + \sigma_3$$

Esfuerzos principales efectivos

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

Donde:

σ'_3 es el esfuerzo principal menor efectivo

σ'_1 es el esfuerzo principal mayor efectivo

u es la lectura de presión de poro

Tabla IV. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 1 (aparato de Bishop)**

| Muestra no. 1 (UU- Aparato de Bishop) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|------------------|------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{\text{máx}}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{\text{máx.}}$ |
| 7,03 | 46,50 | 39,47 | 26,77 | 6,33 | 0,70 | 33,84 | 33,14 | 17,27 |
| 14,06 | 66,17 | 52,11 | 40,12 | 7,03 | 7,03 | 52,11 | 45,08 | 29,57 |
| 28,12 | 96,97 | 68,85 | 62,55 | 9,14 | 18,98 | 78,69 | 59,71 | 48,84 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Esfuerzo efectivo desviador de rotura $q'_{\text{máx}}$

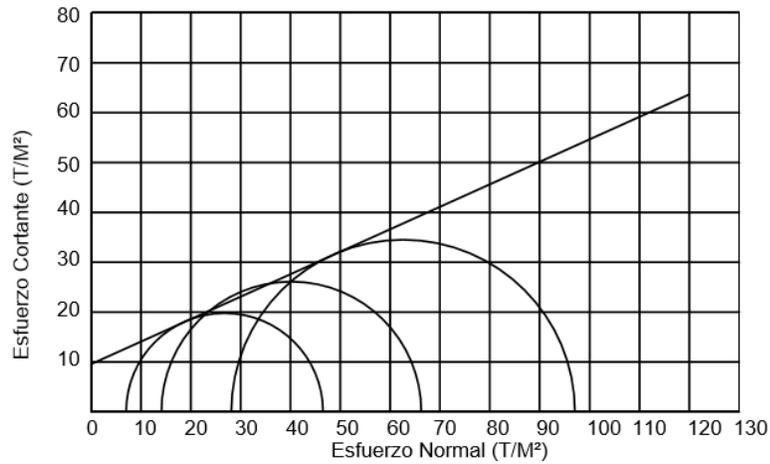
$$q'_{\text{max}} = \left[\frac{\sigma' + 2\sigma'_3}{2} \right]$$

Donde:

σ'_3 es el esfuerzo principal menor efectivo

σ es el esfuerzo desviador

Figura 18. **Esfuerzos principales totales del ensayo tipo UU de la muestra no. 1**



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

De la gráfica anterior se pueden obtener los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, tanto totales como efectivos.

De la figura 18, se observa que:

$$C = 9,59 T/m^2$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{Y}{X} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{54,03}{120} \right] = 24,24^\circ$$

$$\phi = 24,24^\circ$$

Tabla V. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop**

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|----------|-----------------|-------------------------|
| Presión lateral (T/m²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Desviador en rotura (T/m²) | 39,47 | 52,11 | 68,85 |
| Presión intersticial (T/m²) | 6,33 | 7,03 | 9,14 |
| Deformación en rotura Er (%) | 3,0 | 6,0 | 9,5 |
| Densidad seca (T/m³) | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Densidad humedad (T/m³) | 1,34 | 1,34 | 1,34 |
| Humedad (%H) | 58,40 | 58,40 | 58,40 |
| Ángulo de fricción interna | 24,24° | Cohesión | 9,59 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Fecha: Guatemala 20 de julio de 2017

Muestra no: 1

Descripción de suelo: limo arenoso color café

Tipo de ensayo: no consolidado no drenado (UU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato Humboldt

Tabla VI. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Humboldt**

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|----------|-----------------|--------------------------|
| Presión lateral (T/m²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Desviador en rotura (T/m²) | 47,87 | 51,79 | 59,07 |
| Presión intersticial (T/m²) | 1,58 | 3,82 | 12,82 |
| Deformación en rotura Er (%) | 4,5 | 8,0 | 15,0 |
| Densidad seca (T/m³) | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Densidad humedad (T/m³) | 1,36 | 1,36 | 1,36 |
| Humedad (%H) | 51,23 | 51,23 | 51,23 |
| Ángulo de fricción interna | 26,04° | Cohesión | 13,76 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla VII. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 1 (aparato de Humboldt)**

| Muestra no. 1 (UU- Aparato de Humboldt) | | | | | | | | |
|---|------------|----------|------------------|-------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{\text{máx}}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{\text{máx.}}$ |
| 7,03 | 54,90 | 47,87 | 30,97 | 1,58 | 5,45 | 51,74 | 46,29 | 28,60 |
| 14,06 | 65,85 | 51,79 | 39,96 | 3,82 | 10,24 | 58,21 | 47,97 | 34,23 |
| 28,12 | 87,19 | 59,07 | 57,66 | 12,82 | 15,30 | 61,55 | 46,25 | 38,43 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la muestra no. 1, con ambos aparatos se logró conseguir ángulos de fricción interna bastante similares con una diferencia de 1,8 grados. Donde hubo mayor variación fue en el valor de cohesión aparente. Con la máquina de Bishop se logró una estimación de 9,59 Ton/m² mientras que en la máquina de Humboldt se logró medir una cohesión aparente de 13,76 Ton/m².

Fecha: Guatemala 20 de julio de 2017

Muestra no: 7

Descripción de suelo: limo arcilloso color gris

Tipo de ensayo: no consolidado no drenado (UU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato de Bishop

Tabla VIII. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Bishop**

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|--|--------|----------|-------------------------|
| Presión lateral (T/m ²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Desviador en rotura (T/m ²) | 28,17 | 33,40 | 40,59 |
| Presión intersticial (T/m ²) | 8,44 | 10,54 | 14,06 |
| Deformación en rotura Er (%) | 3,0 | 6,0 | 9,5 |
| Densidad seca (T/m ³) | 1,18 | 1,18 | 1,18 |
| Densidad humedad (T/m ³) | 1,63 | 1,63 | 1,63 |
| Humedad (%H) | 38,18 | 38,18 | 38,18 |
| Angulo de fricción interna | 13,13° | Cohesión | 9,54 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla IX. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 7 (aparato de Bishop)**

| Muestra no. 7 (UU- Aparato de Bishop) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|------------------|-------|-------------|-------------|-----------|-------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{\text{máx}}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{\text{máx}}$ |
| 7,03 | 35,20 | 28,17 | 21,12 | 8,44 | -1,41 | 18,32 | 19,73 | 8,46 |
| 14,06 | 47,46 | 33,40 | 30,76 | 10,54 | 3,52 | 26,38 | 22,86 | 14,95 |
| 28,12 | 68,71 | 40,59 | 48,42 | 14,06 | 14,06 | 40,59 | 26,53 | 27,33 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos

Fecha: Guatemala 20 de julio de 2017

Muestra no: 7

Descripción de suelo: limo arcilloso color gris

Tipo de ensayo: no consolidado no drenado (UU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato Humboldt.

Tabla X. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Humboldt**

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-----------------|-------------------------|
| Presión lateral (T/m ²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Desviador en rotura (T/m ²) | 9,55 | 12,32 | 15,29 |
| Presión intersticial (T/m ²) | 6,05 | 11,25 | 20,95 |
| Deformación en rotura Er (%) | 8,0 | 11,60 | 16,10 |
| Densidad seca (T/m ³) | 1,24 | 1,24 | 1,24 |
| Densidad humedad (T/m ³) | 1,70 | 1,70 | 1,70 |
| Humedad (%H) | 37,36 | 37,36 | 37,36 |
| Angulo de fricción interna | 6,88° | Cohesión | 3,39 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XI. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo UU para la muestra no. 7 (aparato de Humboldt)**

| Muestra no. 7 (UU- Aparato de Humboldt) | | | | | | | | |
|---|------------|----------|-------------------|-------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{m\acute{a}x}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{m\acute{a}x}$ |
| 7,03 | 16,58 | 9,55 | 11,81 | 6,05 | 0,98 | 4,48 | 3,50 | 2,73 |
| 14,06 | 26,38 | 12,32 | 20,22 | 11,25 | 2,81 | 3,88 | 1,07 | 3,35 |
| 28,12 | 43,41 | 15,29 | 35,77 | 20,95 | 7,17 | 1,51 | -5,66 | 4,34 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos

Los ensayos de ambos aparatos dieron valores de presión intersticial bastante elevadas. Con el aparato de Bishop se observó un rango de presiones de 8 y 14 Ton/m², mientras que con el aparato de Humboldt se pudo observar un rango mayor de 6 a 20 Ton/m². Al observar los ángulos de fricción interna se pudo ver que el aparato de Bishop dio un ángulo mayor de 13,13 grados, en comparación de 6,88 dado por la máquina de Humboldt. La diferencia entre los datos de casi el 50 %.

3.4. Procedimiento para muestras consolidadas no drenadas

La prueba estándar para muestras consolidadas drenadas es una prueba en la que la muestra se deja consolidar bajo una presión en la cámara de confinamiento antes de que se le aplique el esfuerzo principal, σ_1 y se lleve a la falla. Esto se puede realizar con o sin tomar la medida de presión de poro de la muestra, aunque en la mayoría de aplicaciones de este tipo de prueba la medida de la presión de poro es deseada. La consolidación en el campo ocurre normalmente bajo condiciones en que el esfuerzo principal mayor y menor no es igual, como es el caso en los lugares donde existen muros de contención o donde existe una pendiente.

En este estudio, las muestras utilizadas son muestras parcialmente saturadas. Estos estudios se pueden separar en dos categorías **(a)** pruebas donde agua se hace circular por la muestra antes de que se aplique el esfuerzo desviador, esto para investigar los efectos de debilitación de la muestra debido a la saturación y **(b)** pruebas en que la presión de poro que se almacenó durante la etapa de consolidación, simplemente se deja disipar antes de que se corra la prueba de compresión.

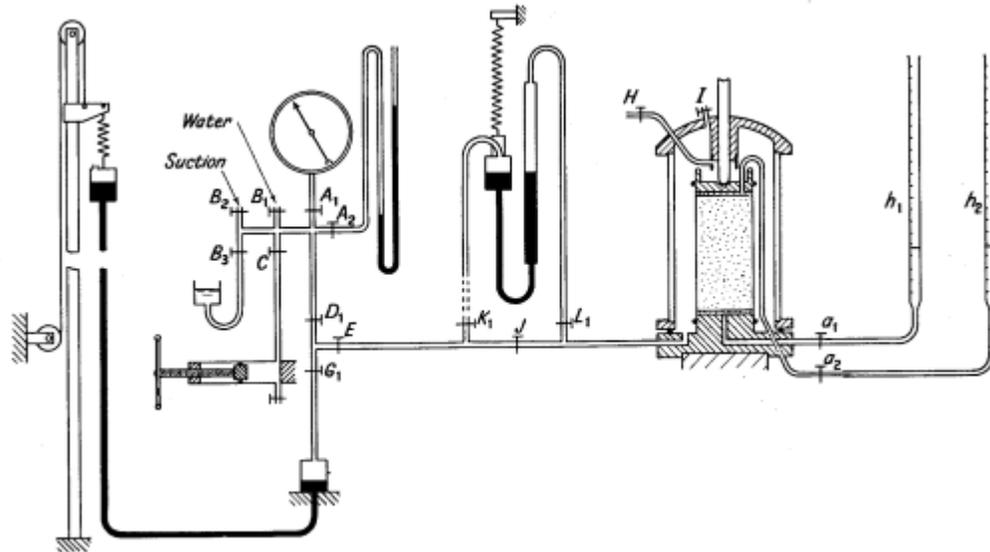
Las pruebas del primer tipo se realizan utilizando el aparato con el control de presión a base de aire, el aparato para registrar cambio volumétrico, el aparato para realizar la prueba rápida de ensayos triaxiales; pero en vez de conectar el aparato de Bishop para medir la presión de poro se utilizan dos buretas de 100cc cada una. Se coloca una en la parte superior de la muestra y la segunda se coloca en la parte inferior de la muestra. En la siguiente figura se puede observar el esquema del aparato y las dos buretas denominadas h_1 y h_2 .

Se arma el equipo como se correría un ensayo triaxial normal, lo que es la preparación de la muestra, colocación de la piedra porosa, la aplicación de la

membrana, hasta el llenado de la cámara de confinamiento a la presión requerida para correr el ensayo. Se toma nota de la lectura del cambio volumétrico de la muestra al aplicar la presión de poro por medio del aparato para medir presión de poro de la muestra, con la cantidad de agua que entra en la cámara de confinamiento. Luego se abre las válvulas a_1 y a_2 y se deja saturar la muestra asegurando que la bureta h_1 esté colocada a una altura sobre la parte central de la muestra, y la bureta h_2 esté a una elevación sobre la parte superior de la muestra. La colocación de las buretas es importante para asegurar que el flujo del agua sea hacia la muestra. Debido a la baja permeabilidad de muchos materiales compactados, este proceso puede ser tardado. Para fines prácticos se puede utilizar de dos a tres días de flujo en la muestra para llegar a la saturación adecuada.

Cuando la muestra se cree que ha llegado a su punto máximo de saturación, las válvulas a_1 y a_2 se cierran, la bureta h_1 se remueve y se conecta inmediatamente el aparato de medición de presión de poro.

Figura 19. **Esquema de aparato utilizado para consolidar muestras de suelo parcialmente saturadas.**



Fuente: BISHOP, ALAN W. y HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. p. 120.

La prueba que se realizó en este estudio fue del segundo tipo, ya que no se tenía el equipo adecuado para crear las condiciones necesarias de saturación y drenado de la muestra parcialmente saturado. La segunda bureta de 100 centímetros cúbicos hacía falta y el costo para reemplazarlo era muy elevado y tampoco los proveedores locales del equipo especializado tenían uno a su disposición.

3.4.1. **Ejemplo ilustrativo de ensayo tipo consolidado no drenado**

La prueba que se realizó en este estudio fue del segundo tipo, ya que las muestras utilizadas al saturarse, se debilitaban de tal manera que ya no se pudo registrar cargas para poder crear la envolvente de falla de dichas muestras.

Para este tipo de ensayo se siguieron los mismos pasos del método anterior. Se pesó la muestra, se colocó la piedra porosa completamente saturada en el pedestal de la cámara de confinamiento. Luego se colocó la muestra en el pedestal sobre la piedra porosa. Se colocó la tapa de en la parte superior de la muestra. Se aplicó la membrana a la muestra de suelo con las roldanas de hule en la parte superior e inferior de la muestra.

Ya colocada la muestra se procedió a colocar la cámara de confinamiento sobre la muestra, con el pistón por donde se aplica la carga axial levantado para no dañarla. Se dejó descender el pistón para que hiciera contacto con la tapa en la parte superior. Se fijaron los seis tornillos que aseguran la cámara de confinamiento en su lugar.

Luego de asegurar la cámara se procedió a llenar la cámara de confinamiento, asegurándonos que las válvulas H e I de la parte superior de la cámara estuviera abierto. Este paso aseguró que no hubiera presión que se almacenara en la cámara de confinamiento durante el proceso de llenado. Cuando la cámara estuvo llena y todas las burbujas de aire se hubieron liberado de la cámara, se procedió a habilitar el aparato de medición de cambio volumétrico y a aplicarle la presión de confinamiento deseado a la cámara de confinamiento. Se puede tomar la lectura de volumen inicial del aparato antes de aplicar la presión de confinamiento si se desea averiguar el cambio volumétrico antes de que se confine la muestra. Se dejó confinar la muestra de dos a tres días. Esto le dio suficiente tiempo a la muestra para consolidarse.

Después de consolidarse la muestra, se corrió el ensayo como un ensayo no consolidado no drenado. Se le aplicó carga a la muestra hasta llevarla a la falla, tomando lecturas de carga aplicada, presión de poro y cambio volumétrico, simultáneamente.

3.4.2. Análisis y comparación de resultados

Fecha: Guatemala 13 de septiembre de 2017

Muestra no: 1

Descripción de suelo: limo arenoso color café

Tipo de ensayo: consolidado no drenado (CU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato de Bishop

Tabla XII. **Datos de la muestra no. 1 antes de consolidar**

| | |
|--|--------|
| Diámetro inicial (cm) | 6,35 |
| Área inicial (cm²) | 31,67 |
| Altura inicial (cm) | 12,70 |
| Volumen inicial (cm³) | 402,2 |
| Masa inicial (gr) | 550,75 |
| Densidad húmeda inicial (Ton/m³) | 1,37 |
| Humedad inicial (%H) | 53,15 |
| Gravedad específica- G_{20°C} | 2,21 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XIII. **Parámetros de consolidación de la muestra no. 1**

| | |
|---|-------|
| Esfuerzo Efectivo de Consolidación (Ton/m²) | 28,12 |
| Volumen de agua expulsada del espécimen (cm³) | 4,2 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XIV. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop**

Velocidad de deformación: 0,05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|-----------------------------------|--------------------------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (T/m^2) | 46,86 | 55,76 | 76,90 |
| Esfuerzo Principal Mayor (T/m^2) | 53,89 | 69,82 | 105,02 |
| Esfuerzo principal menor (T/m^2) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Presión Intersticial (T/m^2) | 2,11 | 1,41 | 2,81 |
| Deformación en rotura- ϵ (%) | 2,50 | 4,50 | 11,00 |
| Densidad seca (T/m^3) | 1,37 | 1,37 | 1,37 |
| Densidad humedad (T/m^3) | 0,87 | 0,87 | 0,87 |
| Humedad (%H) | 57,72 | 57,72 | 57,72 |
| ángulo de Fricción Interna ϕ | 24,58° | cohesión aparente C_u | |
| ángulo de Fricción Interna Efectivo ϕ' | 25,10° | cohesión aparente efectiva C_u' | |
| | | | 11,83 Ton/m ² |
| | | | 12,59 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XV. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 1 (aparato de Bishop)**

| Muestra No. 1 (CU- Aparato de Bishop) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|-------------------|------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{m\acute{a}x}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{m\acute{a}x}$ |
| 7,03 | 53,89 | 46,86 | 30,46 | 2,11 | 4,92 | 49,67 | 44,75 | 27,30 |
| 14,06 | 69,82 | 55,76 | 41,94 | 141 | 12,65 | 67,00 | 54,35 | 39,83 |
| 28,12 | 105,02 | 76,90 | 66,57 | 2,81 | 25,31 | 99,40 | 74,09 | 62,36 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Fecha: Guatemala 13 de septiembre de 2017

Muestra no: 1

Descripción de suelo: limo arenoso color café

Tipo de ensayo: consolidado no drenado (CU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato Humboldt

Tabla XVI. **Datos de la muestra no. 1 antes de consolidar**

| | |
|--|--------|
| Diámetro inicial (cm) | 7,11 |
| Área inicial (cm²) | 39,73 |
| Altura inicial (cm) | 14,22 |
| Volumen inicial (cm³) | 565,06 |
| Masa inicial (gr) | 784,25 |
| Densidad húmeda inicial (Ton/m³) | 1,39 |
| Humedad inicial (%H) | 51,04 |
| Gravedad específica- G_{20°C} | 2,21 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XVII. **Parámetros de consolidación de la muestra no. 1**

| | |
|---|-------|
| Esfuerzo Efectivo de Consolidación (Ton/m²) | 28,12 |
| Volumen de agua expulsada del espécimen (cm³) | 2,28 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XVIII. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Humboldt**

Velocidad de deformación: 0,05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|----------|--|-------------------------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (T/m²) | 47,31 | 70,22 | 114,54 |
| Esfuerzo Principal Mayor (T/m²) | 54,34 | 84,28 | 142,66 |
| Esfuerzo principal menor (T/m²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Presión Intersticial (T/m²) | 0,28 | 0,96 | 3,35 |
| Deformación en rotura- ε (%) | 5,80 | 9,80 | 17,40 |
| Densidad seca (T/m³) | 1,39 | 1,39 | 1,39 |
| Densidad humedad (T/m³) | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| Humedad (%H) | 51,04 | 51,04 | 51,04 |
| ángulo de fricción interna φ | 37,92° | cohesión aparente C_u | 6,09 Ton/m ² |
| ángulo de fricción interna efectivo φ' | 40,62° | cohesión aparente efectiva C_{u'} | 5,08 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XIX. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 1 (aparato de Humboldt)**

| Muestra no. 1 (CU- Aparato de Humboldt) | | | | | | | | |
|---|------------|----------|------------------|------|-------------|-------------|-----------|-------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{\text{máx}}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{\text{máx}}$ |
| 7,03 | 54,34 | 47,31 | 30,69 | 0,28 | 6,75 | 53,78 | 47,03 | 30,27 |
| 14,06 | 84,28 | 70,22 | 49,17 | 0,96 | 13,10 | 82,36 | 69,26 | 47,73 |
| 28,12 | 142,66 | 114,54 | 85,39 | 3,35 | 24,77 | 135,96 | 111,19 | 80,37 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

En estos ensayos se puede observar que hubo una diferencia muy significativa entre los ángulos de fricción interna medidas entre los aparatos. El aparato de Bishop logró medir un ángulo efectivo de 25,10 grados, mientras que el aparato de Humboldt logró medir un ángulo efectivo de 40,62 grados. La diferencia entre estos últimos datos de casi el 40 %. Las dos muestras resistieron esfuerzos principales bastante altos, pero en el caso de la muestra ensayada con el aparato de Bishop dio una cohesión aparente efectiva de 12,59 Ton/m², mientras que en el caso del aparato de Humboldt, la cohesión aparente efectiva fue solamente de 5,08 Ton/m².

Fecha: Guatemala 13 de septiembre de 2017

Muestra no: 7

Descripción de suelo: limo arcilloso color gris

Tipo de ensayo: consolidado no drenado (CU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato de Bishop

Tabla XX. **Datos de la muestra no. 7 antes de consolidar**

| | |
|--|--------|
| Diámetro inicial (cm) | 6,35 |
| Área inicial (cm²) | 31,67 |
| Altura inicial (cm) | 12,70 |
| Volumen inicial (cm³) | 402,20 |
| Masa inicial (gr) | 654,93 |
| Densidad húmeda inicial (Ton/m³) | 1,63 |
| Humedad inicial (%H) | 36,35 |
| Gravedad específica- G_{20°C} | 2,48 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXI. **Parámetros de consolidación de la muestra no. 7**

| | |
|---|-------|
| Esfuerzo Efectivo de Consolidación (Ton/m²) | 28,12 |
| Volumen de agua expulsada del espécimen (cm³) | 4,7 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXII. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Bishop**

Velocidad de deformación: 0,05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|----------|---|--------------------------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (T/m²) | 33,40 | 37,06 | 42,63 |
| Esfuerzo Principal Mayor (T/m²) | 40,43 | 51,12 | 70,75 |
| Esfuerzo principal menor (T/m²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Presión Intersticial (T/m²) | 2,81 | 1,41 | 1,41 |
| Deformación en rotura- ϵ (%) | 4,00 | 5,50 | 8,50 |
| Densidad seca (T/m³) | 1,63 | 1,63 | 1,63 |
| Densidad humedad (T/m³) | 1,19 | 1,19 | 1,19 |
| Humedad (%H) | 36,35 | 36,35 | 36,35 |
| ángulo de fricción interna ϕ | 10,33° | cohesión aparente C_u | |
| ángulo de fricción interna efectivo ϕ' | 9,81° | cohesión aparente efectiva $C_{u'}$ | |
| | | | 12,65 Ton/m ² |
| | | | 13,33 Ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXIII. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 7 (aparato de Bishop)**

| Muestra no. 7 (CU- Aparato de Bishop) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|------------------|------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{\text{máx}}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{\text{máx.}}$ |
| 7,03 | 40,43 | 33,40 | 23,73 | 2,81 | 4,22 | 34,81 | 30,59 | 19,52 |
| 14,06 | 51,12 | 37,06 | 32,59 | 1,41 | 12,65 | 48,30 | 35,65 | 30,48 |
| 28,12 | 70,75 | 42,63 | 49,44 | 1,41 | 26,71 | 67,93 | 41,22 | 47,32 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Fecha: Guatemala 13 de septiembre de 2017

Muestra no: 7

Descripción de suelo: limo arcilloso color gris

Tipo de ensayo: consolidado no drenado (CU)

Tipo de muestra: remoldeada

Maquina utilizada: aparato Humboldt

Tabla XXIV. **Datos de la muestra no. 7 antes de consolidar**

| | |
|--|--------|
| Diámetro inicial (cm) | 7,11 |
| Área inicial (cm²) | 39,73 |
| Altura inicial (cm) | 14,22 |
| Volumen inicial (cm³) | 565,06 |
| Masa inicial (gr) | 948,79 |
| Densidad húmeda inicial (Ton/m³) | 1,68 |
| Humedad inicial (%H) | 37,48 |
| Gravedad específica- G_{20°C} | 2,48 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXV. **Parámetros de consolidación de la muestra no. 7**

| | |
|---|-------|
| Esfuerzo Efectivo de Consolidación (Ton/m²) | 28,12 |
| Volumen de agua expulsada del espécimen (cm³) | 3,5 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXVI. **Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 7 realizado con el aparato de Humboldt**

Velocidad de deformación: 0,05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|-----------------------------------|--------------------------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (T/m²) | 50,77 | 62,32 | 78,80 |
| Esfuerzo Principal Mayor (T/m²) | 57,80 | 76,38 | 106,92 |
| Esfuerzo principal menor (T/m²) | 7,03 | 14,06 | 28,12 |
| Presión Intersticial (T/m²) | 1,32 | 2,11 | 3,37 |
| Deformación en rotura- ϵ (%) | 5,80 | 9,80 | 14,30 |
| Densidad seca (T/m³) | 1,68 | 1,68 | 1,68 |
| Densidad humedad (T/m³) | 1,22 | 1,22 | 1,22 |
| Humedad (%H) | 37,48 | 37,48 | 37,48 |
| ángulo de fricción interna ϕ | 23,52° | cohesión aparente C_u | |
| ángulo de fricción interna efectivo ϕ' | 25,09° | cohesión aparente efectiva C_u' | |
| | | | 13,58 ton/m ² |
| | | | 13,47ton/m ² |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Tabla XXVII. **Esfuerzos principales normales y efectivos del ensayo tipo CU para la muestra no. 7 (aparato de Humboldt)**

| Muestra no. 7 (CU- Aparato de Humboldt) | | | | | | | | |
|---|------------|----------|-------------------|------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| σ_3 | σ_1 | σ | $q_{m\acute{a}x}$ | u | σ'_3 | σ'_1 | σ' | $q'_{m\acute{a}x}$ |
| 7,03 | 57,80 | 50,77 | 32,42 | 1,32 | 5,71 | 55,16 | 49,45 | 30,44 |
| 14,06 | 76,38 | 62,32 | 45,22 | 2,11 | 11,95 | 72,16 | 60,21 | 42,06 |
| 28,12 | 106,92 | 78,80 | 67,52 | 3,37 | 24,75 | 100,18 | 75,43 | 62,47 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

En estos ensayos se logró observar que el ángulo de fricción interna efectiva obtenido del aparato de Bishop dio un valor de 9,81 grados, mientras que el ángulo de fricción interna efectiva observada con el aparato de Humboldt fue de 25,09 grados, una diferencia de más del 50 %. En términos de la cohesión aparente efectivo, la máquina de Bishop dio un valor de 13,33 Ton/m², mientras que el aparato de Humboldt dio un valor de 13,47 Ton/m², una diferencia del 1 % entre los valores.

3.5. Procedimiento para muestras drenadas

El ensayo de triaxial drenado es una prueba de compresión en la que la muestra primeramente se consolida bajo una presión de confinamiento en la cámara, luego se provoca la falla por un incremento de esfuerzo axial bajo condiciones de drenaje completo. La velocidad en que se provoque la deformación y la razón a la cual se aplica la carga se hace de tal forma que no se produzcan esfuerzos de presión de poros muy significativos dentro de la muestra en cualquier momento que se esté aplicado la carga y en especial durante el momento que se presente la falla.

En el caso de muestras hechas con material parcialmente saturados, ensayos drenados normalmente se hacen con probetas de 4 pulgadas de diámetro, pero para propósitos de este trabajo se trabajó con probetas de 2,8 pulgadas de diámetro.

El proceso inicial del armado del aparato y colocación de la muestra es similar al de un ensayo consolidado no drenado, con la diferencia de que la parte superior de la muestra se conecta a una bureta h_2 por medio de una válvula a_2 (ver figura 19). Se coloca una piedra porosa completamente saturada debajo de la tapa de arriba de la muestra para permitir el paso del gas y agua

de la muestra en su parte superior. Los cambios volumétricos se realizan con el aparato de medición de cambio volumétrico, midiendo la cantidad de agua que entra a la cámara de confinamiento.

Después de incrementar la presión de la cámara de confinamiento se abre la válvula a_2 , cuando cambios significativos en el volumen de la muestra ya no se presente, la muestra se considera estar completamente consolidada. La relación entre el grado de consolidación y el tiempo de consolidación determinado para suelos saturados no aplica para suelos parcialmente saturados.

Cuando se completa la consolidación, se deja fluir agua hacia arriba por medio de la bureta h_1 y bajando la bureta h_2 de tal forma que los niveles de agua de las buretas estén de igual distancia por arriba y por debajo de la media altura de la muestra. Debido a la baja permeabilidad de muchos materiales compactados, la estabilización de las lecturas pueden tomar muchos días para lograr, pero por aplicaciones prácticas un periodo de dos a tres días de flujo permite suficiente saturación para dar suficiente indicación de los efectos de reblandecimiento de la muestra.

Luego de que se considera que la muestra este lo suficientemente saturado se ensaya la muestra con las válvulas a_1 y a_2 abiertos para permitir el drenado de la muestra durante la aplicación de las cargas axiales.

3.5.1. Ejemplo ilustrativo

El siguiente ejemplo es tomado del trabajo de graduación del Ingeniero Juan Carlos Hernández Canales, titulado “Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición.”

El ejemplo indica que una empresa realizó un ensayo consolidado no drenado de una muestra inalterada de suelo. La muestra se clasifica como: arcilla limo arenosa de color café claro.

Al obtener la probeta, se obtuvo el peso y la humedad.

Tabla XXVIII. Humedad de la muestra, para el ensayo triaxial tipo CD

| Humedad | | |
|-------------|---------|---------|
| Tarro | A-1 | A-2 |
| PBH | 92,7 g | 90,3 g |
| PBS | 77,7 g | 74,9 g |
| Tara | 24,7 g | 20,2 g |
| DIF | 15 g | 15,4 g |
| PNS | 53 g | 54,7 g |
| %H | 28,30 % | 28,15 % |
| %H promedio | 28,23 % | |

Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 256

De estos datos se obtuvo una probeta tallada de 2,5 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de alto con un peso neto húmedo de 728,2 gramos. Con esta probeta se realizó un ensayo de compresión triaxial de dio los siguientes datos.

Tabla XXIX. **Datos del ensayo de compresión triaxial consolidado-drenado (CD)**

| Presión de Conf. σ_3 T/m ² | Lectura de deform. 0.001" | Lectura de Carga X | ΔV cm ³ | ΔH cm | F kg | ϵ % |
|--|---------------------------|--------------------|----------------------------|---------------|---------------|--------------|
| | 0 | 0 | 0 | 0,15 | -8,34 | 0,00 |
| | 5 | 7 | 0,12 | 0,25 | 1,95 | 0,10 |
| | 10 | 12 | 0,14 | 0,32 | 9,30 | 0,21 |
| | 15 | 15 | 0,16 | 0,42 | 13,71 | 0,31 |
| | 20 | 21 | 0,21 | 0,56 | 22,53 | 0,42 |
| | 25 | 28 | 0,28 | 0,63 | 32,82 | 0,53 |
| | 50 | 30 | 0,35 | 0,76 | 35,76 | 1,06 |
| | 75 | 35 | 0,41 | 0,82 | 43,11 | 1,60 |
| 5 | 100 | 45 | 0,45 | 1,20 | 57,81 | 2,21 |
| | 125 | 48 | 0,48 | 1,60 | 62,22 | 2,86 |
| | 150 | 55 | 0,52 | 1,80 | 72,51 | 3,50 |
| 10 | 175 | 60 | 0,58 | 2,40 | 79,86 | 4,32 |
| | 200 | 72 | 0,63 | 2,80 | 97,50 | 5,13 |
| | 225 | 84 | 0,68 | 3,20 | 115,14 | 6,02 |
| 20 | 250 | 90 | 0,75 | 3,60 | 123,96 | 6,98 |

Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 257

Se determinó la carga transmitida por F, por medio de la ecuación del anillo.

$$F = 1,47X - 8,34$$

Donde:

F es la carga transmitida del espécimen al anillo de carga, en kilogramos

X es la lectura del micrómetro del anillo de carga.

-8,34 es la constante del anillo.

La deformación unitaria ϵ , se presenta en porcentaje

$$\varepsilon = (\text{lectura de deformacion})(0,001") * 100/5"$$

Valor de factor de corrección de área K

$$K = (1 - \varepsilon_r) * 10/A_0$$

Dónde:

ε_r es la deformación unitaria, en decimales

A_0 es el área se la probeta antes del ensayo

Esfuerzo desviador σ

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = (F)(K)$$

$$\sigma(\text{Ton}/\text{m}^2) = (\text{Carga "F"})(\text{Factor "K"})$$

Esfuerzo efectivo desviador de rotura $q'_{\text{máx}}$

$$q'_{\text{max}} = \left[\frac{\sigma' + 2\sigma'_3}{2} \right]$$

Donde:

σ'_3 es el esfuerzo principal menor efectivo (que son 13,09, 19,80, y 33,07 Ton/m² en este ejemplo)

σ es el esfuerzo desviador

Tabla XXX. **Determinación del esfuerzo desviador σ y el esfuerzo desviador en rotura q_{\max} , para el ensayo triaxial tipo CD**

| σ_3 T/m | V- Δ V cm ³ | H- Δ H cm | A _o cm ² | ϵ | 1- ϵ | Factor K | σ T/m ² | q_{\max} T/m ² |
|-------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| | 402,20 | 12,55 | 32,05 | 0,0000 | 1,0000 | 0,3120 | -2,60 | 3,70 |
| | 402,08 | 12,45 | 32,30 | 0,0010 | 0,9990 | 0,3093 | 0,60 | 5,30 |
| | 402,06 | 12,38 | 32,48 | 0,0021 | 0,9979 | 0,3073 | 2,86 | 6,43 |
| | 402,04 | 12,28 | 32,74 | 0,0031 | 0,9969 | 0,3045 | 4,17 | 7,09 |
| | 401,99 | 12,14 | 33,11 | 0,0042 | 0,9958 | 0,3007 | 6,78 | 8,39 |
| | 401,92 | 12,07 | 33,30 | 0,0053 | 0,9947 | 0,2987 | 9,80 | 9,90 |
| | 401,85 | 11,94 | 33,66 | 0,0106 | 0,9894 | 0,2940 | 10,51 | 10,26 |
| | 401,79 | 11,88 | 33,82 | 0,0160 | 0,9840 | 0,2909 | 12,54 | 11,27 |
| 5 | 401,75 | 11,50 | 34,93 | 0,0221 | 0,9779 | 0,2799 | 16,18 | 13,09 |
| | 401,72 | 11,10 | 36,19 | 0,0286 | 0,9714 | 0,2684 | 16,70 | 18,35 |
| | 401,68 | 10,90 | 36,85 | 0,0350 | 0,9650 | 0,2619 | 18,99 | 19,49 |
| 10 | 401,62 | 10,30 | 38,99 | 0,0432 | 0,9568 | 0,2454 | 19,60 | 19,80 |
| | 401,57 | 9,90 | 40,56 | 0,0513 | 0,9487 | 0,2339 | 22,80 | 31,40 |
| | 401,52 | 9,50 | 42,27 | 0,0602 | 0,9398 | 0,2224 | 25,60 | 32,80 |
| 20 | 401,45 | 9,10 | 44,12 | 0,0698 | 0,9302 | 0,2109 | 26,14 | 33,07 |

Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 262.

Después de realizar el ensayo, se procede a determinar la humedad, la densidad húmeda y la densidad seca de la probeta.

Tabla XXXI. **Determinación del porcentaje de humedad, densidad húmeda y densidad seca, para el ensayo triaxial tipo.**

| Probeta No. 1 | | | | | |
|---------------|---------|-----------------|------------------------|---------------|------------------------|
| %H | | Densidad húmeda | | Densidad seca | |
| PNH | 728,2 g | PNH | 728,2 g | PNS | 562,5 g |
| PNS | 562,5 g | Volumen | 402,2cm ³ | Volumen | 402,2cm ³ |
| Dif. | 165,7 g | γ | 1,81 g/cm ³ | γ_d | 1,40 g/cm ³ |
| %H | 29,46 | γ | 1,99 T/m ³ | γ_d | 1,54 T/m ³ |

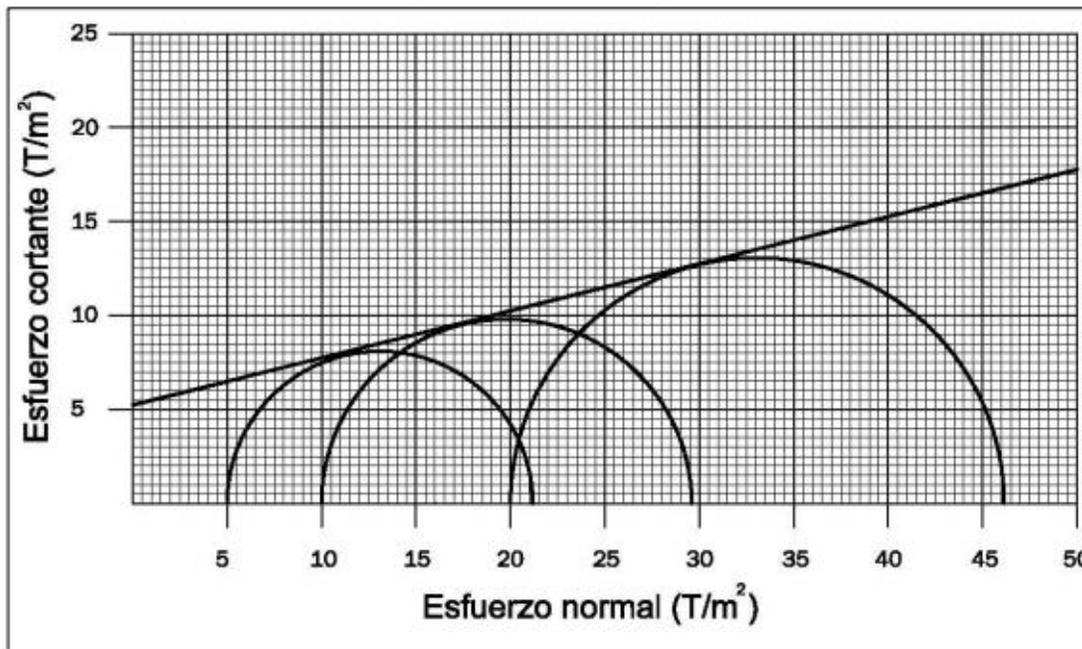
Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 263.

Tabla XXXII. **Esfuerzos principales totales y efectivos para dibujar los círculos de Mohr, para el ensayo triaxial tipo CD**

| Esfuerzos totales | | | Esfuerzos efectivos | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| σ_3 (T/m ²) | σ_1 (T/m ²) | q_{\max} (T/m ²) | σ'_3 (T/m ²) | σ'_1 (T/m ²) | q'_{\max} (T/m ²) |
| 5 | 21,18 | 13,09 | 5 | 21,18 | 13,09 |
| 10 | 29,60 | 19,80 | 10 | 29,60 | 19,80 |
| 20 | 46,14 | 33,07 | 20 | 46,14 | 33,07 |

Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 263.

Figura 20. **Envolvente de falla y círculos de Mohr, para el ensayo de compresión triaxial tipo CD**



Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 264.

De la gráfica anterior se pueden obtener los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna tanto totales como efectivos.

De la Figura 20, se observa que:

$$C = 5,20 T/m^2$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{Y}{X} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{17,76 - 5,20}{50} \right] = 14,10^\circ$$

$$\phi = 14,10^\circ$$

Tabla XXXIII. Resumen de los parámetros de corte de la muestra no. 1 realizado con el aparato de Bishop

| | | | |
|--|----------|-----------------|-------------------------|
| Probeta No. | 1 | 1 | 1 |
| Presión lateral (T/m²) | 5 | 10 | 20 |
| Desviador en rotura (T/m²) | 13,09 | 19,80 | 33,07 |
| Deformación en rotura Er (%) | 2,21 | 4,32 | 6,98 |
| Densidad seca (T/m³) | 1,54 | 1,54 | 1,54 |
| Densidad humedad (T/m³) | 1,34 | 1,34 | 1,34 |
| Humedad (%H) | 29,5 | 29,5 | 29,5 |
| Angulo de fricción interna | 24,24° | Cohesión | 9,59 Ton/m ² |

Fuente: HERNÁNDEZ, JUAN CARLOS. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 265.

3.5.2. Análisis y comparación de resultados

En este informe se pretendía hacer una comparación entre los resultados obtenidos de una muestra parcialmente saturada ensayado con el aparato de Bishop y otra probeta hecho del mismo material ensayado con el aparato de Humboldt con la que se realiza actualmente los ensayos triaxiales en la Sección de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de san Carlos, pero por falta de equipo especializado la comparación no se pudo llevar

a cabo. Esto porque para este tipo de ensayo, para la máquina de Wykeham Farrance que se rehabilitó, las muestras se deben de conectar a una segunda bureta h_2 (Figura 19) de 100 centímetros cúbicos. De esta forma se aseguraba que los gases o líquidos en exceso en la muestra a la hora de consolidarse, se podían disipar sin que la probeta perdiera humedad relativa ni que en su interior se generaran presiones de poro en exceso.

La pieza cual hacía falta era una bureta h_2 de 100 centímetros cúbicos la cual se encargaba de permitir el flujo libre de gases o agua de la parte superior de la probeta de suelo y también prevenía la pérdida de humedad de la muestra durante la época de consolidación. Por falta de recursos y disponibilidad de la pieza en consideración, no se pudo realizar el ensayo de forma efectiva para conseguir los datos necesarios para hacer la comparación entre los resultados de las máquinas de compresión triaxial.

4. GUIA PARA EL MANTENIMIENTO Y USO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como cualquier otro dispositivo experimental es necesario realizar mantenimiento periódico para asegurar que el dispositivo adecuadamente calibrada y funcionando en las mejores condiciones para reducir lecturas erróneas al momento de realizar una prueba. El aparato de ensayos triaxiales requiere mantenimiento conforme se va utilizando el aparato. Cosas pequeñas como fugas en el sistema de aire puede complicar la mantención de la presión de confinamiento nos puede afectar al momento de determinar la presión de poro de la muestra que deseamos ensayar.

4.1. Aparato de ensayos triaxiales

El aparato de ensayos triaxiales requiere mantenimiento periódico por un especialista en motores eléctricos. Se debe asegurar que el motor este limpio y seco siempre, especialmente durante su periodo de funcionamiento. El motor funciona con un sistema de engranajes que permiten el desplazamiento de pedestal de la cámara de confinamiento adecuado. Hay que estos engranajes siempre estén bien lubricados para evitar desgaste prematuro de estos. Se debe asegurar que los cojinetes del motor siempre estén bien lubricados.

4.2. Cámara de confinamiento

La cámara de confinamiento es talvez la parte del aparato que requiere más atención que cualquier otra parte del aparato ya que es la parte que se remueve y se vuelve a poner en el aparato. Es una parte del aparato que sufre mucho desgaste. Es necesario que el pistón de la parte superior de la cámara de confinamiento siempre esté bien lubricada para evitar desgaste. Al

desgastarse esta parte se producen muchas fugas que nos lleva a pérdidas de presión que al final nos lleva lecturas erróneas de datos de presión de poro y lecturas falsas de resistencias de la muestra.

En la parte inferior de la cámara de confinamiento existe un hule que sella la cámara de con la base del pedestal. Siempre hay que asegurar que este hule este en buenas condiciones para asegurar que no habrá fugas.

4.3. Aparato de medición de cambio volumétrico

El aparato de medición de cambio volumétrico está construido con un tubo de PVC transparente. El PVC es un material que se cristaliza rápidamente al estar expuesta al sol por mucho tiempo. Esta parte del aparato se mantiene bajo presiones de hasta 150psi por tiempos prolongados de hasta dos o tres días a la vez durante tiempos de consolidación. Es necesario que esta parte del aparato quede en un lugar donde no tenga mucho contacto con el sol, ya que el PVC al cristalizarse el material se vuelve frágil y puede romperse el material.

El aparato de medición de cambio volumétrico funciona con mercurio y es un sistema de auto compensación que trabaja en conjunto con un resorte, es necesario que este sistema se le dé lo suficiente tiempo para que el sistema llegue al equilibrio antes de que se pueda utilizar este aparato. Esto se logra al notar que el mercurio del tubo transparente de PVC esta al mismo nivel de mercurio que en el cilindro que cuelga del resorte. Esto se puede lograr asegurando que la válvula a este abierto y expuesto a la presión atmosférica, al igual que la punta que viene de la fuente de agua.

4.4. Aparato de Bishop

Una de las componentes del aparato de Bishop que requiere la mayor cantidad de atención es el indicador nulo y a que contiene un tubo de vidrio con

un diámetro interno de un milímetro. Es necesario asegurarnos que el agua que entre al sistema sea agua filtrada libre de sedimentos ya que estos pueden tapar el tubo de vidrio y causar problemas durante el ensayo.

También es recomendado que se asegure que no regrese el flujo de agua del pedestal de la cámara de confinamiento ya que esto puede traer sedimentos que pueden contaminar el mercurio del indicador nulo y el mercurio lo puede llevar al interior del tubo de vidrio donde se puede quedar atrapado.

CONCLUSIONES

1. Se rehabilitó y calibró el aparato de Bishop en la máquina triaxial y se utilizó para la medición de presión de poro y cambio volumétrico en dos muestras de suelos cohesivos.
2. Al aparato de medición de presión de poro le faltaban partes como el cilindro donde existía la interfaz entre agua y mercurio y se le adaptaron piezas como PVC transparente para poder hacerlo funcionar. Se reemplazaron y adaptaron todas las piezas necesarias para lograr el buen funcionamiento del aparato de Bishop.
3. Se redactó una guía para el uso y el mantenimiento del aparato Bishop. Se hizo énfasis en los pasos a tomar para asegurar el buen funcionamiento del aparato de Bishop como el mantenimiento necesario de la cámara de confinamiento, el engrasado del pistón para evitar desgaste para últimamente asegurar que no hayan fugas de aire o agua del sistema.
4. Se hizo una guía para realizar el ensayo triaxial Consolidado No Drenado y Consolidado Drenado de las muestras seleccionadas para el estudio que fueron dos muestras de suelo cohesivos. La guía incluye los pasos a seguir desde la formación de las probetas hasta el ensayo de la muestra hasta lograr su falla.
5. Se logró calibrar el aparato para poder realizar ensayos no consolidados no drenados y ensayos consolidados no drenados de dos muestras de suelo cohesivos. Se compararon los datos con los datos que se consiguieron de la máquina de triaxial existente de Humboldt en el laboratorio de suelos.

RECOMENDACIONES

1. Crear un interfaz de agua/ aire de un material como PVC transparente donde se pueda ver y monitorear el nivel de agua y aire, para poder asegurar que no pase aire del compresor a la línea del sistema de presión del aparato de Bishop, ya que esto puede causar que se produzcan malas lecturas como el aire se comprime fácilmente en comparación al agua.
2. Se recomienda darle mantenimiento regular al aparato triaxial, cosas como servicio al motor o el engrasado de los engranajes, para asegurar que el aparato pueda producir la velocidad de deformación de la muestra de media pulgada por minuto.
3. El embolo de la cámara de confinamiento se debe engrasar regularmente para asegurar que no ocurra mucho desgaste en esa parte. El deterioro de esta parte causa que se produzcan fugas de agua y presión del sistema que dificulta la toma de datos de las muestras siendo ensayadas. Con esta fuga se dificulta mantener la presión de la cámara de confinamiento constante.
4. En un futuro sería mejor reducir el diámetro del cilindro de PVC transparente de 1 ½" a simplemente 1" ya que esto limitaría la posibilidad de que se produzcan errores a la hora de calcular el cambio volumétrico de las muestras siendo ensayadas.
5. A la hora de hacer las probetas remoldeadas para utilizar en los ensayos de triaxial con suelos cohesivos, sirve utilizar envoltura de plástico en las piezas del molde para asegurar que la muestra no se pegue al molde a la hora de separarlas.

BIBLIOGRAFÍA

1. BOWLES, Joseph E. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. 1a ed. México: McGraw-Hill, 1981. 240 p.
2. DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 6a ed. México: Cengage Learning, 2005. 636 p.
3. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
4. HERNÁNDEZ, José Rodolfo. *Contribution a l'étude des sols supports de chaussées partiellement saturés*. Trabajo de Graduación de Ing. Civil. L'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 1983. 107 p.
5. PIERRI PALMA, Ileana Felicia. *Evaluación de los parámetros de corte en suelos cohesivos saturados, mediante pruebas de compresión triaxial: consolidado no drenado y consolidado drenado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 97 p.
6. SMITH, M. J. *Soil mechanics*. 4a ed. Londres: The English Language Book Society and Macdonald and Evans Ltd, 1978. 132 p.

7. Wykeham Farrance Engineering Limited. *Catálogo de equipo de ensayo para materiales en laboratorio y campo*. 8a ed. Inglaterra: Wykeham Farrance Engineering Limited, 1985. 184 p.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de Ensayos Triaxial



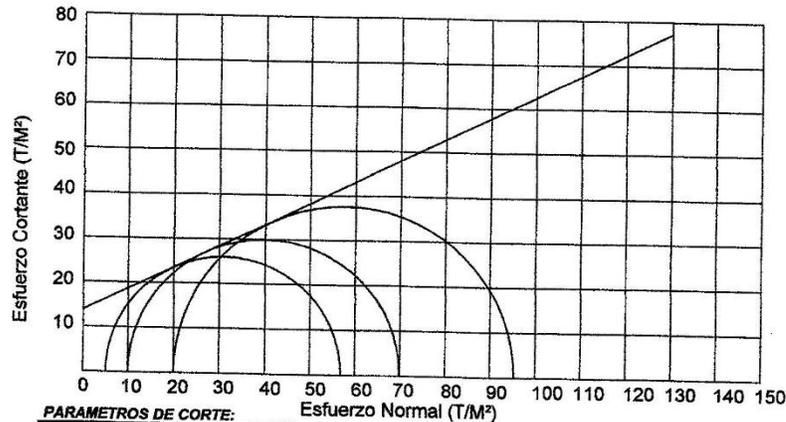
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

No. 11955

INFORME No.: 480 S.S. O.T.: 37,840
 INTERESADO: Joseph Evarist Moreno
 PROYECTO: Trabajo de Graduación "Medición de Presión de Poro y Cambio Volumétrico en Ensayos Triaxiales No Consolidados No Drenados y Consolidados No Drenados, Por Medio del Aparato de Bishop"
 UBICACIÓN: Sección Mecánica de Suelos
 FECHA: martes, 24 de octubre de 2017
 POZO: 1 PROFUNDIDAD: X m MUESTRA: 1 Humboldt



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 26.04^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 13.76 \text{ Ton/m}^2$

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo Arenoso Color Café

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

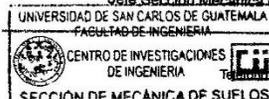
| PROBETA No. | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|-------|
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| DESVIADOR EN ROTURA q (T/m ²) | 47.87 | 51.79 | 59.07 |
| PRESION INTERSTICIAL u (T/m ²) | 1.58 | 3.82 | 12.82 |
| DEFORMACION EN ROTURA Er (%) | 4.5 | 8.0 | 15.0 |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 0.90 | 0.90 | 0.90 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.36 | 1.36 | 1.36 |
| HUMEDAD (%H) | 51.23 | 51.23 | 51.23 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Omar E. Méndez Méndez
 Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Francisco Javier Quijón de la Cruz
 Ing. Francisco Javier Quijón de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono Directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Fuente: Centro de Investigación de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Continuación Anexo 1.



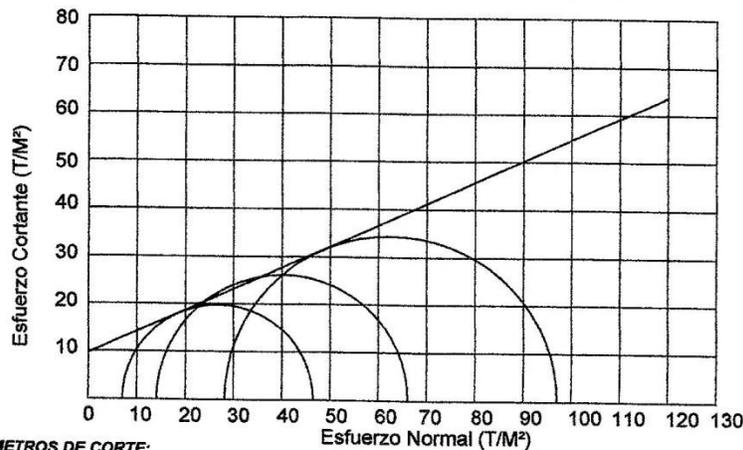
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

No. 11956

INFORME No.: 479 S.S. O.T.: 37,840
 INTERESADO: Joseph Evarist Moreno
 PROYECTO: Trabajo de Graduación "Medición de Presión de Poro y Cambio Volumétrico en Ensayos Triaxiales No Consolidados No Drenados y Consolidados No Drenados, Por Medio del Aparato de Bishop"
 UBICACIÓN: Sección Mecánica de Suelos
 FECHA: martes, 24 de octubre de 2017
 POZO: 1 PROFUNDIDAD: X m MUESTRA: 1 Wyckenham Farrance



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 24,24^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 9,59 \text{ Ton/m}^2$

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Limo Arenoso Color Café
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

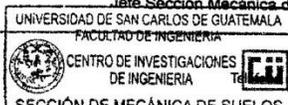
| PROBETA No. | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|-------|-------|
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(T/m ²) | 39.47 | 52.11 | 68.85 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | 6.33 | 7.03 | 9.14 |
| DEFORMACION EN ROTURA Er (%) | 3.0 | 6.0 | 9.5 |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 0.84 | 0.84 | 0.84 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.34 | 1.34 | 1.34 |
| HUMEDAD (%H) | 58.40 | 58.40 | 58.40 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Omar E. Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

Francisco Javier Quiñón de la Cruz
 Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
 DIRECTOR CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cil.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigación de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Continuación Anexo 1.

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

INTERESADO: Joseph Evarist Moreno

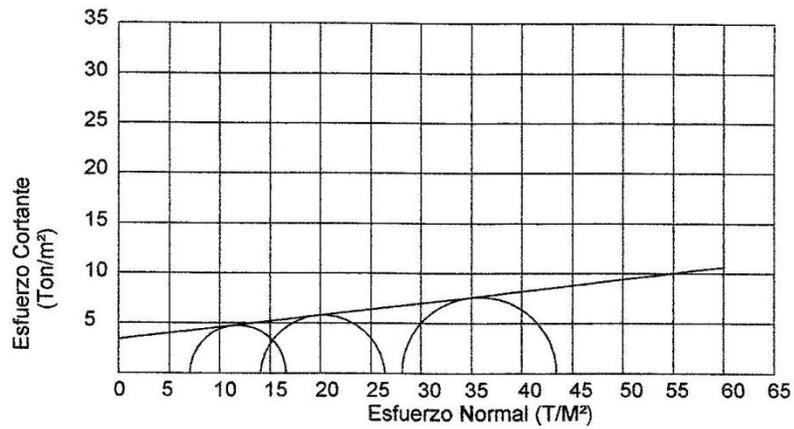
PROYECTO: Trabajo de Graduación

UBICACIÓN: 0

FECHA: jueves, 20 de julio de 2017

POZO: 1 PROFUNDIDAD: X m

MUESTRA: 7 Humboldt



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 6.88^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 3.39 \text{ Ton/m}^2$

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo Arcilloso Color Gris

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| PROBETA No. | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|-------|-------|
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(T/m ²) | 9.55 | 12.32 | 15.29 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | 6.05 | 11.25 | 20.95 |
| DEFORMACION EN ROTURA Er (%) | 8.0 | 11.6 | 16.1 |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.24 | 1.24 | 1.24 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.70 | 1.70 | 1.70 |
| HUMEDAD (%H) | 37.36 | 37.36 | 37.36 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

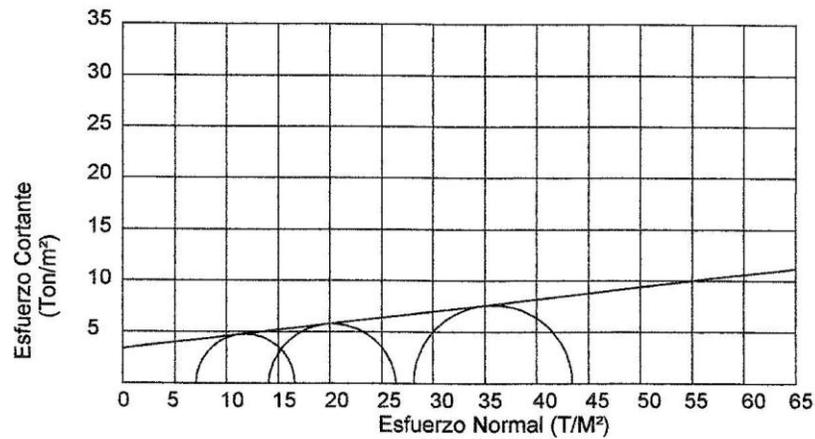
INTERESADO: Joseph Evarist Moreno

PROYECTO: Trabajo de Graduación

UBICACIÓN: 0

FECHA: jueves, 20 de julio de 2017

POZO: 1 PROFUNDIDAD: X m MUESTRA: 7 Wykeham Farrance



PARAMETROS DE CORTE:

| | |
|---|--|
| ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 13.13^\circ$ | COHESIÓN: $C_u = 9,54 \text{ Ton/m}^2$ |
|---|--|

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Limo Arcilloso Color Gris

DIMENSIÓN Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| PROBETA No. | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|-------|-------|
| PRESIÓN LATERAL (T/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(T/m ²) | 28.17 | 33.40 | 40.59 |
| PRESIÓN INTERSTICIAL u(T/m ²) | 8.44 | 10.54 | 14.06 |
| DEFORMACIÓN EN ROTURA Er (%) | 3.0 | 6.0 | 9.5 |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.18 | 1.18 | 1.18 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.63 | 1.63 | 1.63 |
| HUMEDAD (%H) | 38.18 | 38.18 | 38.18 |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe No.: 481 S.S.

No. 11951
O.T.: 37,840

Interesado: Joseph Evarist Moreno

Proyecto: Trabajo de Graduación "Medición de Presión de Poro y Cambio Volumétrico en Ensayos Triaxiales No Consolidados No Drenados y Consolidados No Drenados, Por Medio del Aparato de Bishop"

Ubicación: Sección Mecánica de Suelos

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

Fecha: martes, 24 de octubre de 2017

Profundidad: XXX m

Pozo: 1

Muestra: 1 Humboldt

Descripción del Suelo: Limo Arenoso Color Café

Tipo de ensayo: Consolidado no drenado, con medición de presión de poro

Tipo de muestra: Espécimen Compactado

DATOS DEL ESPÉCIMEN (antes de consolidar):

Diámetro Inicial: 7.11 cm

Área inicial: 39.73 cm²

Altura inicial: 14.22 cm

Volúmen Inicial: 565.06 cm³

Masa Inicial: 784.25

Densidad Húmeda Inicial: 1.39 Ton/m³

Humedad Inicial (%H): 51.04

Gravedad Específica - G_{20°C}: 2.21

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:

Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 28.12 Ton/m²

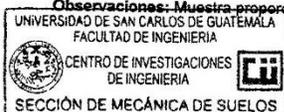
Volumen de agua expulsado del espécimen: 2.28 cm³

PARÁMETROS DE CORTE:

Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|--------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²) | 47.31 | 70.22 | 114.54 |
| Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²) | 54.34 | 84.28 | 142.66 |
| Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| Presión Intersticial (Ton/m ²) | 0.28 | 0.96 | 3.35 |
| Deformación en Rotura - ε (%) | 5.80 | 9.80 | 17.40 |
| Densidad Seca (Ton/m ³) | 1.39 | 1.39 | 1.39 |
| Densidad Humeda (Ton/m ³) | 0.92 | 0.92 | 0.92 |
| Humedad (%H) | 51.04 | 51.04 | 51.04 |

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado. Humedad obtenida del espécimen completo.



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA --USAC--
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Ext. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: http://cii.usac.edu.gt

Fuente: Centro de Investigación de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

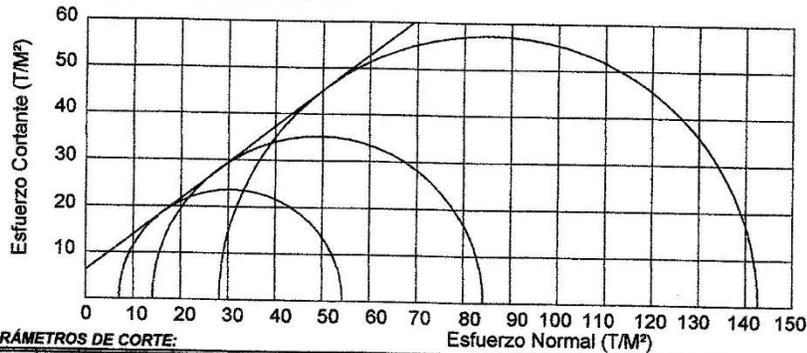
Continuación Anexo 1.



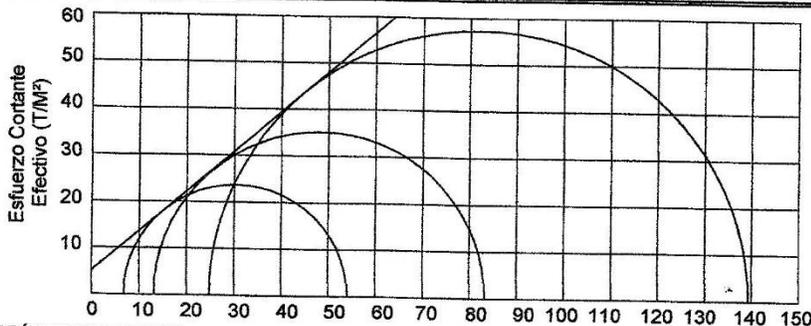
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe No.: 482 S.S. No. 11952
 Interesado: Joseph Evarist Moreno O.T.: 37,840
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Medición de Presión de Poro y Cambio Volumétrico en Ensayos Triaxiales No Consolidados No Drenados y Consolidados No Drenados, Por Medio del Aparato de Bishop"
 Ubicación: Sección Mecánica de Suelos
 Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO
 Norma: ASTM D 4767-04
 Fecha: martes, 24 de octubre de 2017 Profundidad: X m Pozo: 1
 Descripción del Suelo: Limo Arenoso Color Café Muestra: 1 Humboldt



PARÁMETROS DE CORTE:
 Angulo de Fricción Interna: $\phi = 37.92^\circ$ Cohesión Aparente: $C_u = 6.09 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:
 Angulo de Fricción Interna Efectivo: $\phi' = 40.62^\circ$ Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 5.08 \text{ Ton/m}^2$

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA Vo. Bo.
 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
 FACULTAD DE INGENIERIA DIRECCIÓN CII/USAC
 SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS FACULTAD DE INGENIERIA - USAC - Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86208 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigación de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Continuación Anexo 1.

Interesado: Joseph Evarist Moreno
Proyecto: Trabajo de Graduación
Ubicación: 0
Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO
Norma: ASTM D 4767-04
Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017
Profundidad: XXX m
Pozo: 1
Muestra: 1 W. Farrance

Descripción del Suelo: Limo Arenoso Color Café
Tipo de ensayo: Consolidado no drenada, con medición de presión de poro
Tipo de muestra: Espécimen Compactado

DATOS DEL ESPÉCIMEN (antes de consolidar):

Diámetro Inicial: 6.35 cm
Área inicial: 31.67 cm²
Altura inicial: 12.70 cm
Volúmen Inicial: 402.2 cm³
Masa Inicial: 550.75
Densidad Húmeda Inicial: 1.37 Ton/m³
Humedad Inicial (%H): 53.15
Gravedad Específica - G_{20°C}: 2.21

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:

Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 28.12 Ton/m²
Volumen de agua expulsado del espécimen: 4.2 cm³

PARÁMETROS DE CORTE:

Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|--------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²) | 46.86 | 55.76 | 76.90 |
| Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²) | 53.89 | 69.82 | 105.02 |
| Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| Presión Intersticial (Ton/m ²) | 2.11 | 1.41 | 2.81 |
| Deformación en Rotura - ε (%) | 2.50 | 4.50 | 11.00 |
| Densidad Seca (Ton/m ³) | 1.37 | 1.37 | 1.37 |
| Densidad Humeda (Ton/m ³) | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| Humedad (%H) | 57.72 | 57.72 | 57.72 |

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado. Humedad obtenida del espécimen completo.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

interesado: Joseph Evarist Moreno

Proyecto: Trabajo de Graduación

Ubicación: 0

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

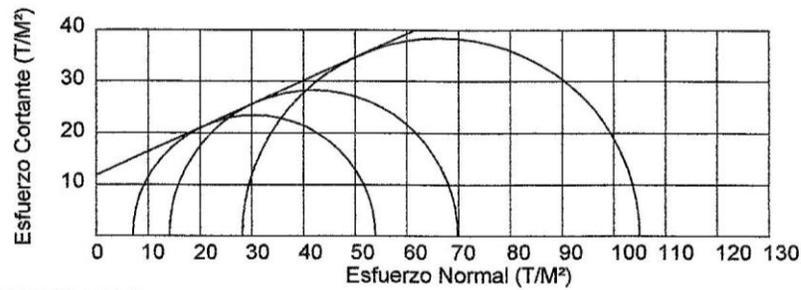
Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017

Profundidad: XXX m

Pozo: 1

Muestra: 1 W. Farrance

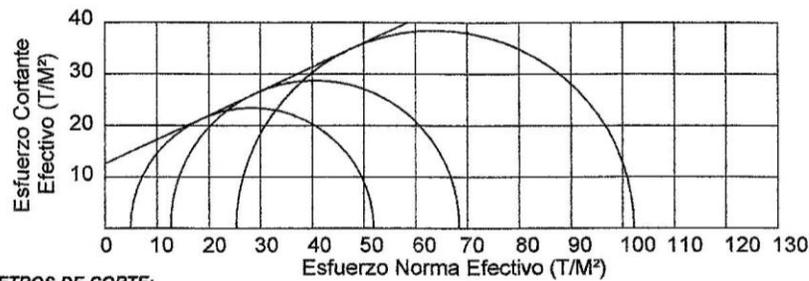
Descripción del Suelo: Limo Arenoso Color Café



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna: $\phi = 24.58^\circ$

Cohesión Aparente: $C_u = 11.83 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna Efectiva: $\phi' = 25.10^\circ$

Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 12.59 \text{ Ton/m}^2$

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

Interesado: Joseph Evarist Moreno
Proyecto: Trabajo de Graduación
Ubicación: 0
Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO
Norma: ASTM D 4767-04 **Pozo:** 1
Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017 **Profundidad:** XXX m **Muestra:** 7
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Gris
Tipo de ensayo: Consolidado no drenada, con medición de presión de poro
Tipo de muestra: Espécimen Compactado

DATOS DEL ESPÉCIMEN (antes de consolidar):
 Diámetro Inicial: 7.11 cm **Masa Inicial:** 948.79
 Área inicial: 39.73 cm² **Densidad Húmeda Inicial:** 1.68 Ton/m³
 Altura inicial: 14.22 cm **Humedad Inicial (%H):** 37.48
 Volúmen Inicial: 565.06 cm³ **Gravedad Específica - G_{20°C}:** 2.48

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:
Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 28.12 Ton/m²
Volumen de agua expulsado del espécimen: 3.5 cm³

PARÁMETROS DE CORTE:
Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|--------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²) | 50.77 | 62.32 | 78.80 |
| Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²) | 57.80 | 76.38 | 106.92 |
| Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| Presión Intersticial (Ton/m ²) | 1.32 | 2.11 | 3.37 |
| Deformación en Rotura - ε (%) | 5.80 | 9.80 | 14.30 |
| Densidad Seca (Ton/m ³) | 1.68 | 1.68 | 1.68 |
| Densidad Humeda (Ton/m ³) | 1.22 | 1.22 | 1.22 |
| Humedad (%H) | 37.48 | 37.48 | 37.48 |

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado. Humedad obtenida del espécimen completo.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

Interesado: Joseph Evarist Moreno

Proyecto: Trabajo de Graduación

Ubicación: 0

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

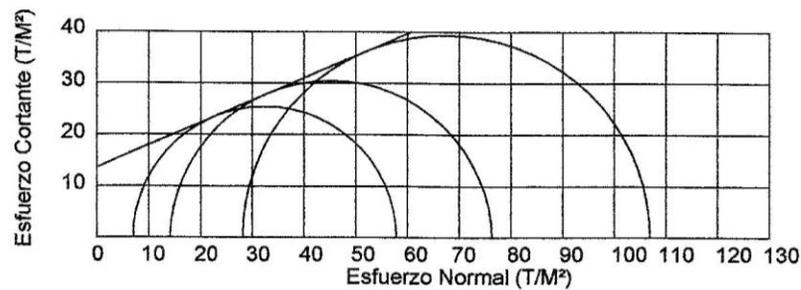
Pozo: 1

Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017

Profundidad: X m

Muestra: 7

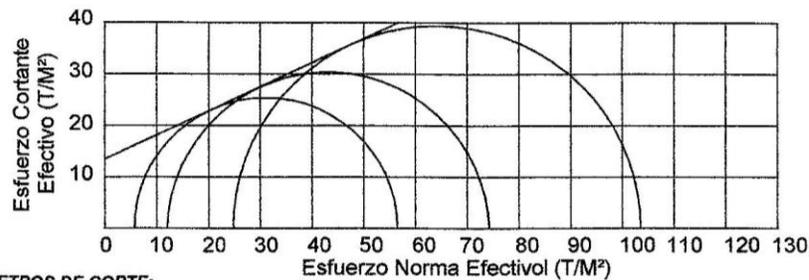
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Gris



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna: $\phi = 23.52^\circ$

Cohesión Aparente: $C_u = 13.58 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna Efectivo: $\phi' = 25.09^\circ$

Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 13.47 \text{ Ton/m}^2$

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

Interesado: Joseph Evarist Moreno
Proyecto: Trabajo de Graduación
Ubicación: 0
Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO
Norma: ASTM D 4767-04
Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017 **Profundidad:** XXX m **Pozo:** 1
Muestra: 7 W. Farrance

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Gris
Tipo de ensayo: Consolidado no drenada, con medición de presión de poro
Tipo de muestra: Espécimen Compactado

DATOS DEL ESPÉCIMEN (antes de consolidar):

| | | | |
|--------------------------|-----------------------|--|-------------------------|
| Diámetro Inicial: | 6.35 cm | Masa Inicial: | 654.93 |
| Área inicial: | 31.67 cm ² | Densidad Húmeda Inicial: | 1.63 Ton/m ³ |
| Altura inicial: | 12.70 cm | Humedad Inicial (%H): | 36.35 |
| Volúmen Inicial: | 402.2 cm ³ | Gravedad Específica - G_{20°C}: | 2.48 |

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:

Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 28.12 Ton/m²
Volumen de agua expulsado del espécimen: 4.7 cm³

PARÁMETROS DE CORTE:

Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

| Probeta No. | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|-------|-------|
| Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m²) | 33.40 | 37.06 | 42.63 |
| Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m²) | 40.43 | 51.12 | 70.75 |
| Esfuerzo Principal Menor (Ton/m²) | 7.03 | 14.06 | 28.12 |
| Presión Intersticial (Ton/m²) | 2.81 | 1.41 | 1.41 |
| Deformación en Rotura - ε (%) | 4.00 | 5.50 | 8.50 |
| Densidad Seca (Ton/m³) | 1.63 | 1.63 | 1.63 |
| Densidad Humeda (Ton/m³) | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| Humedad (%H) | 36.35 | 36.35 | 36.35 |

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.

Continuación Anexo 1.

Interesado: Joseph Evarist Moreno

Proyecto: Trabajo de Graduación

Ubicación: 0

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

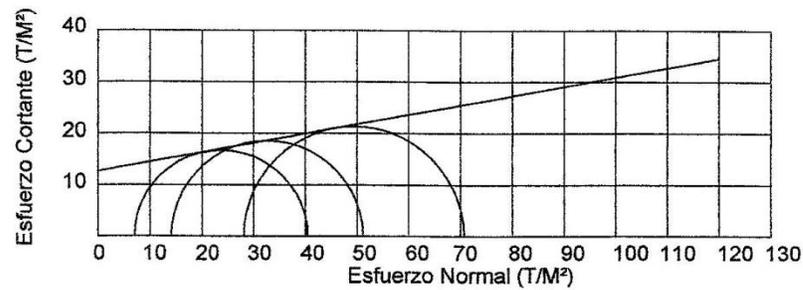
Fecha: martes, 21 de noviembre de 2017

Profundidad: X m

Pozo: 1

Muestra: 7 W. Farrance

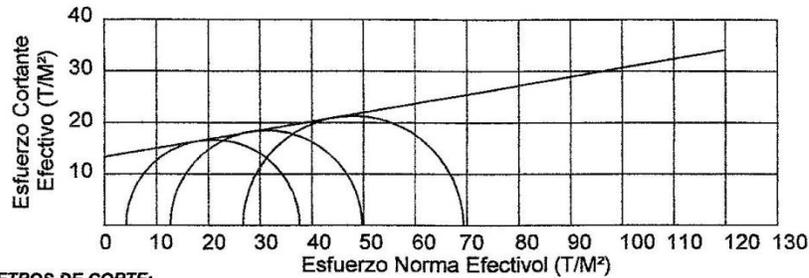
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Gris



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna: $\phi = 10.33^\circ$

Cohesión Aparente: $C_u = 12.65 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:

Ángulo de Fricción Interna Efectivo: $\phi' = 9.81^\circ$

Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 13.33 \text{ Ton/m}^2$

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de ensayos.