



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

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE
PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO**

Lia Fernanda Boiton Tello

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE
PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LIA FERNANDA BOITON TELLO

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2011.



Lia Fernanda Boiton Tello



Guatemala, 01 de septiembre 2014

Ingeniero

Guillermo Francisco Melini Salguero

Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Melini.

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que el trabajo de graduación **“DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO”**, elaborado por la estudiante Lía Fernanda Boiton Tello con carné 200815202, 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

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
10 de octubre de 2014

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 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Lia Fernanda Boiton Tello, 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 Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
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 del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación de la estudiante Lía Fernanda Boiton Tello, titulado DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

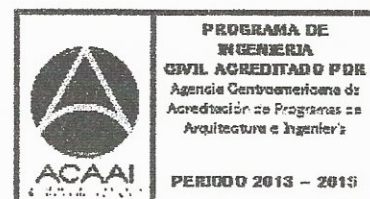

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2014.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





DTG. 657.2014

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: **DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN LOS SUELOS COHESIVOS MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ESTIMAR EL ASENTAMIENTO ELÁSTICO**, presentado por la estudiante universitaria **Lía Fernanda Boiton Tello**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Reinos
Decano

Guatemala, 17 de noviembre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi sabiduría, compañía y fuerza.
Mis papás	Fernando Amilcar Boiton Velásquez y Lia Guisela Tello Rendón por su amor, ejemplo y apoyo incondicional.
Mis hermanos y cuñadas	Jonathan, Fernando José, Gaby y Marianella por su cariño, apoyo constante y especialmente su ejemplo profesional.
Mis sobrinos	Por la alegría y sabiduría que han traído a nuestras vidas. Espero que este logro les sirva de ejemplo para alcanzar sus metas y nunca rendirse.
Mi novio	Erick, por tu apoyo para alcanzar esta meta y tu compañía constante.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis amigas y amigos	Por compartir tan gratos momentos, su apoyo y por estar ahí a pesar del tiempo y la distancia.
Mi asesor	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez por su apoyo y compartir su conocimiento para culminar este trabajo de graduación.
Laboratorio de Mecánica de Suelos del CII/USAC	Por su ayuda desinteresada y compartir sus conocimientos para efectuar los ensayos de laboratorio adecuadamente en este trabajo de graduación.
Maestras y maestros	Que durante las distintas etapas de vida me brindaron sus conocimientos y ejemplo.
La Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala	Por inspirarme desde pequeña y permitirme adquirir conocimientos para mi desarrollo profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1. Tipos de suelos	1
1.1.1. Suelos cohesivos.....	1
1.1.2. Suelos no cohesivos.....	2
1.2. Características de los suelos cohesivos.....	2
1.2.1. Plasticidad	3
1.2.2. Peso volumétrico	3
1.2.3. Densidad	4
1.2.4. Gravedad específica.....	4
1.2.5. Dilatancia.....	5
1.2.6. Tenacidad.....	6
1.2.7. Resistencia al corte en estado seco	7
1.3. Estados de consistencia.....	7
1.4. Estructura del suelo.....	10
1.5. Relaciones gravimétricas y volumétricas de los suelos.....	11
1.5.1. Fases del suelo.....	11
1.5.2. Relaciones de pesos y volúmenes	14
1.5.3. Relaciones fundamentales	15

2.	TEORÍA DE ELASTICIDAD	19
2.1.	Esfuerzos en una masa de suelo	19
2.1.1.	Principio de un esfuerzo efectivo.....	19
2.1.2.	Esfuerzo vertical y horizontal en el suelo	20
2.2.	Teoría de elasticidad.....	26
2.3.	Módulo elástico en suelos.....	28
3.	TEORÍA CÁLCULO DE ASENTAMIENTO EN SUELOS COHESIVOS	35
3.1.	Asentamientos basados en la teoría de elasticidad	35
3.2.	Valores teóricos de módulo elástico de los suelos.....	42
4.	ENSAYOS DE LABORATORIO	45
4.1.	Prueba de compresión triaxial.....	45
4.1.1.	Ensayo no consolidado – no drenado (UU).....	46
4.1.2.	Ensayo consolidado – no drenado (CU).....	48
4.1.3.	Equipo para el ensayo de compresión triaxial	50
4.2.	Ensayo de consolidación unidimensional.....	53
4.2.1.	Equipo para ensayo de consolidación	55
4.3.	Ensayo de corte directo	56
4.3.1.	Equipo para ensayo de corte directo	59
4.4.	Preparación de muestra para ensayos de laboratorio.....	61
4.4.1.	Densidad natural del material.....	61
4.4.2.	Elaboración de probeta remoldeada o compactada	61
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	65
5.1.	Propiedades de muestra de suelo para ensayos a realizar	65
5.1.1.	Propiedades muestra de suelo núm. 1	65

5.1.2.	Propiedades muestra de suelo núm. 2	67
5.2.	Determinación de módulo elástico por ensayo triaxial.....	69
5.2.1.	Triaxial tipo UU	70
5.2.2.	Triaxial tipo CU	77
5.3.	Determinación de módulo elástico por ensayo de corte directo	87
5.4.	Determinación de módulo elástico por ensayo de consolidación	93
5.5.	Ejemplo cálculo de asentamiento elástico en suelos cohesivos.....	98
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES.....		105
BIBLIOGRAFÍA.....		107
ANEXOS.....		109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama pérdida de volumen de vacíos debido a cargas dinámicas	6
2.	Límites para los cuatro estados de los suelos finos	8
3.	Tipos de Estructura del suelo: a) floculada b) dispersa	11
4.	Esqueleto de los granos de suelo con poros parcialmente llenos	12
5.	Esquema de las fases de los suelos	12
6.	Diagramas de bloque mostrando relaciones básicas	18
7.	Esfuerzos normales y tangenciales de la masa de suelo	21
8.	Carga puntual en masa de suelo	22
9.	Carga puntual longitud infinita	23
10.	Carga rectangular sobre franja infinita	24
11.	Carga uniformemente distribuida en área rectangular	26
12.	Curva esfuerzo–deformación arcilla suave (real e idealizada)	27
13.	Módulo elástico respecto al tipo de carga	33
14.	Asentamiento inmediato según teoría de elasticidad	36
15.	Asentamiento elástico cimentación flexible y rígida	37
16.	Valores α , α_{prom} , y α_r	38
17.	Variación de F_1 con H/B	39
18.	Variación de F_2 con H/B	40
19.	Factores A_1 y A_2 para cálculo de asentamiento	41
20.	Esquema equipo ensayo triaxial	51
21.	Esquema equipo ensayo de consolidación	56
22.	Esquema equipo ensayo de corte directo	60
23.	Cilindro moldeador y base	62

24.	Procedimiento de compactación y probeta final	63
25.	Gráfica esfuerzo – deformación triaxial UU muestra núm. 1	73
26.	Gráfica esfuerzo–deformación triaxial UU muestra núm. 2.....	76
27.	Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 1 (5 Ton/m ²)	80
28.	Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 1 (10 Ton/m ²)	80
29.	Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 1 (20 Ton/m ²)	82
30.	Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 2 (5 Ton/m ²)	85
31.	Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 2 (10 Ton/m ²)	85
32.	Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 2 (20 Ton/m ²)	86
33.	Gráfica esfuerzo-deformación corte directo muestra núm.1	92
34.	Gráfica esfuerzo-deformación corte directo muestra núm. 2	92
35.	Gráfica esfuerzo–deformación consolidación muestra núm. 1	95
36.	Gráfica esfuerzo–deformación consolidación muestra núm. 2	97

TABLAS

I.	Valores típicos de gravedad específica en suelos cohesivos	5
II.	Parámetros elásticos en suelos cohesivos	43
III.	Porcentaje de material fino análisis por hidrómetro muestra núm. 1	66
IV.	Porcentaje de material fino análisis por hidrómetro muestra	68
V.	Propiedades para ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 1	70
VI.	Datos ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 1	71
VII.	Datos esfuerzo y deformación ensayo triaxial tipo UU muestra 1	72

VIII.	Propiedades para ensayo triaxial UU muestra núm. 2	73
IX.	Datos ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 2	74
X.	Datos esfuerzo–deformación ensayo triaxial tipo UU muestra 2	75
XI.	Resultado de cálculo de módulo elástico ensayo triaxial tipo UU.....	77
XII.	Propiedades para ensayo triaxial tipo CU muestra núm. 1.....	78
XIII.	Datos ensayo triaxial consolidado no drenado CU muestra núm. 1	79
XIV.	Datos esfuerzo y deformación durante fase de carga triaxial tipo CU muestra núm. 1	81
XV.	Propiedades para ensayo triaxial CU muestra núm. 2	82
XVI.	Datos triaxial ensayo consolidado no drenado CU muestra núm. 2	83
XVII.	Datos esfuerzo–deformación fase carga ensayo triaxial CU muestra núm. 2	84
XVIII.	Módulo elástico ensayo triaxial tipo CU.....	86
XIX.	Propiedades para ensayo de corte directo muestra núm. 1	87
XX.	Datos ensayo de corte directo muestra núm. 1	88
XXI.	Datos esfuerzo–deformación corte directo muestra núm. 1	89
XXII.	Propiedades para ensayo de corte directo muestra núm. 2	89
XXIII.	Datos ensayo corte directo muestra núm. 2	90
XXIV.	Datos esfuerzo–deformación corte directo muestra núm. 2	91
XXV.	Módulo elástico promedio ensayo de corte directo	91
XXVI.	Propiedades de muestra núm. 1 ensayo de consolidación	93
XXVII.	Datos ensayo de consolidación muestra núm. 1	94
XXVIII.	Datos esfuerzo–deformación ensayo consolidación muestra núm. 1...	95
XXIX.	Propiedades de muestra núm. 2 Ensayo de consolidación	96
XXX.	Datos ensayo de consolidación muestra núm. 2	96
XXXI.	Datos esfuerzo–deformación consolidación núm. 2	97
XXXII.	Módulo elástico ensayo de consolidación	98
XXXIII.	Propiedades de estratigrafía para cálculo de asentamiento	99
XXXIV.	Cálculo de asentamiento inmediato suelo cohesivo	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S_e	Asentamiento elástico en los suelos cohesivos
G_a	Contenido de aire
ϵ	Deformación unitaria
ρ	Densidad del suelo
D_o	Diámetro inicial de probeta de ensayo
σ	Esfuerzo axial
τ	Esfuerzo cortante
S_r	Grado de saturación del suelo
$^{\circ} C$	Grados Celsius
G_s	Gravedad específica de los suelos
I_L	Índice de liquidez
∞	Infinito
L_o	Longitud inicial de la probeta de ensayo
E	Módulo de elasticidad

μ	Módulo de Poisson
Y_s	Peso específico de la masa sólida del suelo
Y_w	Peso específico del agua
Y_o	Peso específico del agua destilada
S_s	Peso específico de la fase sólida
S_m	Peso específico relativo de la masa de suelo
u_f	Presión de poro
M	Unidad de masa de los suelos
V	Unidad de volumen de los suelos
V_w	Unidad de volumen de agua en muestra de suelo
V_a	Unidad de volumen de gases en muestra de suelo
V_s	Unidad de volumen de sólidos en muestra de suelo
V_T	Unidad de volumen total de la muestra de suelo
V_v	Unidad de volumen de vacíos de los suelos
W_s	Unidad peso del suelo
I_p	Valor de índice plástico
W	Valor porcentaje contenido de humedad del suelo
W_p	Valor en porcentaje límite plástico del suelo

GLOSARIO

Anisotrópico	Cuando un material tiene distintas propiedades mecánicas en cada una de las direcciones de análisis.
Cohesivo	Propiedad del suelo en donde se manifiesta la atracción entre partículas, originada por la fuerza molecular y las películas de agua.
Compresibilidad	Grado en que la masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga.
Desairear	Procedimiento que sirve para separar o quitar el aire de un líquido.
Elasticidad	Representa la capacidad del suelo para sufrir deformaciones reversibles al momento de estar sometido a la acción de fuerzas externas y recuperar la forma original.
Isotrópico	Se refiere al material cuyas propiedades mecánicas son las mismas en todas direcciones.

Probeta	Corte de material modificado y sometido a diversos ensayos mecánicos a manera de determinar sus propiedades.
Saturación de suelo	Cuando el suelo se encuentra con todos sus vacíos ocupados por el agua.
Triaxial	Se considera como el ensayo donde las fuerzas externas actúan sobre la probeta, en tres direcciones.
Uniaxial	Donde las fuerzas actúan sobre un único eje.

RESUMEN

Para diseños estructurales de proyectos de ingeniería civil es importante conocer las propiedades del suelo, dentro de las cuales se encuentra el módulo elástico; el cual permite determinar ciertos parámetros de comportamiento del suelo, tales como la estabilidad de la estructura y asentamientos inmediatos que puedan existir. El presente trabajo de investigación otorga un análisis de 4 tipos de ensayos de laboratorio en suelos cohesivos, para determinar el valor del módulo elástico, definiendo cuál es el ensayo más adecuado para este objetivo de diseño.

En el primer capítulo se desarrollan conceptos básicos, útiles para la comprensión del comportamiento de los suelos según su tipo y características propias de los suelos cohesivos.

El segundo capítulo describe generalidades de la teoría de elasticidad en los suelos cohesivos, dentro de los cuales se considera el análisis de los esfuerzos a los que puede ser sometido un suelo y consideraciones a tomar al realizar un análisis elástico en los suelos.

El tercer capítulo se expone la teoría de cálculo de asentamiento inmediato en suelos cohesivos, basado en la teoría de elasticidad. Complementariamente información sobre parámetros estándar del valor de módulo elástico y correlaciones mediante ensayos de campo para determinar el valor de módulo elástico.

El cuarto capítulo describe los ensayos de laboratorio definidos para realizar el análisis de este trabajo. Los ensayos se enfocan en la determinación del valor del módulo elástico, conociendo una descripción del ensayo en general, sus características, resumen de procedimiento, equipo y preparación de la muestra de suelo.

El quinto capítulo muestra el desarrollo experimental realizado para el ensayo de compresión triaxial no consolidado no drenado, compresión triaxial consolidado no drenado, ensayo de corte directo y el ensayo de consolidación para 2 tipos de suelos cohesivos. Para cada ensayo se explica el procedimiento utilizado para determinar el valor del módulo elástico del suelo, por medio de la gráfica de esfuerzo-deformación y considerar una comparación de resultados.

OBJETIVOS

General

Desarrollar distintos ensayos de laboratorio a suelos cohesivos, a manera de definir el o los más adecuados para determinar el valor de módulo de elasticidad del suelo y analizar los resultados obtenidos para cada ensayo.

Específicos

1. Analizar los ensayos de triaxial no consolidado no drenado y consolidado drenado, así como el ensayo de corte directo y consolidación para su uso en el análisis de elasticidad en suelos cohesivos.
2. Determinar el comportamiento elástico de los suelos y su importancia para el diseño de cimentaciones.
3. Conocer qué valores estándar de módulo elástico hay en los suelos cohesivos y su cercanía con los valores encontrados en ensayos de laboratorio que se elaboren en este trabajo.
4. Mostrar los aspectos necesarios de muestreo y descripción de los ensayos para reconocer el comportamiento elástico de los suelos cohesivos.
5. Definir los métodos confiables de análisis de resultados para obtener el valor del módulo elástico aceptable.

INTRODUCCIÓN

Para el desempeño adecuado de estructuras de ingeniería civil es muy importante realizar un diseño estructural adecuado, especialmente lo que son las cimentaciones, las cuales se consideran como el último punto en donde se realiza la distribución de cargas mediante el contacto con la estructura y el suelo.

Para proceder a diseñar las cimentaciones de una estructura es necesario conocer las propiedades mecánicas del suelo en el cual se procederá a colocarla. En muchos casos durante el análisis estructural es necesario aplicar la teoría de elasticidad, en donde se considera obtener el valor del módulo de elasticidad del suelo a manera de poder calcular, por ejemplo; el módulo de balasto o el asentamiento inmediato que puede llegar a tener una estructura dependiendo de la carga a la que se someta el suelo.

Debido a la necesidad de obtener un valor de módulo elástico específico para cada tipo de suelo presente en la zona de análisis para el diseño de estructural, surge la necesidad de desarrollar este trabajo de investigación a manera de determinar el módulo elástico, realizando distintos ensayos de laboratorio determinando el más adecuado. Además de conocer la variabilidad de resultados de valor de módulo elástico que pueda existir entre un ensayo de laboratorio y otro.

Debido a la variedad de ensayos de laboratorio que existen para los suelos, se procede a analizar los principales, en donde se contemple el registro de carga a las que el suelo es sometido y su deformación en un ambiente controlado.

Para determinar el módulo elástico es importante señalar que existen pruebas en campo (*in situ*) y de laboratorio, de las cuales se considera la teoría de elasticidad como en cualquier material de análisis en ingeniería. Al aplicar la teoría de elasticidad el suelo se considera como un material uniforme y se analiza el punto en donde el suelo actúa proporcionalmente o linealmente ante un incremento de esfuerzo y su deformación.

La prueba de compresión triaxial consolidado no drenado, compresión no consolidado no drenado, corte directo y consolidación se consideran las más importantes para los análisis en los suelos. En este estudio se realizará un registro del procedimiento para obtener el valor del módulo elástico en suelos cohesivos, a manera de comparar si los datos obtenidos mantienen relación entre cada ensayo para una misma muestra de suelo y si mantienen relación con valores teóricos comúnmente utilizados.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

Se define como suelo una capa delgada sobre la corteza terrestre y dentro del ámbito de la ingeniería civil es un material terroso cuya función es sostener la infraestructura y actuar como soporte de las cargas. Para comprender el comportamiento elástico de un suelo es necesario definir ciertos conceptos, como las características, tipos y propiedades de los suelos.

1.1. Tipos de suelos

A partir de las características mecánicas, los suelos se pueden distinguir en 2 grandes grupos en donde la interacción de partículas es importante, ya que se diferencian por su fuerza de enlace, es decir la cohesión.

1.1.1. Suelos cohesivos

Este tipo de suelo se define por la adherencia existente entre las partículas que lo forman, debido a la atracción que ejercen una contra otra, este valor es apreciable pero inferior a 0,5 megapascals, ya que los valores mayores son propios de las rocas.

Para identificar este tipo de suelos es útil conocer su granulometría y plasticidad, ya que normalmente poseen más de un 50 por ciento de partículas finas y permite dar forma a la muestra, permaneciendo unida. Además tienen poca permeabilidad y en aspectos de construcción no son adecuados debido a su fácil asentamiento.

En los suelos cohesivos los granos finos están sometidos a otros tipos de fuerzas además de la gravitacional, por lo que esto ejerce una acción importante en el comportamiento mecánico del suelo, se debe a la relación de área y volumen, alcanzando valores de gran consideración y fuerzas electromagnéticas desarrolladas por sus compuestos minerales.

1.1.2. Suelos no cohesivos

Se nombran también como suelos no coherentes. Estos tienen la característica de originarse a partir de fragmentos de roca suelta y no tienen ninguna cementación. Normalmente su tamaño de grano se encuentra entre 2 a 0,05 milímetros de diámetro y se caracterizan por no tener plasticidad.

En los granos gruesos las fuerzas gravitacionales son las únicas que actúan dentro de ellos, por lo que todas las partículas gruesas tienen un comportamiento similar, no hay presencia de fuerzas iónicas debido a los minerales.

Además tienen las característica estos suelos, que su proporción de vacíos es menor que en los suelos cohesivos, por ende el comportamiento mecánico de estos, se define por características circunstanciales, tales como su compactación y la orientación de sus partículas.

1.2. Características de los suelos cohesivos

El agua se considera como parte fundamental de los suelos, ya que la mayoría de las veces es la que ocupa los espacios vacíos entre las partículas de suelo, y se considera importante para determinar el comportamiento mecánico.

1.2.1. Plasticidad

Es la capacidad de experimentar deformaciones irreversibles sin romperse, se le atribuye a la deformación de la capa de agua absorbida alrededor de los minerales que componen a los suelos finos. Esta propiedad en las arcillas es alta, debido a su estructura plana y granos finos.

Las arcillas por su estructura tienen una alta relación entre el área de la superficie y el volumen, por lo que existe mayor influencia de fuerzas que actúan en la superficie, es decir la propiedad de las partículas minerales de los suelos plásticos para pegarse una entre otras, dándole a la arcilla su característica pastosa. En algunos limos se pueden reconocer estas características de las arcillas, ya que basta solo un poco de partículas para que muestre adhesión y plasticidad.

Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separó los 4 estados de consistencia de los suelos cohesivos. Estos límites son: el límite líquido, plástico y de contracción que se determinan por medio de ensayos de laboratorio.

1.2.2. Peso volumétrico

Se reconoce como el peso del suelo contenido en una unidad de volumen. Se distinguen 2 tipos de pesos volumétricos, de los cuales la diferencia es el volumen de vacíos dentro de los suelos. La mayor aplicación para el peso volumétrico es la conversión de pesos de material a volúmenes o al contrario.

Para determinar el peso volumétrico se utiliza un procedimiento en el cual se toma un recipiente de volumen conocido, llenándolo, enrasándolo y luego se pesa y se resta el peso del recipiente. El peso volumétrico se define como el cociente entre el peso del aire de las partículas sólidas y el peso del agua, considerando igual temperatura y mismo volumen.

1.2.3. Densidad

Se conoce como densidad absoluta de un cuerpo a su masa contenida en una unidad de volumen sin incluir sus vacíos. También se distingue la densidad aparente, la cual incluye vacíos y se considera según la masa contenida en una unidad de volumen.

La densidad absoluta relativa en los suelos tiene como principal aplicación la determinación de la curva de saturación teórica en la prueba de compactación (Proctor) para carreteras y también es un dato útil para determinar los porcentajes de limo, arena y arcilla dentro de una muestra de suelo.

1.2.4. Gravedad específica

Es fundamental para la definición de propiedades físicas de los suelos se determina mediante la siguiente forma:

$$G_s = \frac{\text{Densidad de las partículas de suelo}}{\text{Densidad de agua}} \rightarrow G_s = \frac{M}{V \cdot \rho}$$

El valor de la gravedad específica depende de la composición mineralógica de los suelos y es adimensional.

Este valor es útil para calcular la relación de vacíos de un suelo en el análisis hidrométrico y para trazar la recta de saturación máxima del ensayo de compactación Proctor. Puede utilizarse también en la clasificación de minerales del suelo e identificación del tipo de suelo.

Tabla I. **Valores típicos de gravedad específica en suelos cohesivos**

TIPO DE SUELO	Gravedad Específica
Limo	2,67 - 2,70
Arena arcillosa	2,67
Limo arcillo arenoso	2,67
Arcilla limosa	2,75
Arcilla	2,72 - 2,80

Fuente: DJOENAI, Winda. Tablas para valores típicos de gravedad específica.

<http://www.constructorcivil.org>. Consulta: 10 de Junio de 2012.

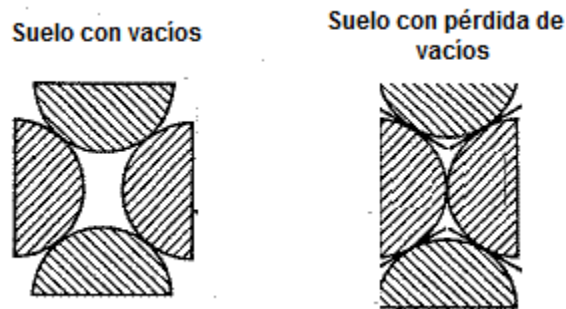
1.2.5. Dilatancia

Es útil para la identificación de suelos con partículas finas, ya que indica la capacidad de absorber o expulsar el agua, característica propia de los suelos cohesivos. Se realiza mediante una prueba manual, se toma una pequeña muestra de suelo muy húmeda para moldear una esfera y luego al golpearla con la otra mano se observa la velocidad en que el suelo libera agua o lo absorbe.

El cambio de intensidad de reacción para expulsar el agua, como se explicó anteriormente, define el tipo de fino contenido en el suelo, ocurriendo rápido en los limos y lentamente en las arcillas.

El fenómeno de expulsión de agua se debe a que al momento de presionar la muestra de suelo, pierde su volumen de vacíos (figura 1) de forma que llega a salir el agua, para las arcillas la pérdida y recuperación de espacios vacíos no sucede al momento de estar bajo cargas dinámicas.

Figura 1. **Diagrama pérdida de volumen de vacíos debido a cargas dinámicas**



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

1.2.6. Tenacidad

Esta propiedad mide la plasticidad de los suelos y según su capacidad de agrietamiento o desintegración debido a su pérdida de humedad. La mayor o menor tenacidad de la muestra de suelo se indica al acercarse al límite plástico y la rigidez de la misma.

La debilidad de la muestra en su límite plástico y la pérdida de enlace entre las partículas al rebasar el límite plástico, indica que el suelo está compuesto por una arcilla inorgánica de baja plasticidad.

Para determinar la tenacidad de un suelo se realiza una prueba de laboratorio sencilla, con la que se humedece el suelo y se moldea hasta elaborar cilindros de 3 milímetros de diámetro aproximadamente. Se amasa y se moldea hasta que llegar al límite plástico del suelo, perdiendo su plasticidad y humedad.

1.2.7. Resistencia al corte en estado seco

La resistencia a corte en estado seco es una medida de carácter y cantidad de la parte en que el suelo se encuentra en su forma líquida y se encuentra dentro de partículas sólidas, es decir con aspecto gelatinoso. La resistencia asciende cuando la plasticidad aumenta. Las arcillas son ejemplo claro de una resistencia alta.

1.3. Estados de consistencia

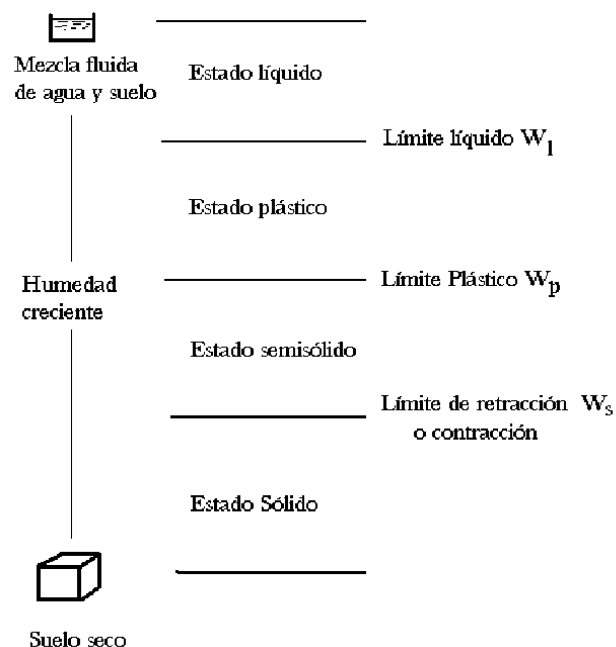
Como se mencionó anteriormente se han desarrollado varios criterios para medir la plasticidad de las arcillas, dentro de las cuales están los límites de Atterberg, de los cuales se llegó a definir que las arcillas pasan por estados de consistencia. Los estados de consistencia cambian dependiendo de la pérdida de agua que tiene el suelo, en los suelos cohesivos principalmente se puede observar que de un estado líquido se pasa a estado plástico y así perdiendo su humedad hasta llegar a un estado sólido.

En un estado líquido el suelo tiene las propiedades y apariencia de una suspensión, el estado plástico se conoce como aquel en que el suelo se comporta plásticamente, el estado semisólido tiene apariencia de sólido, pero puede perder volumen y en su estado sólido el volumen del suelo no varía con el secado.

Con la definición de los estados de consistencia se ha podido observar que la plasticidad en las arcillas no es permanente, sino cambia según las circunstancias en las que se encuentra y su humedad (figura 2), el cambio de consistencia de una arcilla a otra, depende además de la cantidad y tipo de minerales que la componen.

A partir del contenido de humedad límite se ha desarrollado un método de clasificación de las arcillas. Los estados son fases por las que pasa el suelo y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras, por lo que se definieron los límites de consistencia. La frontera entre los estados semilíquido y plástico se conoce como límite líquido y a la frontera entre el estado plástico y semisólido se le conocer como límite plástico.

Figura 2. **Límites para los cuatro estados de los suelos finos**



Fuente: HARRIS, José. *Clasificación de los suelos*. <http://dc367.4shared.com>.

Consulta: 4 de Junio de 2012.

Además de los límites de plasticidad (límite líquido y plástico) se definieron otros de consistencia, de los cuales no existen límites estrictos para distinguir uno del otro.

Estos límites son:

- Límite de adhesión que se define con el contenido de agua en el que el suelo pierde sus propiedades de adherencia.
- Límite de cohesión es el contenido de agua con el que los grumos ya no se adhieren entre sí.
- Límite de contracción que tiene importantes aplicaciones en la mecánica de suelos, indica la frontera entre los estados sólidos y semisólidos al determinar la cantidad de agua con la que el suelo ya no pierde volumen al secarse.

La diferencia entre el límite líquido y plástico es el rango de variación de humedad en la que la arcilla presenta plasticidad y se conoce como índice plástico del suelo. Para los suelos cohesivos el valor de índice plástico se encuentra entre 7 y 17, siendo este último valor indicador de un suelo altamente plástico y depende directamente de la cantidad de arcilla y no tanto de la humedad.

Un dato importante en campo es la comparación con los límites líquido y plástico para saber el contenido de humedad del suelo, mediante el índice de liquidez. El valor de índice de liquidez se da como porcentaje y al tener un 100 por ciento indica que el suelo está en una consistencia próxima a la que corresponde el límite líquido.

Índice de liquidez se define como:

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$$

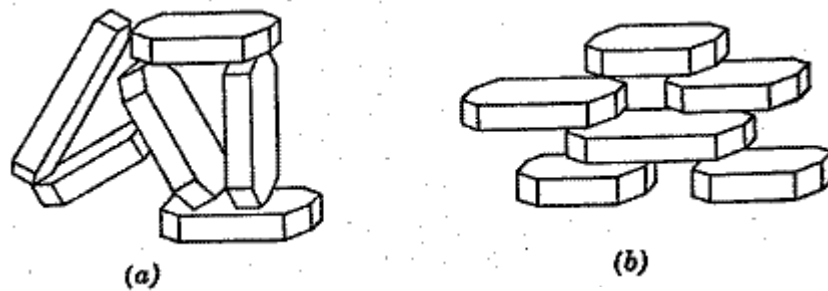
Donde w es la humedad, W_p es el límite plástico y el valor I_p representa el índice plástico.

1.4. Estructura del suelo

Este término hace referencia al origen y distribución de las partículas de una masa de suelo y a las fuerzas entre partículas de suelo adyacente, el comportamiento mecánico del suelo depende en gran parte de la estructura que posea. Un suelo flocculado tiene mayor resistencia, menor compresibilidad y una mayor permeabilidad, que el mismo suelo con la misma relación de vacíos pero en estados dispersos.

Los suelos se distinguen entre 2 casos según su estructura, que son la estructura flocculada y la dispersa, como se observa en la figura 3. En la estructura flocculada las partículas del suelo presentan contactos borde-cara, donde se atraen el uno al otro. Una estructura dispersa posee partículas en disposición paralela que tienden a repelerse mutuamente. Entre ambos estados se pueden encontrar muchos otros estados.

Figura 3. **Tipos de Estructura del suelo: a) floculada b) dispersa**



Fuente: LAMBE, William. *Mecánica de Suelos*. p. 85

1.5. Relaciones gravimétricas y volumétricas de los suelos

Consiste en distinguir las 3 fases constituyentes del suelo: sólida, líquida y gaseosa, relación entre las fases del suelo tiene una aplicación en la mecánica de suelos para los cálculos de esfuerzos.

1.5.1. Fases del suelo

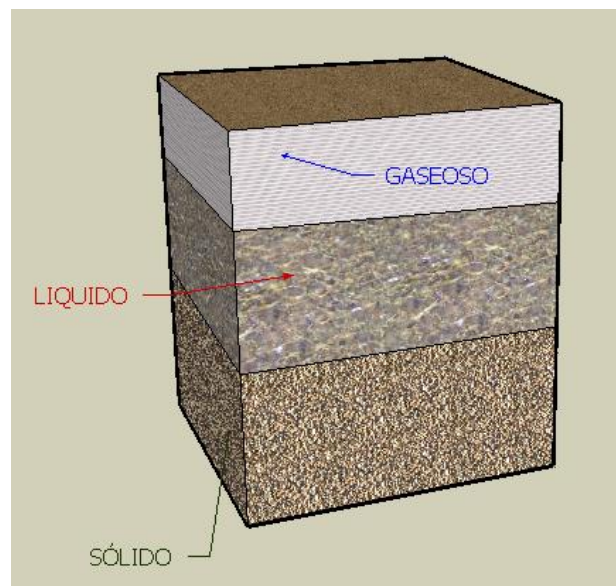
Como se mencionó anteriormente un suelo es compuesto por partículas, por lo que se le considera poroso y se distingue normalmente por 3 fases en las que se distingue una mezcla de sólidos, agua y aire. El conjunto de estos definen muchas de las propiedades físicas estándar de los suelos. En la figura 4 se muestra el esqueleto de los granos de suelo y en la figura 5 se esquematiza la distribución de cada fase de forma imaginativa.

Figura 4. **Esqueleto de los granos de suelo con poros parcialmente llenos**



Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de Laboratorio de Mecánica de Suelos*. p. 3

Figura 5. **Esquema de las fases de los suelos**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp.

Basándose en el esquema anterior se define como volumen total aquel formado por sus fases:

- Sólida: está formada por partículas minerales de suelo, que incluye la capa sólida absorbida.
- Líquido: generalmente formado por agua, pero en algunos casos puede haber presencia de otro tipo de líquido.
- Gaseoso: la mayor parte es aire, sin embargo en algunos casos puede haber presencia de otros gases.

De esta relación se distingue como volumen de vacíos aquel que se compone por la fase líquida y gaseosa, de lo que se determina lo siguiente:

$$V_T = V_s + V_v$$

Siendo V_s el volumen de sólidos, V_v el volumen de vacíos y V_T el volumen total.

Por otra parte el volumen de vacíos está formado por gases V_a y por agua V_w , a partir de estas expresiones se han definido algunas relaciones volumétricas, las cuales son muy importantes para comprender las propiedades mecánicas de los suelos y comprender totalmente su sentido físico.

1.5.2. Relaciones de pesos y volúmenes

Dada la definición de las distintas fases en mecánica de suelos, se definen relaciones de los pesos de cada fase por medio del concepto: peso específico, que relaciona el peso de la sustancia y su volumen.

Al peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua destilada a 4 grados Celsius con una atmósfera de presión. Para el agua destilada en sistemas derivados del métrico tiene un valor de 1,0 o una potencia entera de 10 que se denota γ_o , al referirse al peso específico del agua γ_w , difiere un poco del peso específico del agua destilada pero se considera igual a γ_o .

Se distingue como importante el peso específico de la masa del suelo, que por definición es la relación del peso del suelo entre su volumen. El peso específico más utilizado es el de la masa sólida del suelo y se define como:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

Para suelos cohesivos el valor de peso específico se considera entre 2,5 – 2,9 gramos por centímetro cúbico sin embargo se puede obtener otros valores.

El peso específico relativo se define como la relación del peso específico de la sustancia y el peso específico del agua destilada, distinguiéndose los siguientes pesos específicos relativos:

- Peso específico relativo de la masa del suelo S_m , que se define como:

$$S_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_o} = \frac{W_m}{V_m \gamma_o}$$

- Peso específico de la fase sólida del suelo S_s , se define de la siguiente forma:

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} = \frac{W_s}{V_s \gamma_o}$$

1.5.3. Relaciones fundamentales

Son de gran importancia para el manejo comprensible de las propiedades mecánicas de los suelos y un completo dominio en sentido físico, a manera de interpretar las propiedades adecuadamente y distinguir entre cada material.

- Relación de vacíos

Relación que expresa la proporción de vacíos en un elemento de suelo, se denota con la letra “e” y se obtiene relacionando el volumen de vacíos y de sólidos.

Este parámetro es adimensional y teóricamente puede tener un valor de 0 a ∞ pero en la práctica para suelos cohesivos, el valor no sobrepasa de 15 en arcillas altamente comprensibles.

- Porosidad

Se reconoce como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de su masa, se denota con la letra “n”. Se expresa en porcentaje y puede variar de 0 a 100. Los valores reales suelen estar entre 20 y 95 por ciento.

Los suelos cohesivos generalmente poseen una proporción de vacíos mucho más alta, debido a la actividad electroquímica de las partículas de arcilla. Los valores típicos suelen estar en el siguiente rango:

$$e = 0,55 - 5,00 \text{ y } n = 35,00 - 83,00 \%$$

Para las arcillas es de común interés la disminución del volumen de vacíos bajo la influencia de cargas, de tal forma que la porosidad tiene la desventaja de representar la relación entre 2 variables.

La porosidad puede expresarse en función de la relación de vacíos de manera que se expresa:

$$n = \left(\frac{1}{1+e} \right) e$$

A partir de la expresión $\frac{1}{1+e}$ anterior se puede expresar como la relación entre el volumen de los sólidos y el volumen total del suelo.

- Grado de saturación: relación del volumen de agua en el suelo y volumen de vacíos. Esta relación indica la proporción de vacíos ocupada por el agua dentro del suelo, varía de 0 a 100 y se define así:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

- Contenido de humedad: relación entre el peso del agua y el peso de su fase sólida en una determinada masa de suelo. Es un dato importante para definir muchas de las propiedades del suelo. Varía desde cero, cuando el suelo está completamente seco, hasta un máximo variable que se rige dependiendo del suelo y el lugar, ya que se han obtenido valores de humedad hasta de 100 por ciento o más.

$$w = \frac{P_w}{P_s} * 100$$

Se determina secando una muestra de suelo de peso constante en horno a temperatura de 100 a 110 grados Celsius y tomando sus pesos.

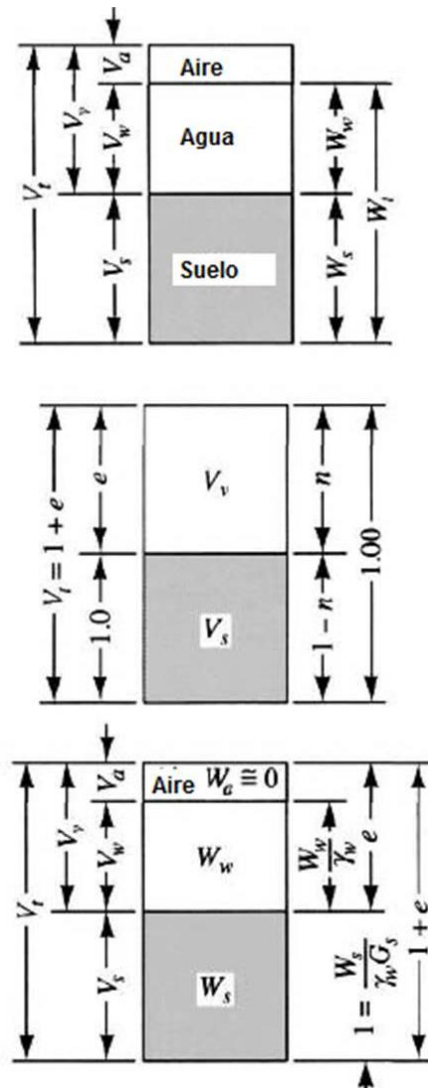
- Contenido de aire: expresa la proporción de aire presente en un elemento de suelo, su valor se encuentra entre cero y como máximo el valor de su porosidad. Esta relación es de escasa importancia en la práctica en comparación con las relaciones antes mencionadas. Se define de la siguiente forma:

$$G_a = \frac{V_a}{V_v}$$

Estas definiciones básicas en forma de ecuación son útiles para desarrollar cualquier relación matemática para elaborar un análisis geotécnico. Por ejemplo, el presentado anteriormente con la definición de porosidad a partir

de la relaciones de vacíos. Así se pueden realizar expresiones útiles con el peso específico seco, entre otros tomando como referencia la figura 6.

Figura 6. Diagramas de bloque mostrando relaciones básicas



Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation Analysis and Design*. p. 18.

2. TEORÍA DE ELASTICIDAD

La distribución de esfuerzos que se producen en el suelo debido a la aplicación de cargas resultantes de la construcción de obras de ingeniería dependen del espesor y la uniformidad de la masa del suelo, así como su tamaño, área cargada, sus propiedades de esfuerzo-deformación y la forma en que trabaja el suelo cuando se encuentra entre los puntos de fluencia de tensión y compresión. En el siguiente capítulo se desarrollarán la forma de análisis de los esfuerzos y aplicación de la teoría elástica en los suelos.

2.1. Esfuerzos en una masa de suelo

El comportamiento de un suelo sometido a esfuerzos es distinto dependiendo de la intensidad a la que se somete, dirección y su velocidad. En muchos problemas de ingeniería el interés principal se centra sobre los esfuerzos que actúan en una dirección en particular, la mayoría de los casos en dirección vertical al analizar cimentaciones.

2.1.1. Principio de un esfuerzo efectivo

Este principio consiste en una relación postulada por Karl Terzaghi (1923), la cual propone que en cualquier punto de una masa de suelo saturado el esfuerzo total en cualquier dirección es igual a la suma algebraica del esfuerzo efectivo en esa dirección y la presión intersticial. Esta relación se representa como:

$$\sigma_T = \sigma' + u$$

Donde:

El esfuerzo efectivo σ se refiere al peso efectivo de las partículas de suelo, una entre otra y a la presión generada por el agua en el elemento se le considera como presión intersticial hidrostática representada por el símbolo u . Ambos se consideran para un elemento saturado.

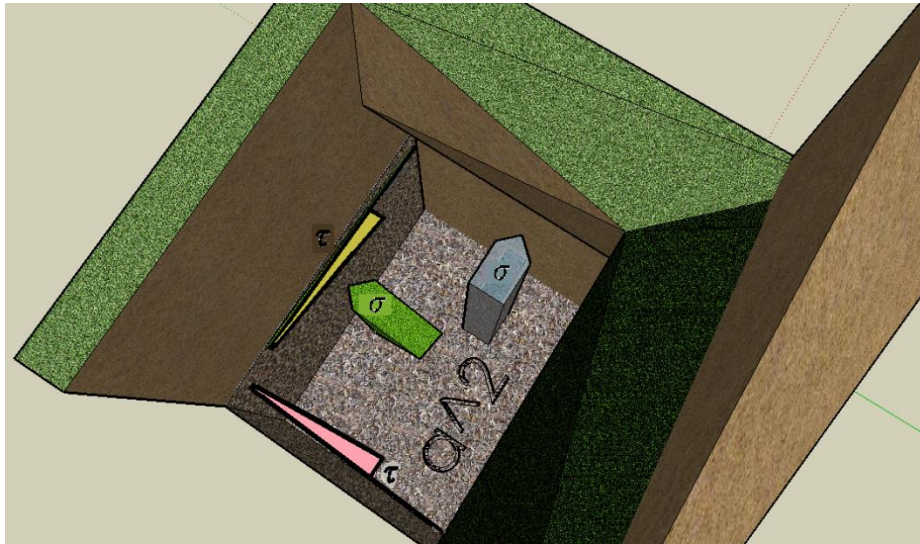
2.1.2. Esfuerzo vertical y horizontal en el suelo

En un elemento de suelo, a una profundidad Z , se puede considerar las fuerzas normales N y tangenciales T , sobre sus caras, que son las cargas sobre las partículas de suelo. Utilizando h como la dirección horizontal y v como la dirección vertical, se define la siguiente relación:

$$\sigma_v = \frac{N_v}{a^2} \quad \sigma_h = \frac{N_h}{a^2}$$

Siendo a la sección de una masa de suelo y representando los esfuerzos en la siguiente figura 7.

Figura 7. **Esfuerzos normales y tangenciales de la masa de suelo**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

El análisis de cargas y condición frontera debido a los esfuerzos verticales en el suelo se define como los cambios de esfuerzo dentro del suelo, sin tomar en cuenta los esfuerzos provocados por el suelo mismo. Estos casos son expresiones que derivan de los estudios de Boussineq, quien definió el incremento de esfuerzo debido a una carga puntual y con relaciones matemáticas que expresaron los siguientes casos:

- Carga puntual vertical Q (con R y θ)

La siguiente relación indica el incremento de esfuerzo en un punto de masa semi-infinita del suelo debido a la aplicación de una carga puntual Q en la superficie.

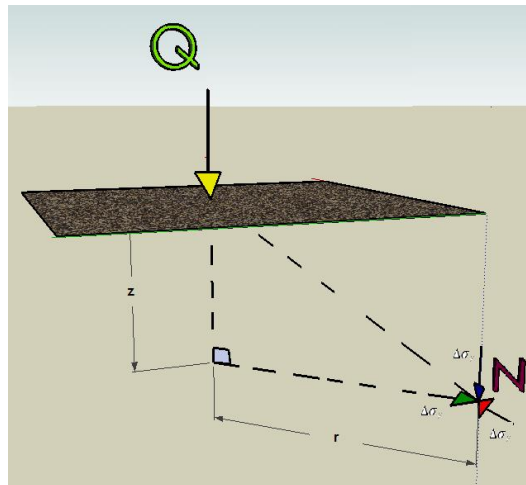
Dados por la figura 8 y la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma_v = \frac{3Q * z^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad \Delta\sigma_R = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{3R^2z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2v}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\frac{Q}{2\pi} (1 - 2v) \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

$$\Delta\tau_{rz} = \frac{Q}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

Figura 8. **Carga puntual en masa de suelo**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

Considerando a \$Z\$ como la profundidad desde la superficie del suelo hasta el punto \$N\$. La distancia radial \$R\$ desde \$N\$ hasta la línea \$Q\$. Y \$v\$ como la relación de Poisson.

- Carga lineal vertical de longitud infinita.

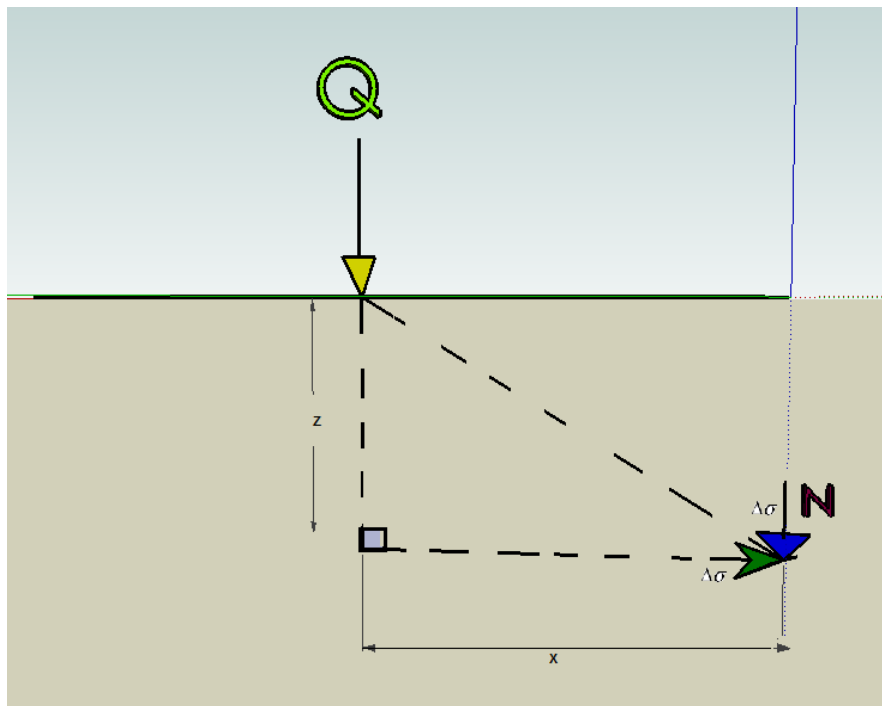
Los incrementos de esfuerzo en N debidos a la aplicación de carga lineal Q por metro, según la figura 9:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2Q}{\pi} \frac{Z^3}{(X^2 + Z^2)^2}$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{2Q}{\pi} \frac{x^2 z}{(X^2 + Z^2)^2}$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{2Q}{\pi} \frac{xz^2}{(X^2 + Z^2)^2}$$

Figura 9. **Carga puntual longitud infinita**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

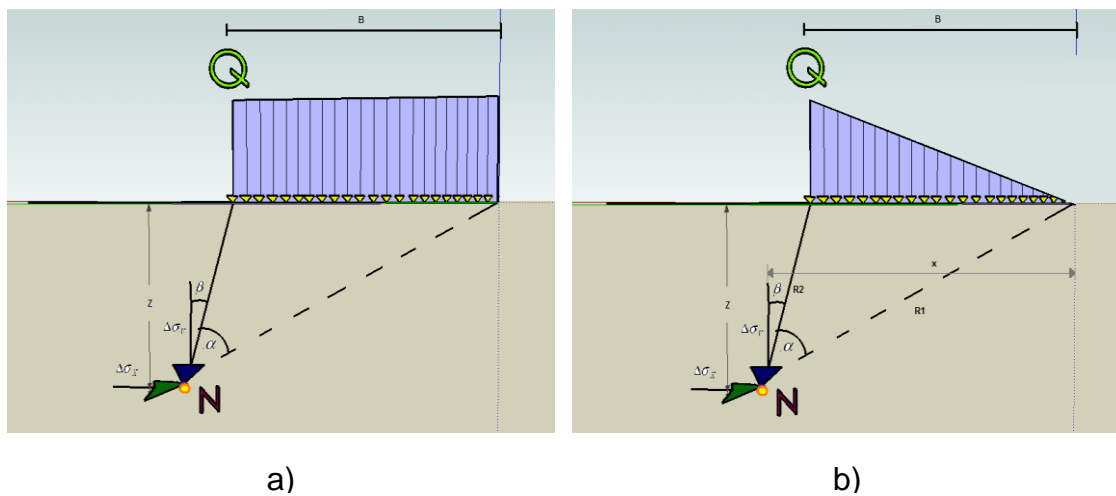
- Carga uniformemente distribuida sobre una franja infinita.

Los incrementos de esfuerzo en el punto N producidos por una presión uniforme q que actúa sobre una franja flexible infinitamente larga de ancho B con referencia a la figura 10a, son los siguientes:

$$\Delta\sigma_v = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin\alpha \cos(\alpha + 2\beta)] \quad \Delta\sigma_h = \frac{q}{\pi} [\alpha - \sin\alpha \cos(\alpha + 2\beta)]$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{\pi} [\sin\alpha \cos(\alpha + 2\beta)]$$

Figura 10. **Carga rectangular sobre franja infinita**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

- Carga con distribución triangular sobre una franja infinita.

Según se muestra en la figura 10b, cuando un esfuerzo aplicado se incrementa linealmente a través del ancho de la franja, conduce a una distribución triangular.

Los incrementos de esfuerzo en el punto “N” están dados por:

$$\Delta\sigma_v = \frac{q}{\pi} \left[\frac{x}{B} \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\beta \right] \quad \Delta\sigma_v = \frac{q}{\pi} \left[\frac{x}{B} \alpha - \frac{z}{B} \ln \frac{R_1^2}{R_2^2} + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right]$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{2\pi} \left[1 + \cos 2\beta - \frac{2z}{B} \alpha \right]$$

- Carga uniformemente distribuida sobre un área rectangular.

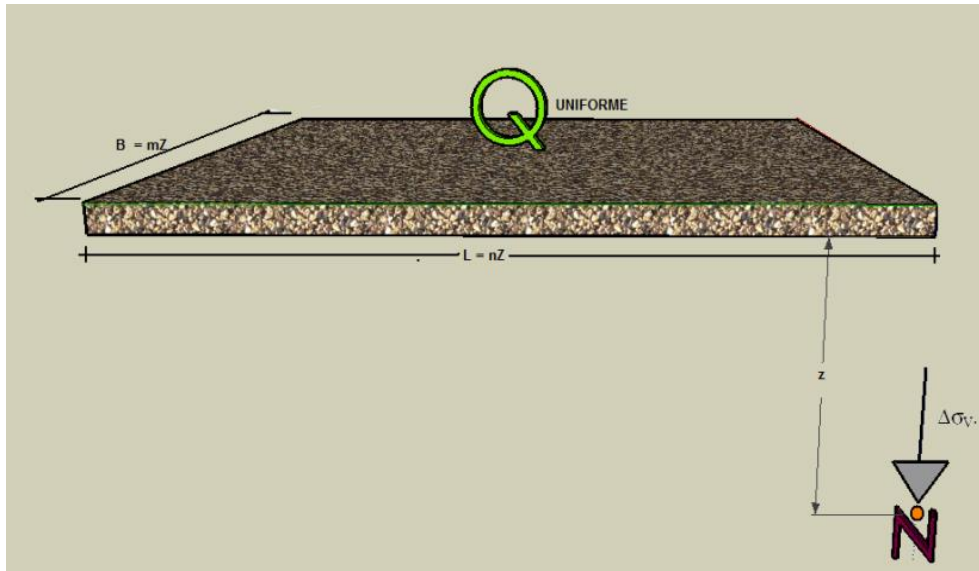
Se presenta una solución para el incremento de esfuerzo vertical total en un punto N debajo de una esquina de un área rectangular flexible uniformemente cargada de la siguiente forma:

$$\Delta\sigma_v = q I_q$$

$$I_q = \text{Factor de influencia de esfuerzos}$$

El valor I_q se expresa en función de los parámetros $m = B/z$ y $n = L/z$. En la figura 11 se puede observar de forma gráfica la distribución de esfuerzos. Este caso de esfuerzos sobre suelos se considera en lo que son edificios o construcciones más completas.

Figura 11. **Carga uniformemente distribuida en área rectangular**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

2.2. Teoría de elasticidad

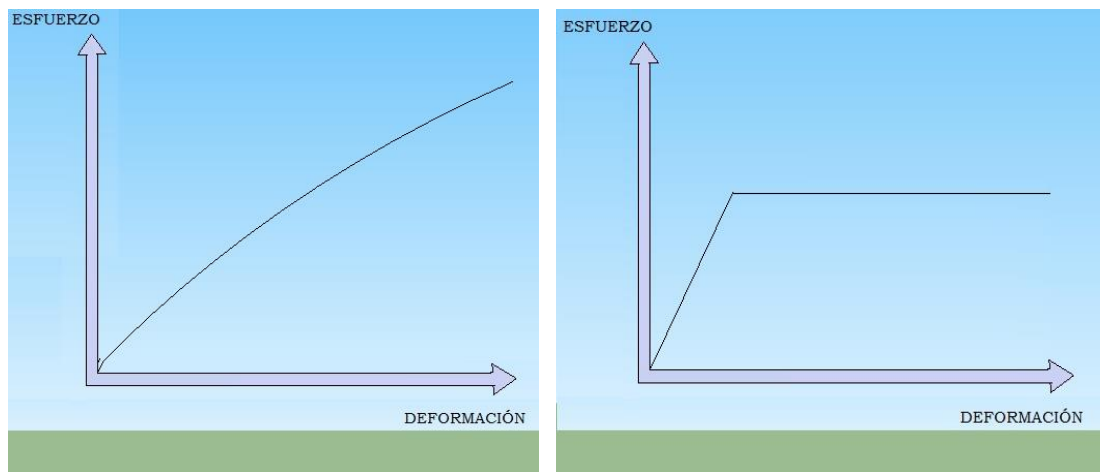
El concepto de elasticidad se ha logrado fundar en las características de esfuerzo-deformación de los materiales. Las curvas de esfuerzo-deformación difieren para cada material según sus características, pero se ha llegado a definir puntos en común:

- Para esfuerzos pequeños la relación esfuerzo-deformación es reversible teniendo un comportamiento elástico.
- Para esfuerzos mayores la relación se hace irreversible teniéndose un comportamiento plástico.

La transición de los estados plástico y elástico puede ser abrupta o gradual, muchas veces se define el uso de curvas de esfuerzo-deformación idealizadas más sencillas y esquemáticas debido a que algunas curvas reales no son aplicables a la teoría. Dentro del campo de la ingeniería es importante la distinción de ambas ya que son aspectos que relacionan características que definen el comportamiento del material.

En mecánica de suelos el concepto de plasticidad ha existido desde tiempos antiguos, sin embargo pasaron varios años en los se hizo necesario llegar a fundamentarse teóricamente. En la figura 12 se muestra una curva real e idealizada de una arcilla suave de este modo en los suelos se relaciona la teoría de plasticidad y elasticidad.

Figura 12. **Curva esfuerzo–deformación arcilla suave (real e idealizada)**



Fuente: elaboración propia, con programa SketchUp 2013.

Las características de esfuerzo-deformación de un material vienen representadas por el valor de sus módulos elásticos, dándonos una idea de la rigidez del material. Para la mecánica de los medios continuos, suelen ser el módulo elástico y el módulo de Poisson.

2.3. Módulo elástico en suelos

Es muy útil recurrir a conceptos y fórmulas de la teoría de elasticidad, en los suelos se considera una muestra en forma de cubo en la que se somete a fuerzas que actúan sobre tres ejes coordenados y bajo estas cargas sufre deformaciones que se expresan en términos de esfuerzo σ_x , σ_y , σ_z , considerándose por separado el efecto de cada esfuerzo y con el principio de superposición se combinan diciendo que el efecto de las cargas en un suelo determinando se toman de forma separada.

Para cumplir éste principio se debe cumplir lo siguiente:

- Cada efecto (deformación) está linealmente relacionado con la carga que lo produce.
- La deformación que resulta de cualquier carga dada es pequeña y no afecta las condiciones de aplicación de las demás cargas.

Una vez no se exceda el límite de proporcionalidad del suelo y si el esfuerzo en una cara no causa deformaciones grandes que afecte los cálculos. Se considera que el esfuerzo σ_x causa una deformación igual a σ_x/E en la dirección x y deformaciones de $-\mu\sigma_x/E$ en los ejes y y z respectivamente.

Análogamente se desarrollan relaciones similares en los otros ejes, si se combinan los resultados que se tienen de las deformaciones son:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}$$

Para aplicar la teoría de elasticidad en los suelos se deben de considerar los siguientes aspectos, el suelo es:

- un medio continuo.
- un material homogéneo.
- se considera como un material isótropo.
- La compresibilidad medida en el suelo es la misma en cualquier dirección.
- La relación esfuerzo-deformación del suelo es lineal.

Considerando los puntos anteriores permite establecer la solución para el estado de esfuerzos en un medio semi-infinito, cuando sobre él actúa una carga uniformemente distribuida, sobre una banda de ancho b y de longitud infinita.

En efecto, puede demostrarse que para la condición de carga mostrada los máximos esfuerzos cortantes inducidos en el medio vale q/π y ocurren en puntos cuyo lugar geométrico es un semicírculo, cuyo diámetro es $2b$.

Por ser una solución obtenida por la teoría de elasticidad puede garantizarse que ese estado de esfuerzos satisface las condiciones de equilibrio y de frontera, por lo que la solución será un estado de esfuerzos estáticamente admisible, siempre y cuando el valor de τ_{\max} no sobrepase el valor de resistencia del material.

Es importante considerar que el modulo elástico no es un parámetro constante en los suelos, sino también, una magnitud que describe con aproximación el comportamiento del suelo al someterse a esfuerzos determinados. La teoría de la elasticidad puede ser utilizada para estimar asentamientos inmediatos los cuales son altamente dependientes del módulo de elasticidad.

En la mecánica de suelos se suelen trabajar otros módulos como el de corte y módulo volumétrico, los cuales se pueden obtener a partir del módulo de Young y Poisson.

- Módulo elástico de Young

El módulo elástico lo definió el científico Thomas Young (1773-1829) a base de estudios de los jeroglíficos egipcios. Se definió como: la constante de proporcionalidad entre tensiones y deformaciones, mucho antes de definir el concepto de deformación y tensión.

En suelos es comúnmente utilizado para la estimación de asentamiento por cargas estáticas. Los materiales reconocidos como elásticos obedecen la ley de Hooke, se aplican un esfuerzo uniaxial σ_z a un cilindro se producirá una compresión vertical y una expansión lateral de la siguiente forma:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$$

Debido que la deformación uniaxial es adimensional se expresa en las mismas unidades que el esfuerzo uniaxial.

- Módulo de Poisson

Al aplicar un esfuerzo uniaxial σ_x en un cilindro elástico se produce una deformación lateral y axial. Al valor absoluto de esta relación se le conoce como módulo de Poisson μ , este valor para materiales elásticos se encuentra entre 0 y 0,5 que corresponde a un material que no se deforma lateralmente.

El incremento en la deformación en la misma dirección en la que se aplica la carga tendrá un valor de:

$$\delta\varepsilon_v = \frac{\delta\sigma_v}{E} \quad \text{ó} \quad \delta\varepsilon_v = \frac{\Delta L}{L}$$

Se puede observar también que en general, los incrementos de tensión en una dirección producen deformaciones en perpendicular a esa dirección.

$$\delta\varepsilon_h = -\nu\delta\varepsilon_v = -\frac{\nu}{E}\delta\sigma_v$$

En general es el efecto por el cual un cuerpo adelgaza cuando se estira o ensancha cuando es comprimido.

- Módulo Tangencial

Si se aplican esfuerzos tangenciales τ_{zx} a un paralelepípedo elástico (figura 13), se producirá una distorsión tangencial tal que:

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

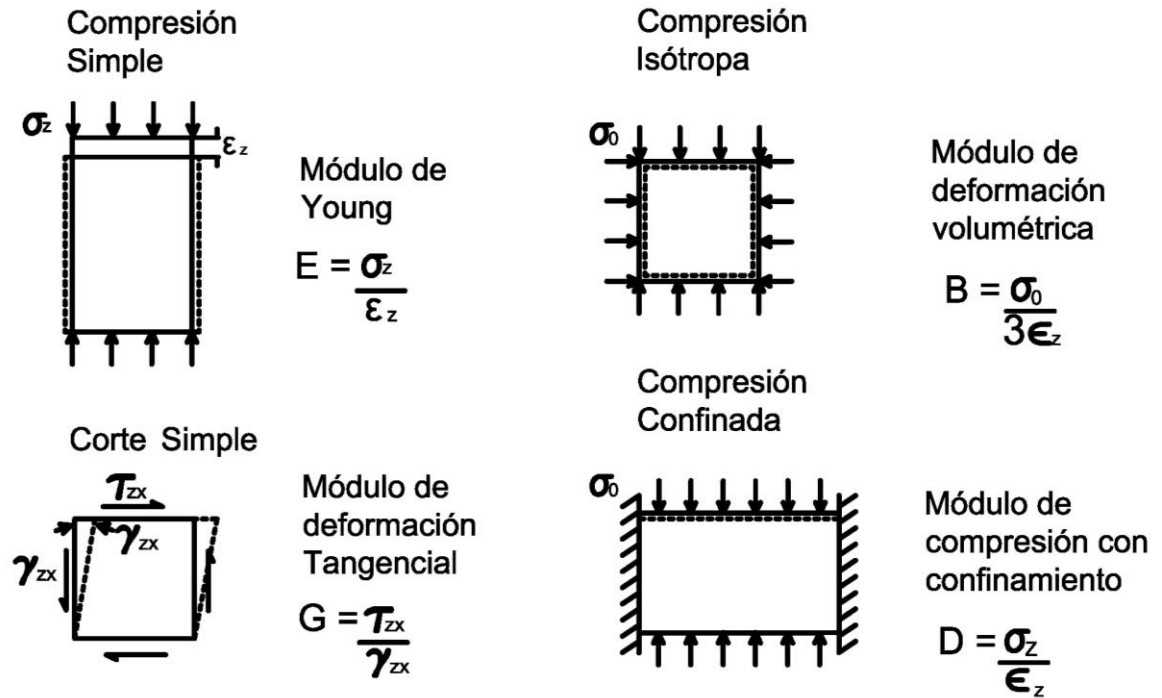
Donde G es el módulo tangencial definiéndose tres constantes básicas en la teoría de elasticidad que son el módulo elástico, el coeficiente de Poisson μ y el módulo tangencial, de las cuales es necesario obtener dos constantes ya que:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

También dentro de los suelos se puede definir otro tipo de módulos según la forma a la que se somete a esfuerzos los suelos (ver figura 13). Como lo es el módulo de deformación volumétrica y el módulo de compresión con confinamiento.

Existen distintos métodos para determinar el módulo de elasticidad E de la curva esfuerzo-deformación, considerando el suelo como un material isotrópico. Dependiendo de la forma inicial de la curva será calculada ya sea como el módulo de la tangente inicial o el módulo de secante inicial. En la mayoría de casos se considera la porción lineal que existe desde su deformación inicial hasta el 50 por ciento de esfuerzo al que se sometió la muestra. Tema que se tratará y aplicará de mejor manera en los capítulos 4 y 5.

Figura 13. **Módulo elástico respecto al tipo de carga**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2013.

3. TEORÍA CÁLCULO DE ASENTAMIENTO EN SUELOS COHESIVOS

Los suelos se comprimen al estar en contacto con cargas, como las de una estructura, este fenómeno se conoce como asentamiento. En los suelos cohesivos se tienen fundamentalmente dos componentes de análisis para el asentamiento, considerando el inmediato o elástico y otro por tipo diferido, asociado al fenómeno de consolidación. En el presente capítulo se explica el proceso de análisis teórico por asentamiento inmediato.

3.1. Asentamientos basados en teoría de elasticidad

La teoría elástica se utiliza para encontrar soluciones a este tipo de asentamiento, donde se utiliza el módulo elástico E y la relación de Poisson μ de manera que a partir de ambos se determine cuánto es que se va asentar el suelo y según el diseño estructural se límite al mínimo el asentamiento total y este tipo de asentamiento ocurre inmediatamente después de aplicar una carga, dependiendo de la flexibilidad de los cimientos y tipo de suelo.

Para el cálculo de asentamiento elástico S_e se aplica la Ley de Hooke, considerándose el trabajo en todos los ejes sobre una muestra de suelo y los esfuerzos a los que va a estar sometida debido a la carga de una cimentación como se explica en la figura 14.

Esta ley nos explica matemáticamente lo siguiente:

$$S_e = \int_0^H \varepsilon_z dz = \frac{1}{E_z} \int_0^H (\Delta p_z - \mu p_x - \mu \Delta p_y) dz$$

Donde:

S_e = asentamiento elástico.

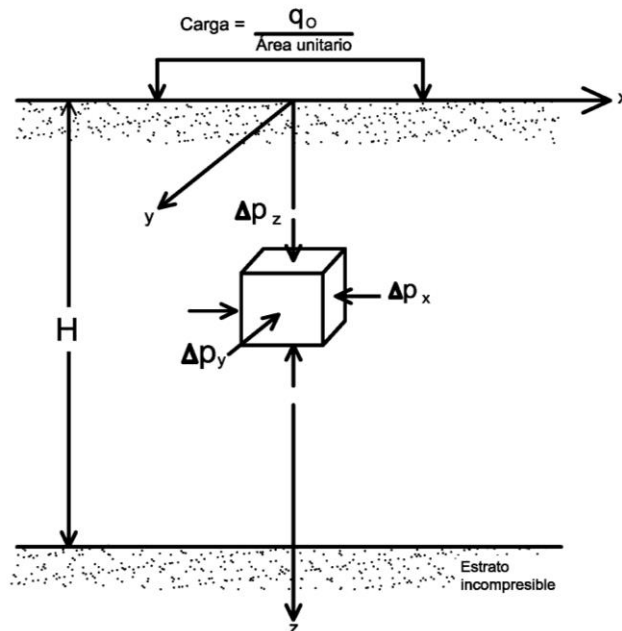
E = módulo de elasticidad del suelo.

H = espesor de estrato de suelo.

μ_s = relación de Poisson del suelo.

$\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ = incremento de esfuerzo debido a la carga neta en eje x, y y z.

Figura 14. **Asentamiento inmediato según teoría de elasticidad**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2013.

Analizando teóricamente la figura 15, con $D_f = 0$ y $H = \infty$, siendo la cimentación perfectamente flexible. El asentamiento se calcula de la siguiente manera:

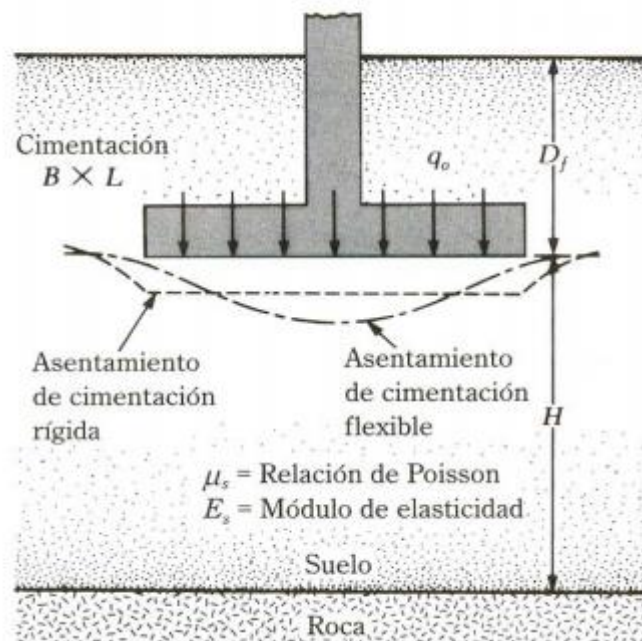
$$S_e = \frac{Bq_o}{E} (1 - \mu_s^2) \frac{\alpha}{2}$$

Esquina cimentación flexible.

$$S_e = \frac{Bq_o}{E} (1 - \mu_s^2) \alpha$$

Centro cimentación flexible.

Figura 15. **Asentamiento elástico cimentación flexible y rígida**



Fuente: BRAJA DAS, *Principios de cimentación*, p. 242.

El parámetro α se considera de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{1+m_1^2}+m_1}{\sqrt{1+m_1^2}-m_1} \right) + m_1 \ln \left(\frac{\sqrt{1+m_1^2}+1}{\sqrt{1+m_1^2}-1} \right) \right]$$

Donde:

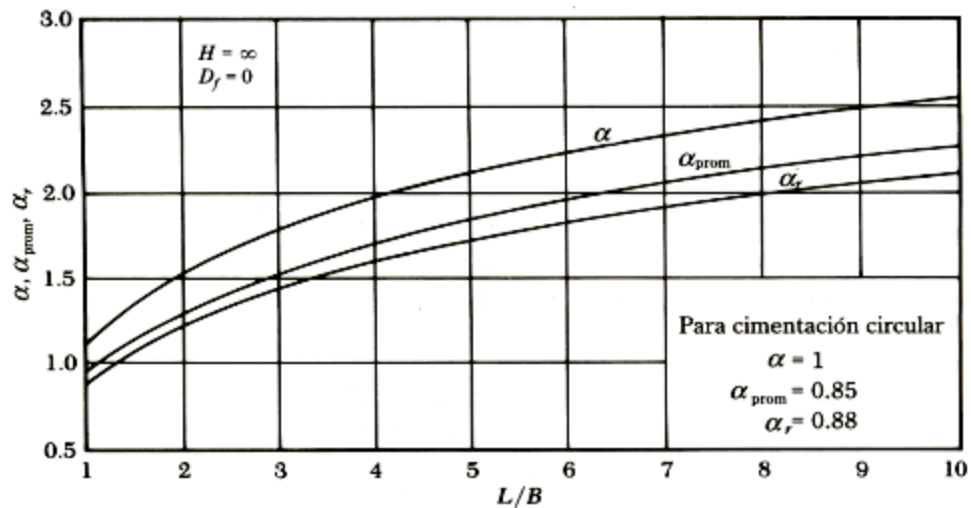
$$m_1 = L/B$$

B = ancho de cimentación

L = longitud de cimentación

En la figura 16 se muestran varias relaciones de longitud y ancho para α .

Figura 16. Valores α , α_{prom} , y α_r



Fuente: BRAJA M. DAS, *Principios de Ingeniería de Cimentación*, p. 242.

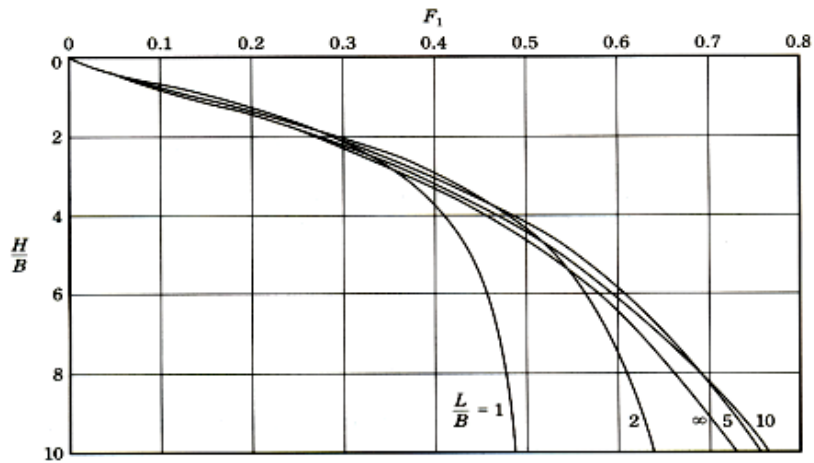
Para las distintas relaciones L/B los valores de α_r si $D_f = 0$ y $H < \infty$ debido a la presencia de una capa rígida incompresible, esquina de cimentación flexible:

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1-\mu_s^2) \frac{[(1-\mu_s^2)F_1 + (1-\mu_s-2\mu_s^2)F_2]}{2}$$

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1-\mu_s^2) [(1-\mu_s^2)F_1 + (1-\mu_s-2\mu_s^2)F_2]$$

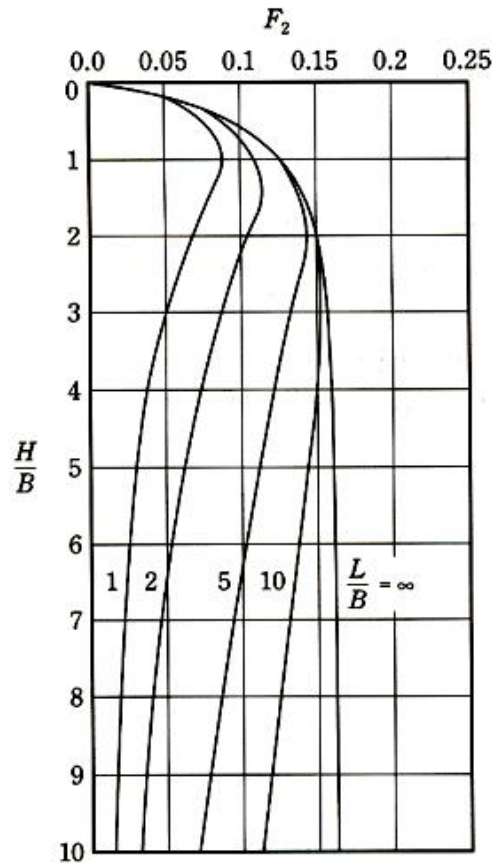
Las variaciones de F_1 y F_2 con H/B , figura 17 y 18.

Figura 17. **Variación de F_1 con H/B**



Fuente: BRAJA M. DAS, *Principios de Ingeniería de Cimentación*, p.244.

Figura 18. Variación de F_2 con H/B



Fuente: BRAJA M. DAS, *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, p. 244.

- Asentamiento elástico de cimentación sobre suelos cohesivos saturados

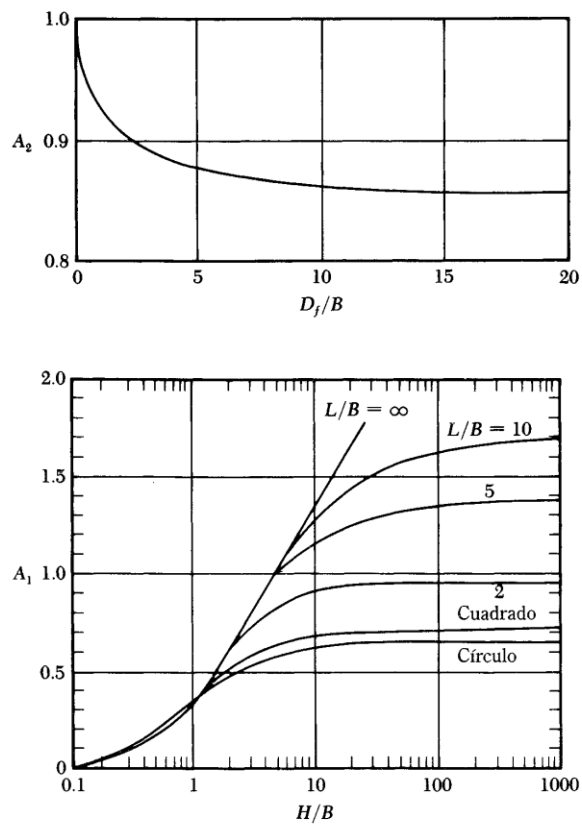
Tras la investigación del comportamiento de las arcillas a cargas, Janbu y otros autores entregaron la ecuación para obtener el asentamiento promedio de cimentaciones flexibles sobre suelos arcillosos saturados considerando una relación de Poisson $\mu=0,5$.

La ecuación presentada es la siguiente:

$$S_e = A_1 A_2 \frac{B q_0}{E_s}$$

Siendo A_1 una función de H/B y L/B y A_2 una función de D_f/B (ver figura 19).

Figura 19. Factores A_1 y A_2 para cálculo de asentamiento



Fuente: BRAJA M. DAS, *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, p. 246.

3.2. Valores teóricos de módulo elástico de los suelos

Los parámetros elásticos son necesarios para realizar los cálculos de asentamientos inmediatos en las cimentaciones, como el módulo elástico E_s y el módulo de Poisson μ . En algunas ocasiones éstos valores no están disponibles a partir de pruebas de laboratorio por lo que se construyen varias hipótesis para obtener rangos aproximados a los valores reales en los suelos.

Dentro de las hipótesis realizadas para obtener los valores de módulo de elasticidad, se realizan correlaciones con el número de penetración estándar en campo N_F y la resistencia a la penetración de cono q_c .

Para suelos friccionantes el módulo elástico se puede obtener de la siguiente forma utilizando el valor N del ensayo SPT:

$$E_s = 766 N_F \quad (\text{sistema internacional})$$

$$E_s = 8 N_F \quad (\text{sistema inglés})$$

Utilizando los valores de resistencia a penetración estándar de cono q_c se obtiene el módulo de elasticidad:

$$E_s = 2 q_c$$

Además se sugirieron las siguientes ecuaciones, según la correlación de factores de influencia unitaria para distintos tipos de cimentación:

$$E_s = 2.5 q_c \quad (\text{cimentación cuadrada y circular})$$

$$E_s = 3.5 q_c \quad (\text{cimentación corrida})$$

Para suelos cohesivos el módulo de elasticidad para arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas se estima como:

$$E_s = 250 \text{ c a } 500 \text{ c}$$

$$E_s = 750 \text{ c a } 1000 \text{ c}$$

Considerando c como la cohesión no drenada del suelo.

Tabla II. **Parámetros elásticos en suelos cohesivos**

Tipo de Suelo	Módulo Elástico MPa
Cohesivos	
Muy suave	2,0 – 15,0
Suave	4,1 – 20,7
Media	20,7 – 41,4
Firme	41,4 – 96,6
Arenosa	25,0 – 250,0

Basado en: BRAJA M. DAS, *Principios de Cimentaciones*, p. 250.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para obtener los parámetros elásticos de una muestra de suelo es necesario realizar ensayos de laboratorio que permitan clasificar el suelo y analizar su comportamiento de esfuerzo y deformación. En este capítulo se describen los ensayos que permitan aplicar la teoría de elasticidad mediante el análisis de la deformación del suelo y esfuerzos a los que se someta.

4.1. Prueba de compresión triaxial

Este ensayo es a compresión y es realizado en un espécimen de suelo (muestra inalterada o remoldeada) dentro de una membrana, la cual está sujeta a cargas verticales y presión lateral confinada, el procedimiento de carga vertical se repite para la misma u otras muestras bajo distintas presiones de confinamiento.

Esta prueba permite realizar varios procedimientos de los cuales se pueden determinar varios valores tales como la resistencia a corte, rigidez, consolidación, medición de presión de poro, características elásticas y de deformación de las muestras. Con las pruebas realizadas se puede obtener la envolvente de Mohr. Para analizar las características del suelo, es importante saber que el comportamiento de esfuerzo – deformación del suelo está sujeta a la presión de confinamiento e historia de esfuerzos en el suelo.

4.1.1. Ensayo no consolidado – no drenado (UU)

Consiste en someter una muestra de suelo a esfuerzos axiales en los ejes x, y & z a manera de simular las condiciones en que se encuentra el suelo en su forma natural, sin considerar los esfuerzos provocados por la presión de agua.

ASTM D 2850 – 03a: Standard Test Method for Unconsolidated – Undrained Triaxial Compression on Cohesive Soils

- Características del ensayo

En este ensayo no se permite el drenaje durante la aplicación de la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador, además no se puede consolidar bajo la presión de la celda. Es de fácil ejecución y son los más utilizados, es importante señalar que el ángulo de fricción varía según el tipo de ensayo triaxial realizado.

Los resultados de este ensayo son útiles para modelar, el caso de un terraplén o una carga colocada muy rápidamente sobre un manto de arcilla saturada, de muy baja permeabilidad.

En el ensayo de compresión Triaxial no consolidado no drenado puede ser desarrollado de la mejor forma para que la muestra no sea alterada teniendo presión confinada igual a la presión vertical total σ_v . Un valor apropiado de E es módulo de la tangente inicial considerándolo hasta un 50 por ciento del esfuerzo sometido durante el ensayo.

- Resumen de prueba

Se talla la muestra inalterada o se moldea simulando las propiedades del suelo en el suelo natural. Previo a iniciar el ensayo se pesa y luego se procede a colocar la probeta dentro de una membrada de hule en la cámara de presión.

En lo que consiste en ensayo propio, como primera etapa se debe aplicar presión de la cámara (σ_3) a la probeta que se encuentra dentro de una membrana de hule, el drenaje dentro de la probeta no debe permitirse para que la presión de poro que se desarrolle no sea igual a cero.

Como segunda etapa del ensayo se debe aplicar el esfuerzo desviador $\Delta\sigma$, (carga ascendente) y no permitir drenaje hasta conseguir la falla de la probeta. Es importante considerar que la presión de poro del agua.

$$u = u_f = u_a + u_{d(f)}.$$

Al fallar la probeta se procede a secar la muestra, realizar el cálculo de esfuerzos y humedad de la muestra y análisis de los resultados.

En la prueba no consolidada no drenada se consideran los siguientes aspectos:

- El esfuerzo principal mayor = $\sigma_3 + \Delta\sigma_f = \sigma_1$
- El esfuerzo total principal menor es igual a σ_3 .

Se dibuja el círculo de Mohr para esfuerzo total de falla. Para obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción partiendo de la tangente.

4.1.2. Ensayo consolidado – no drenado (CU)

Se considera en este ensayo los esfuerzos reales a los que se somete el suelo, siendo estos los esfuerzos dados entre las partículas y el agua presente entre las mismas.

ASTM D 4767 - 04: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils

- **Características del ensayo**

Para este ensayo se somete a presión la muestra por medio de la celda, de manera que se puede consolidar por completo. El progreso de la consolidación se puede observar por la medición de salida o entrada de agua a la muestra. Después de someter a presión la muestra, las conexiones de drenaje se cierran y se somete a esfuerzo desviador hasta someter la muestra a falla por corte.

El ensayo se realiza en una tasa para que no se exceda la deformación unitaria del 2 por ciento por hora para generar una presión de poros en la muestra y esta se pueda medir.

La medición de poro permite se mide hasta llegar a la falla permitiendo obtener los esfuerzos totales y efectivos de la muestra en toda su trayectoria. Se conoce esta muestra como consolidado-rápido. Usualmente se emplea para simular un el desembalse rápido de una represa o colocación rápida de un terraplén en un talud.

- Resumen de prueba

Al igual que en el ensayo tipo UU se procede a elaborar la probeta ya sea tallada o remoldeada, siendo para éste trabajo de graduación remoldeada y se tara su peso húmedo previo a iniciar el ensayo.

Como primera etapa se aplica presión a la probeta dentro de la cámara σ_3 , permitiendo el drenaje total de manera que la presión de poro desarrollada sea igual a cero ($u = u_a$).

Por último se aplica el esfuerzo desviador $\Delta\sigma$, no permitiéndose el drenaje hasta llegar a la falla. Durante la prueba se toma los valores de presión de poro del agua para determinar los esfuerzos efectivos.

En las pruebas consolidadas no drenadas en la falla se consideran los siguientes aspectos:

- El esfuerzo total principal mayor es igual a $\sigma_3 + \Delta\sigma_f = \sigma_1$
- El esfuerzo total principal menor es σ_3
- El esfuerzo efectivo principal mayor es igual a $(\sigma_3 + \Delta\sigma_f) - u_f = \sigma'_1$
- Esfuerzo efectivo principal menor es igual a $\sigma_3 - u_f = \sigma'_3$

Cambiando el esfuerzo principal menor se pueden efectuar múltiples pruebas a varias muestras de suelo, a partir de los resultados se puede dibujar los círculos de Mohr para los esfuerzos totales en la falla y se traza una tangente para definir la envolvente de falla. Con la ecuación:

$$s = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$$

Considerando c_{cu} y ϕ_{cu} como la cohesión consolidada no drenada y el ángulo de fricción. Además con la información de esfuerzo y deformación es posible construir la gráfica de esfuerzo versus deformación para cada presión de confinamiento a la que se pueda someter el suelo.

4.1.3. Equipo para el ensayo de compresión triaxial

Para realizar el ensayo de triaxial es necesario tener una serie de instrumentos a manera de recrear el escenario adecuado a manera de someter la muestra de suelo a los esfuerzos y conocer su comportamiento ante los mismos, como se muestra en la figura 20.

- Dispositivos para presión, control y medición de vacíos

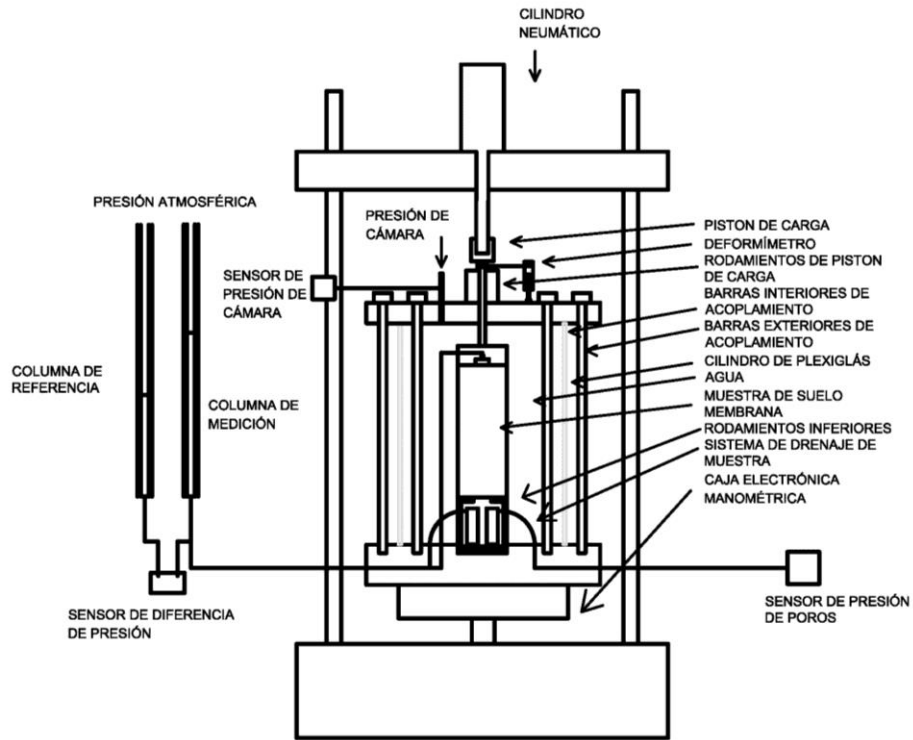
Los dispositivos de contrapresión pueden aplicar y controlar las presiones a manera de crear presión suficiente para confinar la muestra y consolidarla. También son útiles los medidores Bourdon, manómetros de presión, y dispositivos útiles para medir presiones y vacíos.

- Dispositivos de medición de presión de poros

Se puede utilizar un transductor electrónico de presión muy rígido cuya lectura es directa o un dispositivo indicador nulo que indica un control de presiones. El ensayo no drenado exige medir la presión de poro para determinar la cantidad de agua que pasa dentro o fuera de la muestra.

Para tomar la medida de presión de poro se considera que es la presión necesaria para evitar el movimiento del agua.

Figura 20. **Esquema equipo ensayo triaxial**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2013.

- Medidores de cambio de volumen

Por lo general se utiliza una bureta para medir en el ensayo consolidado no drenado el volumen de agua que entra y sale de la muestra de manera que se puede medir el volumen total de la muestra.

- Deformímetro

Con un indicador de deformación se mide la deformación vertical de la muestra, útil para realizar la gráfica de esfuerzo deformación, determinada por el recorrido del pistón sobre la parte superior de la muestra.

- Elementos sobre la muestra

Tapa y base, diseñadas para proporcionar un drenaje en ambos extremos del espécimen de diámetro igual a la muestra. La base se conecta a la cámara de compresión triaxial y la tapa se une con el pistón alineándolos verticalmente.

Piedras porosas y discos de papel filtro, las piedras rígidas son útiles para otorgar drenaje en los extremos de la muestra y se acompañan papel filtro para evitar que el material fino tape las piedras porosas.

Membrana de hule y orrines de hule: la membrana se utiliza para envolver el espécimen proporcionando protección y con los aros de goma se sella la tapa y la base de la muestra.

- Válvulas y dispositivos desaireador de agua

Con las válvulas se controla el paso del agua y deben de crear el mínimo de cambio en el volumen. Además es recomendable que se disuelva el gas y aire presente en el agua para saturar la muestra, especialmente en los ensayos consolidados.

En los ensayos de laboratorio para los suelos cohesivos, el módulo elástico es sensible al movimiento del suelo lo que puede incrementar la presión de agua en el poro y por tanto disminuir el esfuerzo efectivo en la muestra, reduciendo la dureza y el esfuerzo. Las fisuras pueden producir una reducción en el valor del módulo elástico de laboratorio comparado con el obtenido en campo.

4.2. Ensayo de consolidación unidimensional

Es utilizado para determinar parámetros de consolidación del suelo, especialmente suelos cohesivos, en donde se considera la reducción del vacíos al colocar una sobrecarga en el suelo.

ASTM D 2435 - 90: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading

El objetivo de este ensayo es determinar los parámetros necesarios para calcular asentamientos por consolidación, fenómeno de compresión debido a la extrusión de agua de los vacíos en suelos finos como resultado del incremento de carga, y los tiempos en que se producen.

- Características del ensayo

La finalidad de éste ensayo es determinar la velocidad y grado de asentamiento que experimenta una muestra de suelo saturado al ser sometido a una serie de incrementos de carga. Durante la prueba se aplica una serie de incrementos crecientes de carga axial, donde el agua tiende a expulsarse con el tiempo.

La probeta de ensayo (remoldeada o inalterada) se encuentra confinada lateralmente y se carga verticalmente. Con los datos registrados se construyen gráficas de Taylor o logarítmicas con las que se define el tiempo de consolidación primaria, de la cual se puede dibujar la gráfica de compresibilidad que es útil para determinar obtener parámetros para el cálculo de asentamientos por consolidación.

El ensayo se realiza con mucha precisión, de manera que se pueda registrar deformaciones pequeñas. Además durante el ensayo la muestra debe permanecer saturada y es importante anotar el tiempo exacto cuando se mide la deformación, anotando las cargas.

Los datos adquiridos durante el ensayo se utilizan para realizar la gráfica de esfuerzo – deformación analizando la información como se indica en el capítulo siguiente.

- Resumen de la prueba

Se coloca la muestra en el marco de carga, se satura y se coloca en cero el Deformímetro, luego se procede colocar el primer incremento de carga, tomando lectura del micrómetro en intervalos de 15 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 horas, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 12 horas, y 24 horas.

Cuando la muestra haya sido consolidada bajo el primer incremento se procede a dibujar la curva de consolidación una vez se define claramente el tramo recto de consolidación secundaria, se considera que se ha completado la consolidación primaria; y se puede colocar el segundo incremento de carga, se repite el procedimiento para las cargas sucesivas de hasta completar la prueba en lo referente a ciclo de carga.

Observando todas las curvas de consolidación obtenidas, seleccionar un se determina el tiempo correspondiente para la consolidación secundaria de todas ellas.

Anotar las presiones y las lecturas del micrómetro usando las curvas correspondientes a ese y se realiza un trazo semilogarítmico, con las presiones en escala logarítmica y las lecturas en escala natural formando la curva compresibilidad.

Una vez aplicados todos los incrementos de carga necesarios, según la información proporcionada por la curva presión-lecturas del micrómetro, se debe quitar las cargas en decrementos. De la cual se puede trazar curvas de expansión análogas a la consolidación.

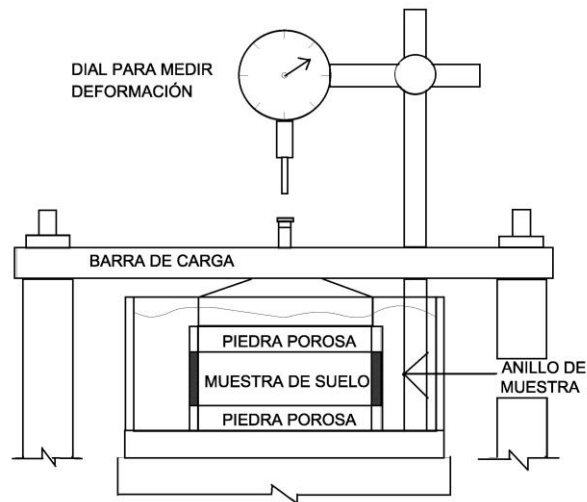
Al terminar la prueba se quita el micrómetro y se desarma el consolidómetro. Cuidadosamente se seca el agua del anillo de consolidación y de la superficie de la muestra, cubriendo la muestra y el anillo, luego pesar el conjunto y se procede a secar la muestra en horno para obtener su peso seco.

4.2.1. Equipo para ensayo de consolidación

Aparato de carga o edómetro que consiste en un aparato de 250 kilogramos de capacidad útil para aplicar carga vertical al espécimen. Estará provisto con un lector de carga y un dial lector de deformación de 0,01 milímetros o 0,001 milímetros de precisión, como se puede observar en la figura 21.

- Consolidómetro un equipo estandarizado que sostiene la muestra en un anillo que es colocado sobre la base. El consolidómetro debe proveer facilidades para saturar la muestra, aplicar carga vertical y verificar el cambio de grosor en la muestra. Dentro del consolidómetro se colocan dos piedras porosas y un bloque o pistón de carga.

Figura 21. **Esquema equipo ensayo de consolidación**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2013.

- Anillo de espécimen con orilla afilada de 2,0 a 2,6 pulgadas de diámetro, espesor mínimo de 0,5 pulgadas, herramientas y accesorios para moldear o tallar la muestra, agua destilada y cronómetro.
- Balanza y horno, balanza con capacidad superior a los 1000 gramos y precisión de 0,01 gramos. Horno de secado con circulación de aire y capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ Celsius.

4.3. Ensayo de corte directo

Se considera simular dentro del suelo, esfuerzos a corte sobre un solo plano, sometiendo al mismo tiempo a cargas normales a manera de simular los esfuerzos a los que se encuentra sometido el suelo en su estado natural.

ASTM D 3080-98 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions

Este ensayo es común para determinar la resistencia de los suelos en estudios de deslizamientos es utilizado para determinar la resistencia al corte a lo largo de planos débiles reconocibles dentro del suelo. Los resultados de este ensayo son aplicables en suelos donde la consolidación completa ya ha ocurrido y la falla ocurre lentamente.

- Características del ensayo

El ensayo se realiza deformando una muestra a velocidad controlada cercano a un plano según se desee configurándolo en la máquina de corte. Durante el ensayo se somete a cargas normales diferentes entre tres a cuatro muestras de manera que se puede determinar su efecto sobre la resistencia a corte y desplazamiento. La prueba es adecuada para el ensayo consolidado no drenado porque el drenaje en la muestra es muy poco.

Las condiciones de ensayo deben ser representativas a las condiciones en campo, considerando humedad y esfuerzos normales. Una de las mayores ventajas de éste ensayo es su facilidad de ejecución permitiéndose varias pruebas en un tiempo corto.

La superficie de falla es predefinida y no depende de las propiedades del suelo, por lo que otorga valores mayores a los obtenidos en un ensayo Triaxial. Durante esfuerzos de corte en este ensayo y los desplazamientos no están distribuidos uniformemente dentro de la muestra, puede ser afectado por la presencia de partículas de suelo o fragmentos de roca.

- Resumen de prueba

El ensayo consiste en colocar la muestra de ensayo en una caja de corte directo, de manera en que se coloca la muestra entre dos bloques porosos a manera que no se aplique un torque a la muestra. En condiciones para aplicar un esfuerzo normal a las caras de la muestra, medir el cambio de espesor y permitir drenaje de agua a través de los bloques porosos.

La caja de corte directo está compuesta por dos anillos de carga, uno superior y otro inferior los que se desplazan horizontalmente uno con el otro. Se aplica el esfuerzo normal donde se debe humedecer o drenar la muestra del ensayo, consolidar la muestra y se desplaza el marco horizontal a una velocidad de deformación constante.

En este ensayo las muestras se pueden saturar completamente en un grado de saturación relativamente alto, teniéndose cuidado con la posible saturación del material si tienen características expansivas. Se realizan varias pruebas para un mismo suelo utilizando distintas presiones normales y se grafica una curva esfuerzo-deformación para obtener el valor de cohesión y ángulo de fricción.

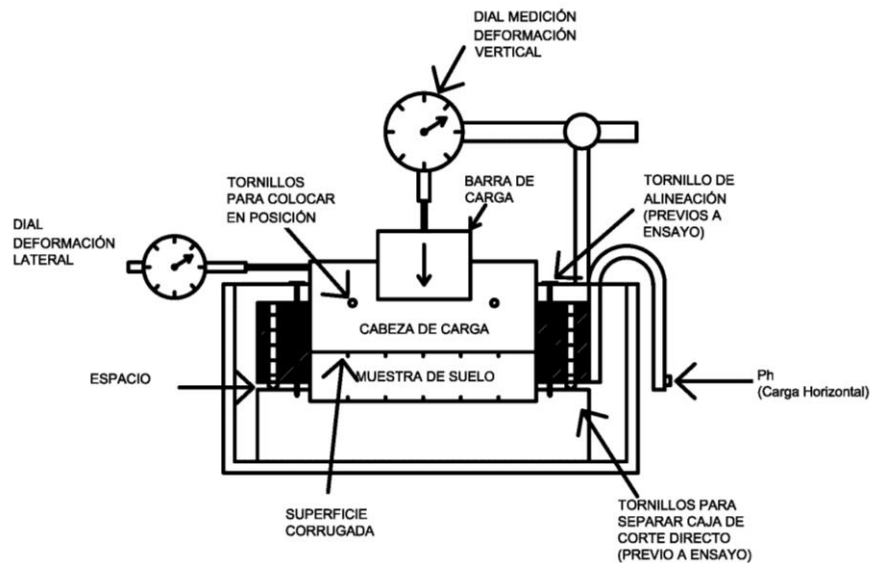
Las cargas normales que se utilizan en el ensayo deben incluir los esfuerzos máximos que se suponen que ocurrirán en el terreno. El ensayo con se debe realizar con cuatro cargas definiendo la envolvente de falla, siendo para suelos cohesivos que pasa alejado del origen.

4.3.1. Equipo para ensayo de corte directo

Para realizar este ensayo es necesario utilizar una serie de instrumentos, a manera de simular los esfuerzos a los que se encuentra sometido el suelo y las condiciones en que se encuentra.

- Aparato de corte directo: es un instrumento diseñado para contener la muestra entre dos bloques porosos (ver figura 22). Además es útil para aplicar un esfuerzo normal y medir cambio de espesor. Debe ser capaz de aplicar una fuerza de corte a lo largo de un plano de corte predeterminado paralelo a las caras de la muestra.
- Caja de corte directo: normalmente de forma cuadrada, hecha de acero inoxidable, bronce o aluminio, teniendo dispositivos de drenaje en su parte superior o inferior. Dividido en un plano horizontal en dos mitades ajustado con tornillos de separación.
- Piedras porosas: estos bloques permiten el drenaje de la muestra de suelo a lo largo de los extremos superior e inferior de la muestra. Tienen como función transferir los esfuerzos de corte horizontal en la muestra. La permeabilidad de las rocas deben ser mayores a las del suelo, con una textura muy fina para prevenir una intrusión excesiva en los poros de la misma y si transfiere los esfuerzos de corte horizontal con material rugoso para provocar fricción.

Figura 22. **Esquema equipo ensayo de corte directo**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2013.

- Mecanismo de carga para medir y aplicar fuerza normal: se puede aplicar con un marco de carga activado por pesas capaz de mantener la fuerza normal dentro de una variación de ± 1 por ciento de la fuerza rápidamente sin excederla.
- Mecanismo para aplicar esfuerzo de corte a la muestra: debe ser capaz de aplicar el esfuerzo de corte a una velocidad uniforme de desplazamiento, mantenida con un motor eléctrico determinando la carga en un indicador como una celda o un anillo de carga.
- Instrumento de medición para el esfuerzo de corte, soporte de la caja para corte directo, anillo de corte e indicadores de deformación útiles para determinar la información requerida en un ensayo.

4.4. Preparación de muestra para ensayos de laboratorio

El fin de los ensayos de laboratorio es simular el comportamiento del suelo expuesto a ciertos esfuerzos considerando su entorno y características propias en su estado natural. Para elaborar las probetas de ensayo se debe tener la humedad natural del material y la densidad del mismo.

4.4.1. Densidad natural del material

La densidad del material se obtiene por medio de una porción de suelo inalterado extraído de campo, la cual se procede a obtener su peso natural (P_n). A la porción de suelo se le procede a colocar un recubrimiento con parafina con el fin de no perder sus propiedades naturales, la muestra se pesa nuevamente obteniendo su peso con parafina (P_p).

Conociendo su peso se procede a obtener su peso dentro del agua, el cual considerando la teoría de Arquímedes se obtiene la densidad del suelo considerando las diferencias entre los suelos y la densidad de la parafina.

4.4.2. Elaboración de probeta remoldeada o compactada

De la muestra obtenida en campo se procede a elaborar la probeta compactada utilizando un cilindro moldeador con una relación de diámetro y altura de 1:2. La probeta se elabora compactando en capas utilizando la misma humedad del material dentro de un molde compactador, a manera de ajustar el número de capas, número y fuerza de los golpes realizados por un martillo de goma. Cada capa debe ser escarificada antes de compactar la siguiente.

Figura 23. **Cilindro moldeador y base**



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

- **Resumen de procedimiento**

Se procede a engrasar el cilindro compactador y la base como se observa en la figura 23, a manera de evitar que el suelo se pegue al molde al momento de desmontarlo. Luego se procede a colocar un recubrimiento con plástico y se unen ambas partes del cilindro junto con la base por medio de una abrazadera para sujetarlo.

Una vez obtenida la densidad, considerando el volumen del cilindro igual a 565,06 centímetros cúbicos, se procede a compactar la muestra en tres partes (ver figura 24) colocando un tercio del peso total dentro del molde seguidamente se coloca el cilindro compactador el cual se golpea hasta alcanzar la marca o indicador de un tercio del volumen de la probeta.

El procedimiento de compactación por medio de golpes se realiza sobre las tres partes de ensayo hasta la altura final que indica el cilindro, por último se separa cuidadosamente el molde compactador y la base hasta obtener la probeta final.

Figura 24. **Procedimiento de compactación y probeta final**



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

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Propiedades de muestra de suelo para ensayos a realizar

Para realizar apropiadamente los ensayos para determinar el módulo elástico es necesario conocer sus propiedades como su granulometría, límites, gravedad específica y densidad.

5.1.1. Propiedades muestra de suelo núm. 1

La muestra de suelo identificada como muestra núm. 1 se clasificó mediante el ensayo granulométrico por sedimentación y ensayo de límites de Atterberg según Normas ASTM D-422-02 y AASHTO T-89 y T-90. Los ensayos fueron realizados por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, obteniendo los siguientes datos:

- Clasificación del suelo

Porcentaje de grava: 0,00 %

Porcentaje de arena: 0,00 %

Porcentaje de fino: 100 %

Gravedad específica a 20° C: 2,41

Límite líquido: 94,9 %

Índice plástico: 40,8 %

Con los resultados obtenidos y datos en tabla III, el material se describe como limo arcilloso color beige y su clasificación es:

SCU.: MH

PRA.: A-7-5

Tabla III. **Porcentaje de material fino análisis por hidrómetro muestra núm. 1**

Abertura (mm)	Porcentaje de material que pasa abertura %
75,00	100,00
40,14	95,97
28,64	93,87
18,42	89,67
10,93	83,37
7,97	76,02
5,86	68,04
3,03	58,59
1,47	3,57
1,04	3,57

Fuente: informe de granulometría. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 80 SS.

- Densidad natural para la muestra núm. 1

Peso natural de material	$P_n = 215,8 \text{ gr}$
Peso de material con parafina	$P_p = 231,6 \text{ gr}$
Peso con parafina sumergido	$P_s = 135,3 \text{ gr}$
Peso de parafina	$P = 15,8 \text{ gr}$
Volumen de parafina (considerando densidad de parafina $0,88 \text{ gr/cm}^3$)	
$15,8 \text{ gr} / 0,88 \text{ gr/cm}^3 = 17,95 \text{ cm}^3$	
Volumen desplazado ($P_p - P_s$)	$V_d = 96,4 \text{ cm}^3$
Volumen suelo ($V_s = V_p - V_d$)	$V_s = 78.45 \text{ cm}^3$
Densidad de material $215.8 \text{ gr} / 78.45 \text{ cm}^3 = 1.595 \text{ gr/cm}^3$	

5.1.2. Propiedades muestra de suelo núm. 2

La muestra de suelo identificada como muestra núm. 2 se clasificó mediante el ensayo granulométrico por sedimentación y ensayo de límites de Atterberg según Normas ASTM D-422-02 y AASHTO T-89 y T-90. Los ensayos fueron realizados por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, obteniendo los siguientes datos:

Porcentaje de grava: 0,66 %

Porcentaje de arena: 2,95 %

Porcentaje de fino: 96,39 %

Gravedad específica a 20° C : 2,50

Límite líquido: 85,0 %

Índice plástico: 33,6 %

Con los resultados obtenidos y datos en tabla I, el material se describe como Limo arcilloso Color Beige y su clasificación es:

SCU.: MH

PRA.: A-7-5

Tabla IV **Porcentaje de material fino análisis por hidrómetro muestra**

Abertura (mm)	Porcentaje de material que pasa abertura %
75,00	96,39
40,14	94,75
28,64	93,23
18,42	88,18
10,93	81,01
7,97	77,81
5,86	73,17
3,03	65,25
1,47	27,31
1,04	20,23

Fuente: Informe de granulometría m-2. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 081 S.S.

- Densidad natural para la muestra núm. 2

Peso natural de material	$P_n = 116,9 \text{ gr}$
Peso de material con parafina	$P_p = 128,3 \text{ gr}$
Peso con parafina sumergido	$P_s = 51,3 \text{ gr}$
Peso de parafina	$P = 11,4 \text{ gr}$
(Densidad de parafina $0,88 \text{ gr/cm}^3$)	
Volumen de parafina	$V_p = 11,4 \text{ gr} / 0,88 \text{ gr/cm}^3 = 12,95 \text{ cm}^3$
Volumen desplazado ($V_d = P_p - P_s$)	$V_d = 57,5 \text{ cm}^3$
Volumen suelo ($V_s = V_p - V_d$)	$V_s = 70,4 \text{ cm}^3$
Densidad de material	$123,3 \text{ gr} / 70,4 \text{ cm}^3 = 1.661 \text{ gr/cm}^3$

5.2. Determinación de módulo elástico por ensayo triaxial

Para el ensayo Triaxial se trabajó el método no consolidado no drenado (UU) y consolidado no drenado (CU). Se elaboró cada ensayo según procedimiento de Centro de Investigaciones y lo descrito dentro del capítulo 4. Los datos a analizar consideran la deformación y el esfuerzo desviador bajo los esfuerzos de confinamiento de 5, 10 y 20 toneladas por metro cuadrado.

El módulo elástico se determinó por medio de la pendiente de la parte lineal de las gráfica esfuerzo – deformación (parte elástica), para cada presión de confinamiento.

5.2.1. Triaxial tipo UU

A las muestras de suelo, una vez obtenidas sus propiedades principales, se elabora un ensayo de compresión triaxial cuyos resultados se analizan para obtener el módulo elástico del suelo.

Muestra núm. 1

Tabla V. **Propiedades para ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 1**

Dimensión de Probeta $D_o \times L_o$	D_o :	6,35	cm	Humedad Promedio	52,90	%
		2,50	plg	Densidad	1,60	kg/m ³
	L_o :	12,70	cm	Densidad seca	1,04	kg/m ³
		5,00	plg	Ecuación Anillo de Carga	$F = 4,67 \times -1,88$	

Fuente: ensayo compresión triaxial. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 082 S.S.

- Factor de corrección por área K

$$K = 1 - E / A_o (1 - E_v) * 100$$

Donde:

E = lectura de deformación * 0,001" / 5" valor en porcentaje

E_v = deformación de corrección = 0

A_o = área inicial de la probeta = 31,67 cm² = 4,909 pulg²

El factor K se considera para cada aplicación de carga, debido a que durante el ensayo la sección perpendicular a la carga aplicada no permanece constante sino que ésta tiende a cambiar.

Tabla VI. **Datos ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 1**

Presión de confinamiento σ_3 Ton/m ²	Lectura deformación 0,001"	Lectura carga X	F	Factor área corregida	Lectura de deformación ϵ	Esfuerzo desviador σ Ton/m ²
			Kg	K	%	
5,00	25	1,0	2,79	0,314	0,5	0,88
5,00	50	1,5	5,12	0,313	1,0	1,60
5,00	75	2,0	7,46	0,311	1,5	2,32
5,00	100	2,0	7,46	0,310	2,0	2,31
10,00	125	3,0	12,13	0,308	2,5	3,70
10,00	150	3,0	12,13	0,306	3,0	3,70
10,00	175	3,0	12,13	0,305	3,5	3,70
20,00	200	4,0	17,31	0,303	4,0	5,23
20,00	225	5,0	21,47	0,302	4,5	6,48
20,00	250	5,0	21,47	0,300	5,0	6,44
20,00	275	5,0	21,47	0,299	5,5	6,42
20,00	300	5,0	21,47	0,297	6,0	6,38

Fuente: elaboración propia.

- **Esfuerzo desviador σ**

Se considera como el esfuerzo provocado por la carga axial F dentro de la sección de la probeta $A_{\text{corregida}}$. Y se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\sigma = F * K$$

Donde:

F = a la fuerza ejercida axialmente por medio del anillo de carga.

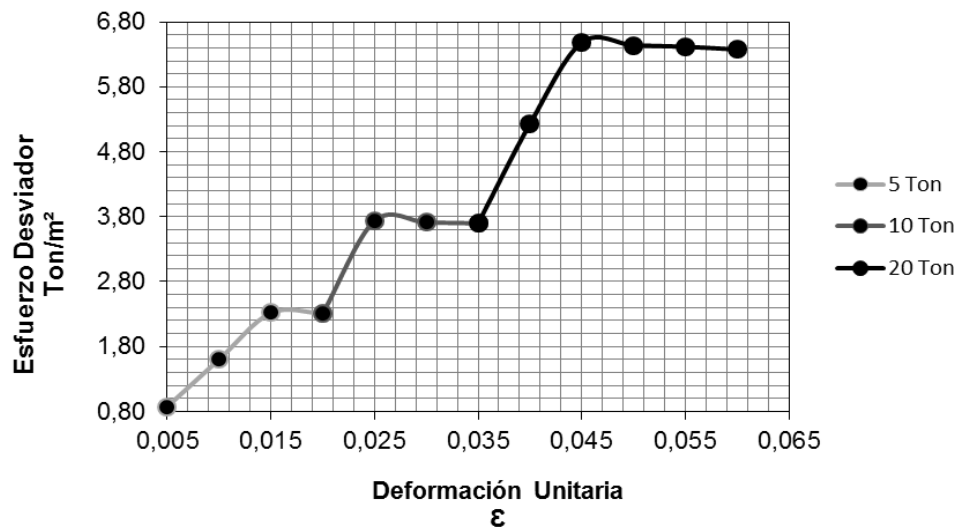
K = factor de corrección por área.

Tabla VII. **Datos esfuerzo y deformación ensayo triaxial tipo UU muestra 1**

Presión de confinamiento σ_3 Ton/m²	Deformación unitaria ϵ	Esfuerzo desviador σ_1 Ton/m²
5,00	0,005	0,88
5,00	0,010	1,60
5,00	0,015	2,32
10,00	0,020	2,31
10,00	0,025	3,70
10,00	0,030	3,70
10,00	0,035	3,70
20,00	0,040	5,23
20,00	0,045	6,48
20,00	0,050	6,44
20,00	0,055	6,42
20,00	0,060	6,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica esfuerzo – deformación triaxial UU muestra núm. 1**



Fuente: elaboración propia, programa Microsoft Excel 2010.

Muestra núm. 2

Tabla VIII. **Propiedades para ensayo triaxial UU muestra núm. 2**

Dimensión de Probeta $D_o \times L_o$	D_o :	6,35 cm	Humedad Promedio	46,63 %
		2,5 plg	Densidad	1,66 kg/m ³
	L_o :	12,7 cm	Densidad seca	1,17 kg/m ³
		5,0 plg	Ecuación Anillo de Carga	$F = 4,67 \times -1,88$

Fuente: ensayo compresión triaxial. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 083 S.S.

Tabla IX. **Datos ensayo triaxial tipo UU muestra núm. 2**

Presión de Confinamiento σ_3 Ton/m ²	Lectura Deform. 0,001"	Lectura Carga X	F	Factor área corregida	Lectura de deformación ϵ	Esfuerzo Desviador σ Ton/m ²
			Kg	K	%	
5,00	25	1,0	2,7895	0,314	0,5	0,88
5,00	50	1,0	2,7895	0,313	1,0	0,87
5,00	75	1,5	5,1243	0,311	1,5	1,59
5,00	100	1,5	5,1243	0,310	2,0	1,59
5,00	125	2,0	7,4591	0,308	2,5	2,30
5,00	150	2,0	7,4591	0,306	3,0	2,28
10,00	175	3,0	12,1287	0,305	3,5	3,70
10,00	200	3,0	12,1287	0,303	4,0	3,67
10,00	225	3,0	12,1287	0,302	4,5	3,66
20,00	250	4,5	19,1331	0,300	5,0	5,74
20,00	275	5,0	21,4679	0,299	5,5	6,42
20,00	300	5,0	21,4679	0,297	6,0	6,38
20,00	325	5,0	21,4679	0,295	6,5	6,33

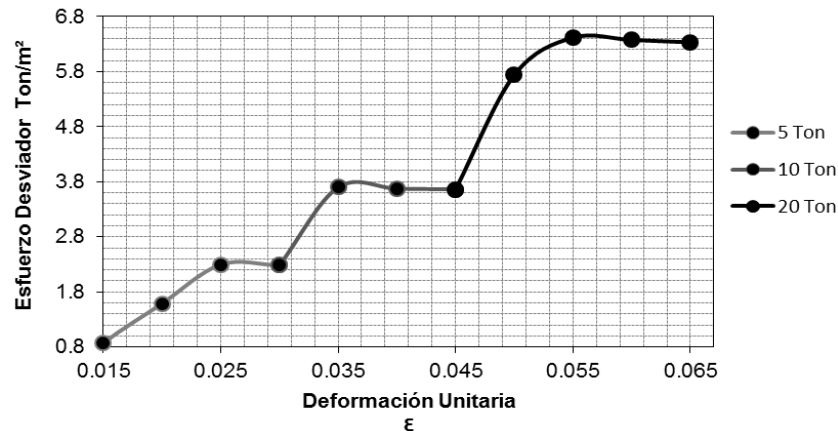
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Datos esfuerzo–deformación ensayo triaxial tipo UU muestra 2**

Presión de Confinamiento σ_3 Ton/m²	Deformación Unitaria ϵ	Esfuerzo Desviador σ_1 Ton/m²
5,00	0,015	0,873
5,00	0,020	1,589
5,00	0,025	2,298
5,00	0,030	2,283
10,00	0,035	3,699
10,00	0,040	3,675
10,00	0,045	3,663
20,00	0,050	5,740
20,00	0,055	6,419
20,00	0,060	6,376
20,00	0,065	6,333

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica esfuerzo–deformación triaxial UU muestra núm. 2**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

- Cálculo módulo elástico mediante la pendiente de la parte lineal de gráfica esfuerzo - deformación (E)

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

Donde:

σ = esfuerzo desviador, en ton/m^2

ϵ = deformación unitaria, en decimales

Considerando el subíndice 1 para el valor del esfuerzo mínimo y 2 como el valor del esfuerzo máximo en la porción lineal de la gráfica de esfuerzo deformación ver figura 25 y 26.

Tabla XI. **Resultado de cálculo de módulo elástico ensayo triaxial tipo UU**

Esfuerzo de Confinamiento Ton/m²	Módulo Elástico			
	Muestra No. 1		Muestra No. 2	
	Ton/m²	MPa	Ton/m²	MPa
5	144,38	1,416	142,43	1,397
10	284,66	2,792	283,35	2,779
20	306,42	3,005	415,41	4,074

*Nota: Factor de conversión de ton/m² a Mpa es de 0.00981.

Fuente: elaboración propia.

Para ambos materiales se considera como apto utilizar el valor de módulo elástico obtenido a una presión de confinamiento de 20 tonelada por metro cuadrada, ya que el suelo se encuentra sometido a mayor esfuerzo y se considera como apto para el análisis elástico del suelo.

5.2.2. Triaxial tipo CU

Se considera realizar una curva de esfuerzo – deformación con los resultados dados en este ensayo, considerando que los esfuerzos a los que se somete el suelo y se obtiene el valor de módulo elástico en su parte lineal.

Muestra núm. 1

Tabla XII. **Propiedades para ensayo triaxial tipo CU muestra núm. 1**

Dimensión de Probeta $D_o \times L_o$	D_o :	7,11	cm	Humedad Promedio	50,32	%
		2,80	plg	Densidad	1,66	kg/m ³
	L_o :	14,20	cm	Densidad seca	1,11	kg/m ³
		5,60	plg	Ecuación Anillo de Carga	$F = 0,8638 \times - 0,1186$	

Fuente: ensayo compresión triaxial consolidado no drenado. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 100 S.S.

- Corrección de área $A_{\text{corregida}}$

$$A_{\text{corregida}} = A_o / (1 - \epsilon)$$

Donde:

$$A_o = \text{área inicial de la probeta} = 6,16 \text{ plg}^2 = 39,73 \text{ cm}^2$$

$$\epsilon = \text{deformación unitaria} = (\text{lectura de deformación} * 0,001") / L_o$$

- Esfuerzo desviador σ

$$\sigma \text{ (Ton/m}^2\text{)} = F / A_{\text{corr}}$$

Donde:

F = fuerza aplicada sobre la probeta, obtenida mediante la lectura de carga y la ecuación del anillo

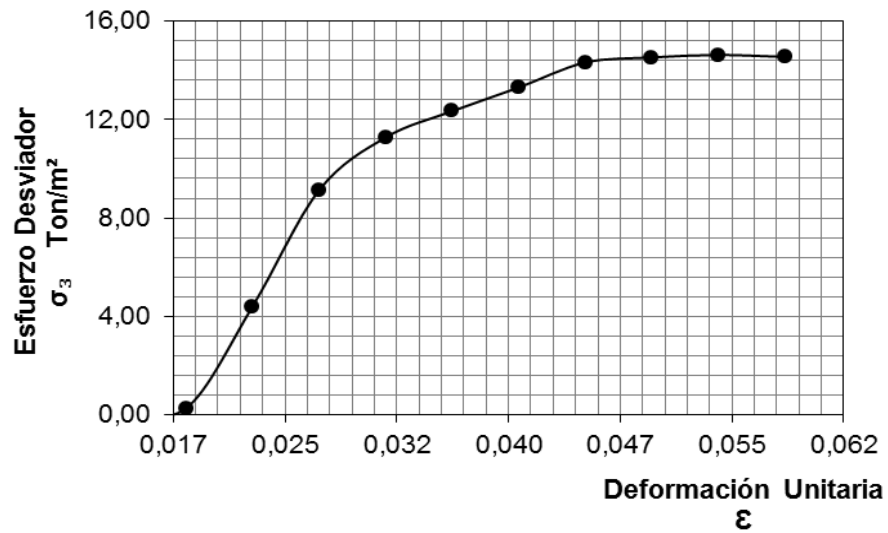
$$A_{\text{corr}} = \text{área corregida obtenida mediante (cm}^2\text{)}$$

Tabla XIII. **Datos ensayo triaxial consolidado no drenado CU muestra núm. 1**

Presión de Confinamiento		05 Ton/m ²		10 Ton/m ²		20 Ton/m ²	
Lectura de Deformación (0.001 plg.)	Área Corregida A _{CORREGIDA} (cm ²)	Lectura Carga X	Fuerza (kg)	Lectura Carga X	Fuerza (kg)	Lectura Carga X	Fuerza (kg)
0	39,726	0	0,00	0	0,00	0	0,00
5	39,761	4	1,50	3	1,11	2	0,73
10	39,797	4	1,50	3	1,11	2	0,73
15	39,833	4	1,50	3	1,11	2	0,73
20	39,868	4	1,50	3	1,11	2	0,73
25	39,904	4	1,50	3	1,11	2	0,73
50	40,084	4	1,50	2	0,91	1	0,32
75	40,265	3	1,09	2	0,70	1	0,32
100	40,448	3	1,09	2	0,71	1	0,32
125	40,633	46	17,91	48	18,63	1	0,32
150	40,819	95	37,27	97	37,77	1	0,32
175	41,007	118	46,23	142	55,28	1	0,32
200	41,197	130	50,84	156	61,08	50	19,62
225	41,389	141	55,05	171	66,75	99	38,80
250	41,582	152	59,55	178	69,85	133	52,04
275	41,777	155	60,68	186	72,74	149	58,16
300	41,975	157	61,40	193	75,42	167	65,32
325	42,173	157	61,34	194	75,75	177	69,21
350	42,374	--	--	207	81,03	189	73,88
375	42,577	--	--	213	83,55	201	78,54
400	42,782	--	--	--	--	214	83,62
425	42,988	--	--	--	--	230	90,21
450	43,197	--	--	--	--	237	92,93
475	43,408	--	--	--	--	244	95,65
500	43,621	--	--	--	--	248	97,19
525	43,835	--	--	--	--	254	99,41
550	44,052	--	--	--	--	251	99,50
575	44,272	--	--	--	--	252	99,55
600	44,493	--	--	--	--	253	99,59

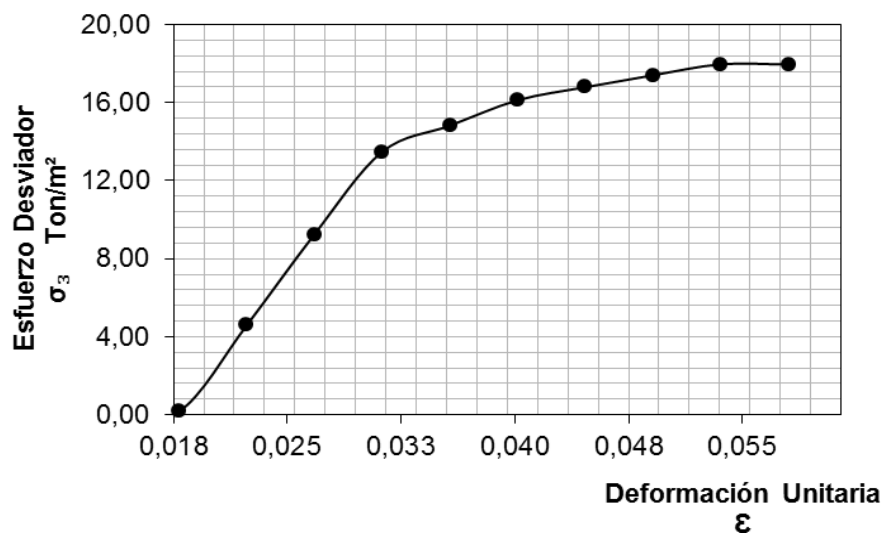
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 1 (5 Ton/m²)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Office 2013.

Figura 28. **Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 1 (10 Ton/m²)**



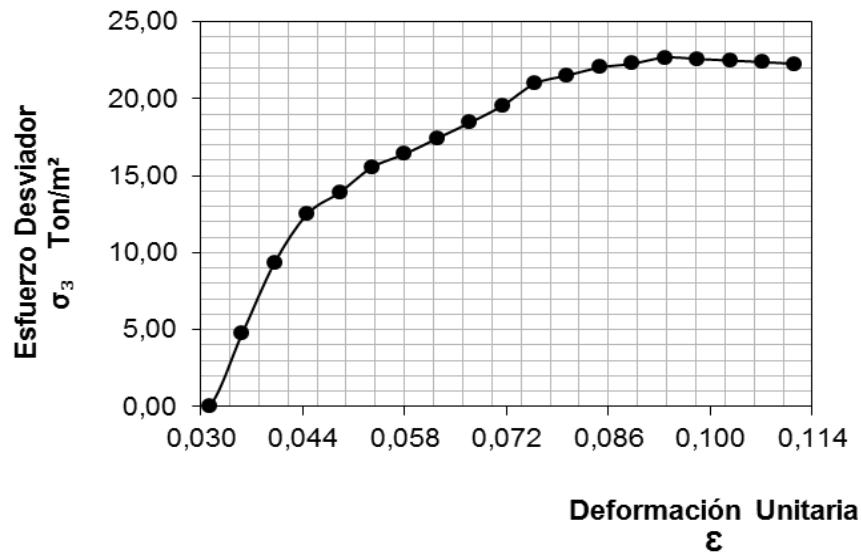
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Office 2013.

Tabla XIV. **Datos esfuerzo y deformación durante fase de carga triaxial tipo CU muestra núm. 1**

Deformación Unitaria ϵ	Presión de Confinamiento		
	5 Ton/m ²	10 Ton/m ²	20 Ton/m ²
	Esfuerzo Desviador Ton/m ²		
0,000	0,000	0,000	0,000
0,001	0,376	0,279	0,182
0,002	0,376	0,279	0,182
0,003	0,376	0,279	0,182
0,004	0,375	0,279	0,182
0,004	0,375	0,278	0,182
0,009	0,373	0,226	0,079
0,013	0,270	0,175	0,079
0,018	0,269	0,175	0,078
0,022	4,409	4,586	0,078
0,027	9,130	9,252	0,078
0,031	11,274	13,481	0,077
0,036	12,342	14,827	4,763
0,040	13,300	16,127	9,375
0,045	14,321	16,797	12,515
0,049	14,524	17,411	13,920
0,054	14,627	17,969	15,561
0,058	14,546	17,962	16,411
0,063	-	19,123	17,434
0,067	-	19,623	18,447
0,071	-	-	19,545
0,076	-	-	20,984
0,080	-	-	21,513
0,085	-	-	22,035
0,089	-	-	22,281
0,094	-	-	22,679

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 1 (20 Ton/m²)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Office 2013.

Muestra núm. 2

Tabla XV. **Propiedades para ensayo triaxial CU muestra núm. 2**

Dimensión de Probeta $D_o \times L_o$	D_o :	7,11	cm	Humedad Promedio	47,31	%
		2,80	plg	Densidad	1,60	kg/m ³
	L_o :	14,2	cm	Densidad seca	1,10	kg/m ³
		5,60	plg	Ecuación Anillo de Carga	$F = 0,8638 \times - 0,1186$	

Fuente: ensayo compresión triaxial consolidado no drenado. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014.
Informe de laboratorio No. 104 S.S.

Tabla XVI. **Datos triaxial ensayo consolidado no drenado CU muestra núm. 2**

Presión de Confinamiento		05 Ton/m ²		10 Ton/m ²		20 Ton/m ²	
Lectura de deformación (0.001 plg.)	Área corregida A _{CORREGIDA} (cm ²)	Lectura carga X	Fuerza (kg)	Lectura carga X	Fuerza (kg)	Lectura carga X	Fuerza (kg)
0	39,726	0	0,00	0	0,00	0	0,00
5	39,761	8	2,90	8	3,21	8	3,09
10	39,797	19	7,20	20	7,93	21	8,24
15	39,833	28	10,90	33	12,72	31	12,00
20	39,868	40	15,77	52	20,51	64	25,05
25	39,904	59	22,94	90	35,23	121	47,17
50	40,084	159	62,27	171	66,95	271	106,26
75	40,265	214	83,71	220	86,30	320	125,26
100	40,448	242	94,69	261	102,04	341	133,65
125	40,633	261	102,15	286	111,89	342	134,06
150	40,819	270	105,71	298	116,81	343	134,42
175	41,007	272	106,51	304	119,22	345	135,19
200	41,197	275	107,72	313	122,37	346	135,60
225	41,389	277	108,51	317	123,95	347	135,96
250	41,582	--	--	--	--	348	136,37
275	41,777	--	--	--	--	348	136,37
300	41,975	--	--	--	--	349	136,73

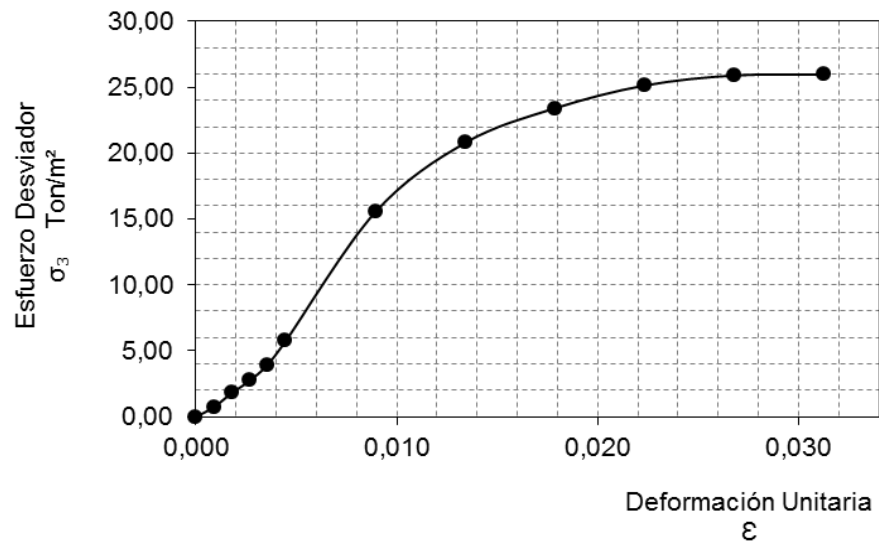
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Datos esfuerzo–deformación fase carga ensayo triaxial CU muestra núm. 2**

Deformación Unitaria ϵ	Presión de Confinamiento		
	5 Ton	10 Ton	20 Ton
	Esfuerzo Desviador Ton/m ²		
0,000	0,000	0,000	0,000
0,001	0,728	0,806	0,778
0,002	1,809	1,993	2,070
0,003	2,737	3,193	3,013
0,004	3,956	5,144	6,283
0,004	5,748	8,829	11,874
0,009	15,536	16,702	26,500
0,013	20,789	21,433	31,108
0,018	23,410	25,228	33,042
0,022	25,140	27,538	32,993
0,027	25,898	28,615	32,931
0,031	25,973	29,072	32,968
0,036	26,147	29,704	--
0,040	26,218	29,948	--

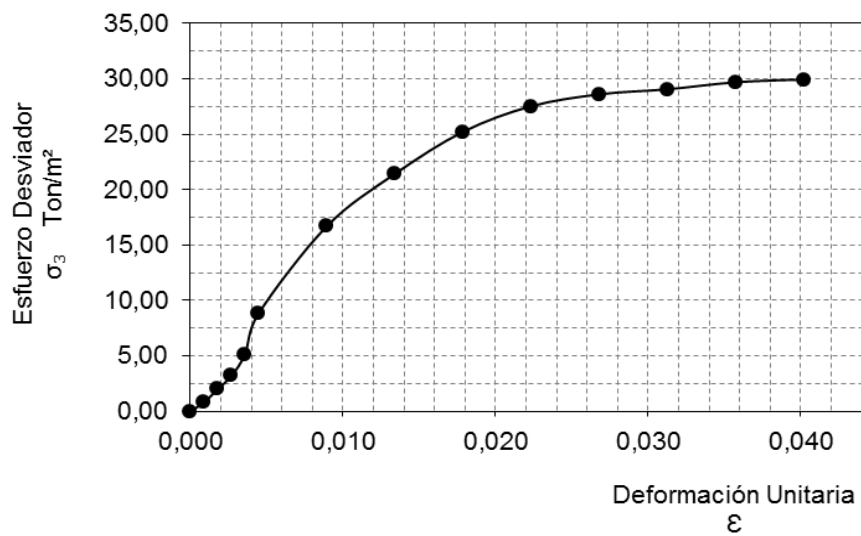
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 2 (5 Ton/m²)**



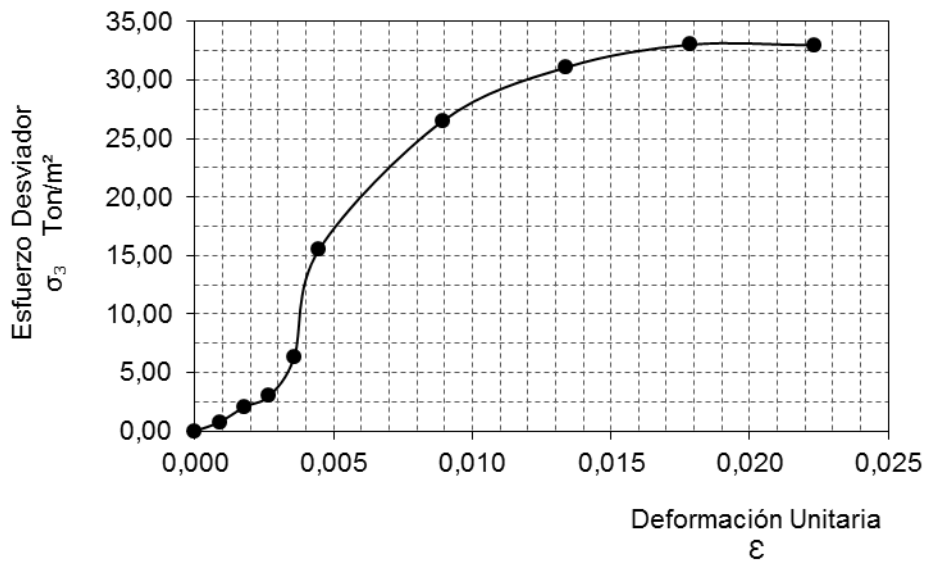
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Office 2013.

Figura 31. **Gráfica esfuerzo–deformación tipo CU muestra núm. 2 (10 Ton/m²)**



Fuente: elaboración propia, Microsoft Office 2013.

Figura 32. **Gráfica esfuerzo – deformación tipo CU muestra núm. 2 (20 Ton/m²)**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

Tabla XVIII. **Módulo elástico ensayo triaxial tipo CU**

Esfuerzo de Confinamiento Ton/m ²	Módulo Elástico			
	Muestra No. 1		Muestra No. 2	
	Ton/m ²	MPa	Ton/m ²	MPa
5	992,39	9,732	1040,72	10,206
10	998,73	9,794	1116,33	10,947
20	1041,30	10,212	1157,17	11,348

*Nota: Factor de conversión de ton/m² a Mpa es de 0.00981.

Fuente: elaboración propia.

5.3. Determinación de módulo elástico por ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo se elaboró según procedimiento indicado por el Centro de Investigaciones y lo descrito en el capítulo 4. Analizando cuatro grupos de datos con una carga normal de 1, 2, 4 y 8 kilogramos; considerando como información de ensayo los datos de esfuerzo-deformación promedio de los esfuerzos normales utilizados.

Muestra núm. 1

Tabla XIX. **Propiedades para ensayo de corte directo muestra núm. 1**

Dimensión de Probeta $A = D_o^2 \times (\pi/4)$	D _o :	6,35	cm	Humedad Promedio	34,76	%
		2,50	plg	Densidad Húmeda	1,64	Ton/m ³
	A _o :	31,67	cm ²	Densidad seca	1,22	Ton/m ³
		4,91	plg ²	Ecuación Anillo de Carga	$F = 0,3853 \times +0,5482$	

Fuente: ensayo Corte Directo. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 074 S.S.

- Deformación unitaria ε

$$\varepsilon = \text{deformación unitaria} = (\text{lectura dial} * 0,001'') / D_o$$

- Esfuerzo cortante T

$$T \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = F / A$$

Tabla XX. **Datos ensayo de corte directo muestra núm. 1**

	ESFUERZO NORMAL							
	0,32 kg/cm ²		0,63 kg/cm ²		1,26 kg/cm ²		2,53 kg/cm ²	
Deformación plg	Fuerza Kg	Esfuerzo Cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo Cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo Cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo Cortante kg/cm ²
0,000	4,401	0,139	0,548	0,017	0,548	0,017	0,548	0,017
0,005	7,484	0,236	2,860	0,090	2,475	0,078	15,199	0,480
0,010	10,566	0,334	4,787	0,151	8,640	0,273	18,272	0,577
0,015	14,034	0,443	5,172	0,163	10,951	0,346	22,896	0,723
0,020	15,575	0,492	6,713	0,212	14,034	0,443	26,363	0,832
0,025	16,345	0,516	6,713	0,212	15,190	0,480	28,299	0,893
0,030	17,116	0,540	7,098	0,224	17,501	0,553	29,446	0,930
0,035	17,887	0,565	7,484	0,236	19,428	0,613	30,987	0,978
0,040	19,043	0,601	10,566	0,334	20,584	0,650	33,297	1,051
0,045	19,043	0,601	16,346	0,516	21,354	0,674	34,455	1,088
0,050	20,199	0,638	17,116	0,540	21,740	0,686	35,611	1,124
0,055	20,584	0,650	19,043	0,601	23,282	0,735	35,611	1,124
0,060	20,969	0,662	20,199	0,638	--	--	35,611	1,124
0,065	20,969	0,662	20,584	0,650	--	--	35,611	1,124
0,070	21,354	0,674	20,584	0,650	--	--	--	--
0,075	21,740	0,686	--	--	--	--	--	--
0,080	22,125	0,699	--	--	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos esfuerzo–deformación corte directo muestra núm. 1**

Deformación Unitaria ϵ	Esfuerzo Cortante Promedio kg/cm^2
0,000	0,048
0,002	0,221
0,004	0,334
0,006	0,380
0,008	0,495
0,010	0,525
0,012	0,562
0,014	0,598
0,016	0,659
0,018	0,720
0,020	0,747
0,022	0,778

Fuente: elaboración propia.

Muestra núm. 2

Tabla XXII. **Propiedades para ensayo de corte directo muestra núm. 2**

Dimensión de Probeta $A = D_o^2 \times (\pi/4)$	D_o :	6,35	cm	Humedad Promedio	42,79	%
		2,50	plg	Densidad Húmeda	1,72	Ton/m^3
	A_o :	31,67	cm^2	Densidad seca	1,23	Ton/m^3
		4,91	plg^2	Ecuación Anillo de Carga	$F = 0,3853 \times +0,5482$	

Fuente: Ensayo corte directo. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 075 S.S.

Tabla XXIII. **Datos ensayo corte directo muestra núm. 2**

	ESFUERZO NORMAL							
	0,32 kg/cm ²		0,63 kg/cm ²		1,26 kg/cm ²		2,53 kg/cm ²	
Deformación plg	Fuerza Kg	Esfuerzo cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo cortante kg/cm ²	Fuerza Kg	Esfuerzo cortante kg/cm ²
0,000	0,548	0,017	1,319	0,042	0,548	0,017	0,548	0,017
0,005	4,016	0,127	8,640	0,273	9,410	0,297	20,969	0,662
0,010	4,016	0,127	15,960	0,504	12,878	0,407	25,593	0,808
0,015	7,484	0,236	23,281	0,735	18,272	0,577	31,372	0,991
0,020	10,566	0,334	27,519	0,869	23,281	0,735	38,308	1,210
0,025	13,648	0,431	30,602	0,966	27,134	0,857	42,931	1,356
0,030	17,501	0,553	32,528	1,027	30,602	0,966	42,931	1,356
0,035	20,584	0,650	34,840	1,100	33,684	1,064	44,472	1,404
0,040	22,896	0,723	37,152	1,173	35,996	1,137	46,014	1,453
0,045	25,978	0,820	38,308	1,210	37,922	1,197	46,399	1,465
0,050	27,905	0,881	38,693	1,222	39,078	1,234	46,399	1,465
0,055	30,987	0,978	38,693	1,222	39,849	1,258	--	--
0,060	32,143	1,015	--	--	--	--	--	--
0,065	32,528	1,027	--	--	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos esfuerzo–deformación corte directo muestra núm. 2**

Deformación Unitaria ϵ	Esfuerzo Cortante Promedio kg/cm^2
0,000	0,023
0,002	0,340
0,004	0,461
0,006	0,635
0,008	0,787
0,010	0,902
0,012	0,975
0,014	1,054
0,016	1,121
0,018	1,173
0,020	1,200
0,022	1,153

Fuente: elaboración propia.

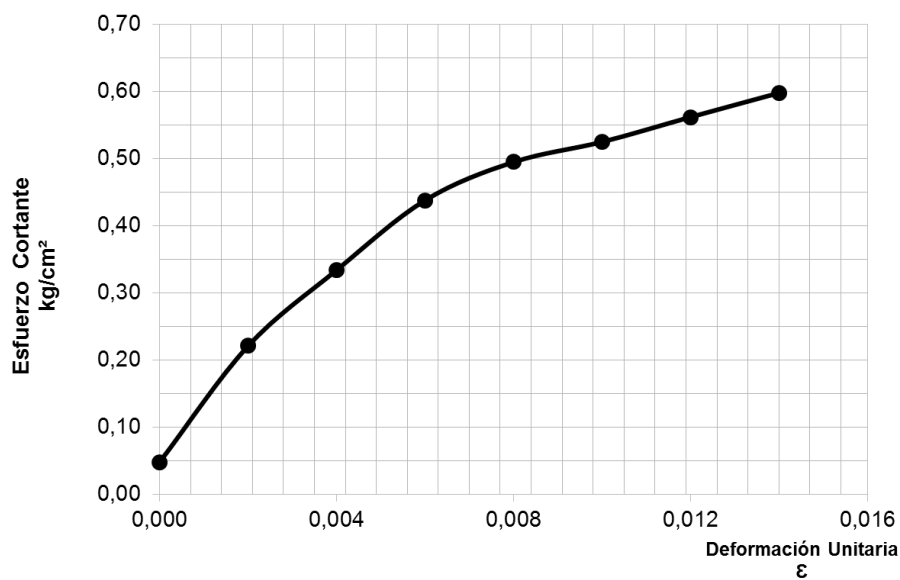
Tabla XXV. **Módulo elástico promedio ensayo de corte directo**

Muestra	Módulo Elástico	
	Ton/m²	MPa
1	86,686	8,501
2	101,891	9,992

*Nota: Factor de conversión de kg/cm^2 a Mpa es de 0.09807.

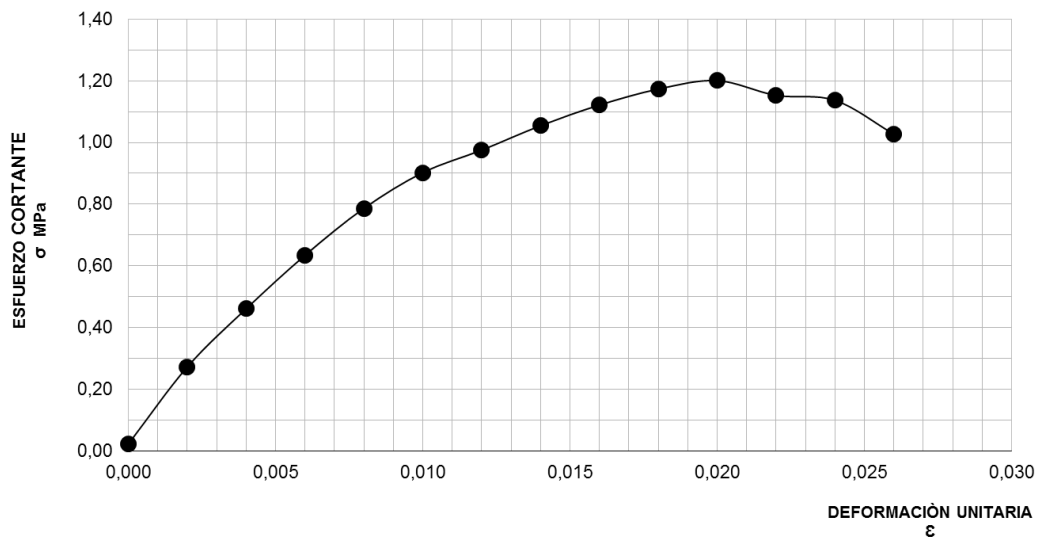
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica esfuerzo-deformación corte directo muestra núm.1**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

Figura 34. **Gráfica esfuerzo-deformación corte directo muestra núm. 2**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

5.4. Determinación de módulo elástico por ensayo de consolidación

El ensayo de consolidación no drenado se elaboró según procedimiento de Centro de Investigaciones e información descrita en el capítulo 4. Considerando para el análisis de esfuerzo-deformación la fase de carga en su comportamiento lineal.

Tabla XXVI. **Propiedades de muestra núm. 1 ensayo de consolidación**

Dimensión de Probeta $A = D_o^2 \times (\pi/4)$	Diámetro D_o :	6,35	cm	Densidad Húmeda	1,53	Ton/m ³
		2,50	plg			
	Área A_o :	31,67	cm ²	Densidad seca	1,07	Ton/m ³
		4,91	plg ²			
	Altura L_o :	2,54	cm	Humedad	42,71	%
		1,00	plg			

Fuente: consolidación Unidimensional de los suelos. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe de laboratorio No. 085 S.S.

Durante el ensayo la muestra de suelo es sometida a una carga constante durante un período de tiempo de 24 horas, para luego aumentar la carga. Para el análisis se considera el esfuerzo efectivo vertical al que se somete la probeta y la deformación registrada en la lectura 24 horas, para cada incremento de carga realizado para la fase de carga y descarga.

Tabla XXVII. **Datos ensayo de consolidación muestra núm. 1**

FASE DE ENSAYO	PRESIÓN kg/cm ²	LECTURA DE DEFORMACIÓN L _o	
		mm	cm
CARGA	0,100	0,05	0,005
	0,302	0,23	0,023
	0,703	0,51	0,051
	1,505	0,91	0,091
	3,108	1,55	0,155
	6,316	2,58	0,258
DESCARGA	3,108	2,78	0,278
	1,505	2,65	0,265
	0,703	2,48	0,248
	0,302	2,27	0,227
	0,100	2,05	0,205

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis elástico de la muestra de suelo se procede a calcular la deformación unitaria ε a manera de construir la gráfica de esfuerzo - deformación y determinar la parte lineal de la gráfica a manera de obtener su pendiente y definir el módulo elástico.

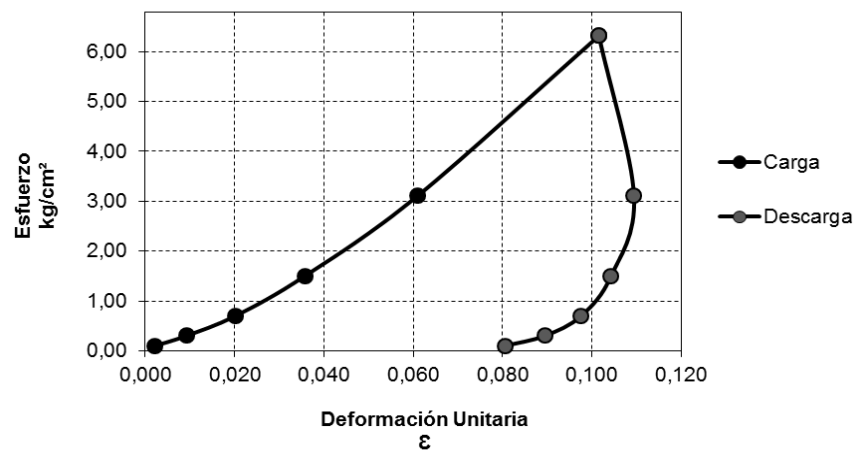
$$\varepsilon = \text{deformación unitaria} = (\text{Lectura de deformación} * 0,1) / L_o$$

Tabla XXVIII **Datos esfuerzo–deformación ensayo consolidación muestra núm. 1**

Deformación Unitaria ϵ	Esfuerzo Cortante Promedio kg/cm^2
0,002	0,100
0,009	0,302
0,020	0,703
0,036	1,505
0,061	3,108
0,102	6,316
0,109	3,108
0,104	1,505
0,098	0,703
0,089	0,302
0,081	0,100

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfica esfuerzo–deformación consolidación muestra núm. 1**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

Tabla XXIX. **Propiedades de muestra núm. 2 Ensayo de consolidación**

Dimensión de Probeta $A = D_o^2 \times (\pi/4)$	Diámetro D_o :	6,35	cm	Densidad Húmeda	1,58	Ton/m ³
		2,50	plg			
	Área A_o :	31,67	cm ²	Densidad seca	1,00	Ton/m ³
		4,91	plg ²			
	Altura L_o :	2,54	cm	Humedad	58,60	%
		1,00	plg			

Fuente: Consolidación unidimensional de los suelos. [Guatemala] Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad San Carlos de Guatemala, 2014. Informe laboratorio No. 93 S.S.

Tabla XXX. **Datos ensayo de consolidación muestra núm. 2**

FASE DE ENSAYO	PRESIÓN kg/cm ²	LECTURA DE DEFORMACIÓN L_o	
		mm	cm
CARGA	0,000	0,06	0,006
	0,100	0,44	0,044
	0,300	1,01	0,101
	0,700	1,69	0,169
	1,500	2,49	0,249
	3,110	2,66	0,266
DESCARGA	1,500	2,61	0,261
	0,700	2,52	0,252
	0,300	2,44	0,244
	0,100	2,43	0,243

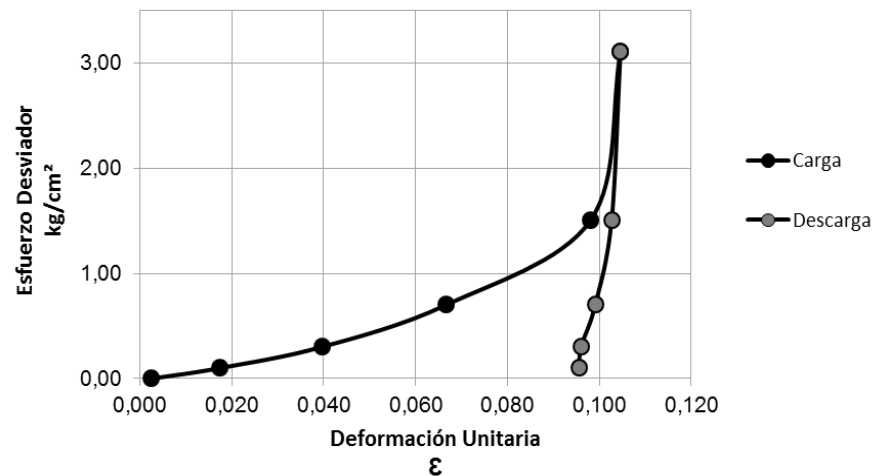
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Datos esfuerzo–deformación consolidación núm. 2**

Deformación Unitaria ϵ	Presión kg/cm^2
0,003	0,000
0,017	0,100
0,040	0,300
0,067	0,700
0,098	1,500
0,105	3,110
0,103	1,500
0,099	0,700
0,096	0,300
0,096	0,100

Fuente: Elaboración propia a base de análisis de resultados.

Figura 36. **Gráfica esfuerzo–deformación consolidación muestra núm. 2**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2010.

A partir del registro de carga y deformación durante la fase de carga y descarga se construye la gráfica de la figura 35 y 36. Para la determinación del módulo elástico en el ensayo de consolidación se procede a realizar el cálculo de la pendiente de la parte lineal en la etapa de carga, utilizando como valor mayor el 50 por ciento de la carga total registrada y así como su deformación unitaria registrada.

Tabla XXXII. **Módulo elástico ensayo de consolidación**

Muestra	Módulo Elástico	
	Kg/m ²	MPa
1	33,569	3,292
2	15,744	1,544

*Nota: Factor de conversión de kg/cm² a Mpa es de 0.09807.

Fuente: elaboración propia.

5.5. Ejemplo cálculo de asentamiento elástico en suelos cohesivos

Para realizar el cálculo de asentamiento elástico se considera la ecuación de Jambu, dada en el capítulo 3. Para el análisis se plantea una estratigrafía promedio, siendo el estrato núm. 3 el material bajo la cota de cimentación.

Las propiedades consideradas son:

Tabla XXXIII. **Propiedades de estratigrafía para cálculo de asentamiento**

ESTRATO	PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN DE SUELO	CLASIFICACIÓN		DENSIDAD
	metros			S.C.U.	P.R.A.	Kg/m³
	Inicio	Fin				
1	0	0,5	Arcilla ligera arenosa color café oscuro	CL	A-6	1206,92
2	0,5	3	Arcilla densa arenosa color café claro	CH	A-7-6	1431,67
3	3	4	Limo elástico color beige	MH	A-7-5	1741,77

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis se considera una base para la cimentación 6,00 metros. Para una cota de cimentación $D_f = 2,00$ metros. La distancia H entre la cota de cimentación y el estrato es igual a 1,00 metro.

Tabla XXXIV. **Cálculo de asentamiento inmediato suelo cohesivo**

Df/B	L/B	H/B	MÓDULO ELÁSTICO E		ESFUERZO EFECTIVO		CAPACIDAD SOPORTE		CARGA TOTAL Q_o	FACTORES	
			Mpa	Ton/m²	Kg/m²	Ton/m²	Kg/cm²	Ton/m²		A1	A2
0,33	1,00	0,17	10,21	1041,3	3466,8	3,47	1,80	18,00	21,47	0,20	0,94
ASENTAMIENTO INMEDIATO			metros	0,02							
			mm	23,2							

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El valor de módulo elástico indica la rigidez del material, en este caso el suelo, mientras más grande sea este valor mayor es su capacidad de recuperarse completamente al ser sometido a un esfuerzo.
2. Al analizar en los suelos cohesivos su comportamiento elástico, se considera el suelo como un material continuo, homogéneo e isotrópico con una relación de esfuerzo-deformación lineal aplicando la ley de Hooke.
3. El asentamiento inmediato en fundaciones estructurales va ligado al valor de módulo elástico del suelo presente en la cota de cimentación, siendo este asentamiento provocado inmediatamente después de aplicar una carga.
4. Para determinar el valor de modulo elástico de un suelo cohesivo por medio de un ensayo de laboratorio se debe obtener el registro de carga y deformación dada sobre la dirección de interés, que para cimentaciones es vertical.
5. En el análisis de cimentaciones el módulo elástico se calculará sobre el eje vertical siendo los ensayos de compresión triaxial y consolidación los que cumplen con un registro de esfuerzo y deformación sobre el eje de interés.

6. Para obtener el valor del módulo elástico en un suelo cohesivo, mediante la gráfica de esfuerzo *versus* deformación, se obtiene el cálculo de la pendiente en la porción lineal (o proporcional), siendo la proporción menor o igual al 50 por ciento del esfuerzo último registrado durante el ensayo.
7. En el cálculo de módulo elástico con el ensayo triaxial no consolidado no drenado para la muestra núm. 1 se obtuvo un valor de 3,00 megapascascales y para la muestra núm. 2 de 4,07 megapascascales, notando que para el ensayo consolidado no drenado se presenta un incremento del valor de módulo elástico de valores entre 10,21 y 11,34 megapascascales respectivamente considerando este incremento a la reducción de vacíos en la muestra.
8. En el ensayo de compresión triaxial, no consolidado no drenado y consolidado no drenado, con los resultados obtenidos se pudo observar que los valores de módulo elástico se encuentran entre los rangos teóricos de módulo elástico según el tipo de material y que el valor aumenta a medida que se incrementa el esfuerzo de confinamiento.
9. Al determinar el módulo elástico en suelos cohesivos mediante el ensayo de corte directo se considera un análisis de esfuerzo promedio y la deformación para cada esfuerzo normal, sin embargo los valores de módulo elástico obtenidos son aproximadamente menores al 50 por ciento de los obtenidos con el ensayo triaxial y no son adecuados para el cálculo de asentamiento inmediato por ser en dirección horizontal.

10. Los valores de módulo elástico calculados con el ensayo de corte directo para la muestra núm. 1 es de 8,50 megapascasles y para la muestra núm. 2 de 9,99 megapascasles, notando que la diferencia entre los valores obtenidos por el ensayo triaxial tipo CU son de 1,50 megapascasles aproximadamente atribuyendo este comportamiento a la dirección de cada ensayo sin embargo los resultados se encuentran dentro del rango teórico de un suelo blando.
11. Al calcular el módulo elástico mediante la gráfica de esfuerzo-deformación en el ensayo de consolidación los valores para la muestra núm. 1 son de 3,29 megapascasles y para la muestra núm. 2 de 1,54 notando que existe una diferencia entre 1 a 3 megapascasles con el ensayo triaxial tipo UU (valor más bajo obtenido) y los valores no mantienen la tendencia de resultados como lo visto en el ensayo triaxial y de corte directo atribuyendo estos resultados al tiempo de registro de carga durante el ensayo.
12. El ensayo de consolidación presenta un análisis vertical del esfuerzo y deformación de los suelos cohesivos, sin embargo este tipo de ensayo no se considera adecuado para obtener el valor de módulo elástico ya que se somete a un mismo esfuerzo durante un rango de tiempo largo por lo que no se registra la recuperación real del suelo sino más un proceso de consolidación de las partículas que lo forman.
13. En los suelos cohesivos los valores de módulo elástico varían según su compacidad relativa es decir que tan blandos o duros estén, siendo los suelos duros los que poseen un módulo elástico no mayor de 90 megapascasles.

RECOMENDACIONES

1. En las estructuras de ingeniería civiles muy importante realizar un chequeo de asentamiento del suelo a manera de determinar si este cumple las necesidades estructurales sin provocar daños a la estructura al momento de ser construidas.
2. Para conocer el módulo elástico de suelos cohesivos mediante pruebas de laboratorio en un valor puntual dentro del material, en condiciones controladas, debe realizarse considerando el comportamiento del suelo en su esfuerzo-deformación.
3. Con los resultados analizados durante las pruebas realizadas en este estudio se sugiere obtener el valor de módulo elástico mediante la prueba de triaxial consolidado no drenado, a la mayor presión de confinamiento ya que al realizar el cálculo del módulo elástico se obtuvo un valor alto más cercano a los valores estándar de cada tipo de suelo.
4. Debido a que el módulo elástico de los suelos cohesivos puede ser alterado fácilmente por agentes externos, es necesario que no sea manipulado al momento de realizar una extracción de muestra inalterada así como conocer sus propiedades tales como la humedad, granulometría, límites de Atterberg, su clasificación y estratigrafía bajo el suelo en análisis.

5. Para determinar el módulo elástico en los suelos cohesivos se sugiere que se construya la gráfica de esfuerzo-deformación del ensayo realizado y a partir del análisis de la información delimitar la zona en donde el suelo se comporta linealmente considerando que será hasta el 50 por ciento del esfuerzo total al que es sometida la muestra.
6. Los valores de módulo elástico son útiles no solo para determinar otros valores utilizados durante el diseño estructural tales como el módulo de balasto del suelo y el diseño de cimentaciones con pilotes o cimientos de gran tamaño.
7. Para el cálculo de asentamiento inmediato de suelos cohesivos se recomienda determinar el valor de módulo elástico de la estratigrafía completa del sitio, es decir cada uno de los suelos presentes bajo la cota de cimentación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANEJO, A. *Manual de mecánica de suelo y cimentaciones* [en línea]. [ref. de 25 de mayo del 2014]. Disponible en Web: <http://www.uned.es/dptoicf/mecanica_del_suelo_y_cimentaciones/images/mecansueloycimentaciones_anejoA.pdf>
2. BERRY, Peter L. *Mecánica de suelos*. Colombia: McGraw-Hill, 1993. 415 p.
3. BOWLES, Joseph. *Foundation Analysis and Design*. 5a ed. Singapore: McGraw-Hill, 1997. 1207 p.
4. _____ BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de Mecánica de Suelos*. 2a ed. Colombia: McGraw-Hill, 1980. 275 p.
5. BRAJA, M. Das. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5a ed. México: Cengage Learning, 2006. 766 p.
6. Constructor Civil. *Tablas para valores típicos de gravedad específica* [en línea]: Sección *Mecánica de Suelos*. <<http://www.constructorcivil.org/2010/01/tablas-para-valores-tipicos-de-gravedad.html>> [Consulta: 10 de junio de 2012].

7. COLLARTE, Luis. POBLETE FREIRE, Mauro Esteban. *Esquema del equipo triaxial* [en línea]: síntesis tecnológica. No. 1 24-35 [ref. de Septiembre de 2004]. Disponible en Web: <http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2004000100005&script=sci_arttext>
8. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 4a ed. México: Limusa, 1996. 639 p.
9. DUQUE-ESCOBAR, Gonzalo. ESCOBAR POTES, Carlos Enrique. *Mecánica de suelos*. 2a ed. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2002. 162 p.
10. *Estados de equilibrio estático de un suelo elástico y plástico* [en línea]. [ref. de 05 de Julio de 2013]. Disponible en Web: <<http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/AR07304M.pdf>>
11. HARRIS, José. *Clasificación de los suelos* [en línea] *en biblioteca*. Disponible en Web: <<http://dc367.4shared.com/doc/yVTfWcdl/preview.html>> [Consulta: 2 Junio de 2012].
12. JUÁREZ BADILLO, Eulalio. RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos. Fundamentos de la ingeniería de suelos*. 3a ed. México: Limusa, 2009. 644 p.
13. LAMBE, T. William. WHITMAN, Robert. *Mecánica de Suelos*. 2a ed. México: Limusa, 1991. 582 p.
14. LIU, Cheng. EVETT, Jack. *Soil properties Testing, Measurement and Evaluation*. 4a ed. Columbus, Ohio: Prentice Hall, 2000. 403 p.

ANEXOS
Resultado de ensayos



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



Informe No.: 074 S.S.

O.T.: 31,775

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: CORTE DIRECTO

Norma: ASTM D 3080-04

Fecha: martes, 25 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige

Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado

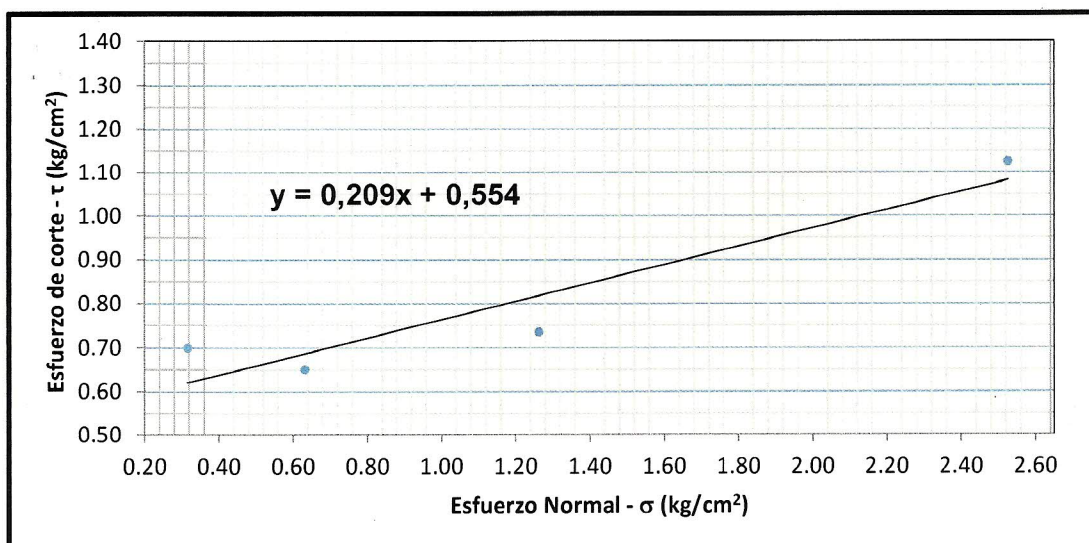
Tipo de Probeta: Remoldeada

Diámetro Inicial: 6.35 cm

Área inicial: 31.67 cm²

Altura inicial: 2.54 cm

Volúmen Inicial: 80.44 cm³



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 11,80^\circ$

COHESIÓN APARENTE: $C_u = 5,54 \text{ Ton/m}^2$

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.70	0.65	0.74	1.12
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.22	1.22	1.22	1.22
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.64	1.64	1.64	1.64
HUMEDAD (%H)	34.76	34.76	34.76	34.76

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

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>



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



Informe No.: 075 S.S.

O.T.: 31,775

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: CORTE DIRECTO

Norma: ASTM D 3080-04

Fecha: martes, 25 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 2
Muestra: 2

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo

Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado

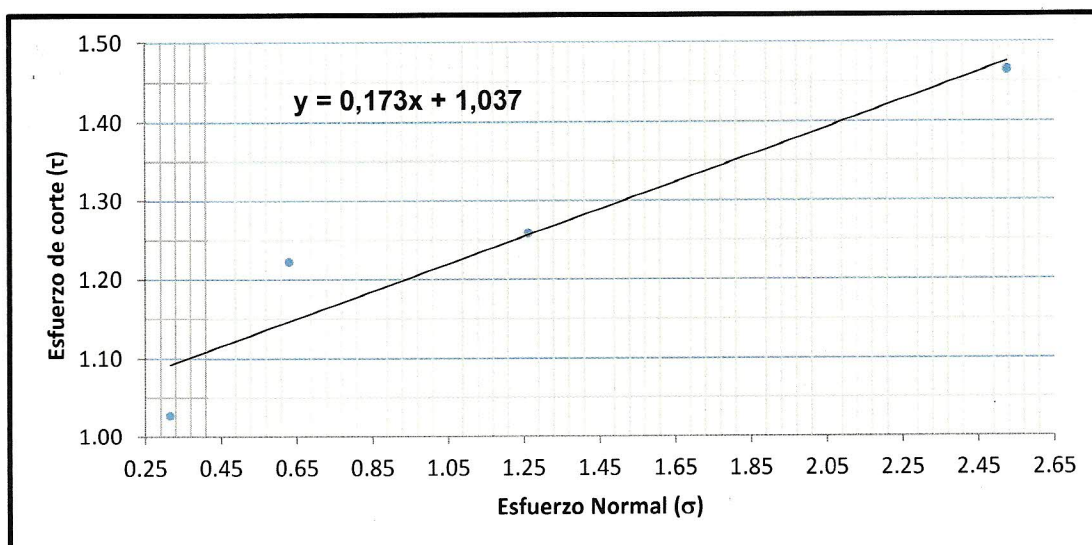
Tipo de Probeta: Remoldeada

Diámetro Inicial: 6.35 cm

Área inicial: 31.67 cm²

Altura inicial: 2.54 cm

Volúmen Inicial: 80.44 cm³



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 9,82^\circ$	COHESIÓN APARENTE: $C_u = 10,37 \text{ Ton/m}^2$
---	--

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	1.03	1.22	1.26	1.47
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.23	1.23	1.23	1.23
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.72	1.72	1.72	1.72
HUMEDAD (%H)	42.79	42.79	42.79	42.79

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 079 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

FECHA: miércoles, 26 de febrero de 2014

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	94.9	40.8	MH	Limo Arcilloso de Alta Plasticidad Color Beige
2	2	85.0	33.6	MH	Limo Arcilloso de Alta Plasticidad Color Rojizo

(*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

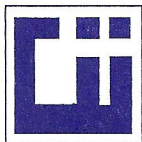
Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No. 080 S.S. **O.T. No.:** 31,577
INTERESADO: Lia Fernanda Boiton Tello
ENSAYO: Análisis Granulométrico por Sedimentación
NORMA: ASTM D422-02
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"
UBICACIÓN: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal
FECHA: miércoles, 26 de febrero de 2014 **MUESTRA:** 1

ANÁLISIS POR HIDRÓMETRO

Abertura	% que pasa
75.00 mm	100.00
40.14 µm	95.97
28.64 µm	93.87
18.42 µm	89.67
10.93 µm	83.37
7.97 µm	76.02
5.86 µm	68.04
3.03 µm	58.59
1.47 µm	3.57
1.04 µm	3.57

% de Grava: 0.00
% de Arena: 0.00
% de finos: 100.00

Clasificación:

S.C.U.: MH

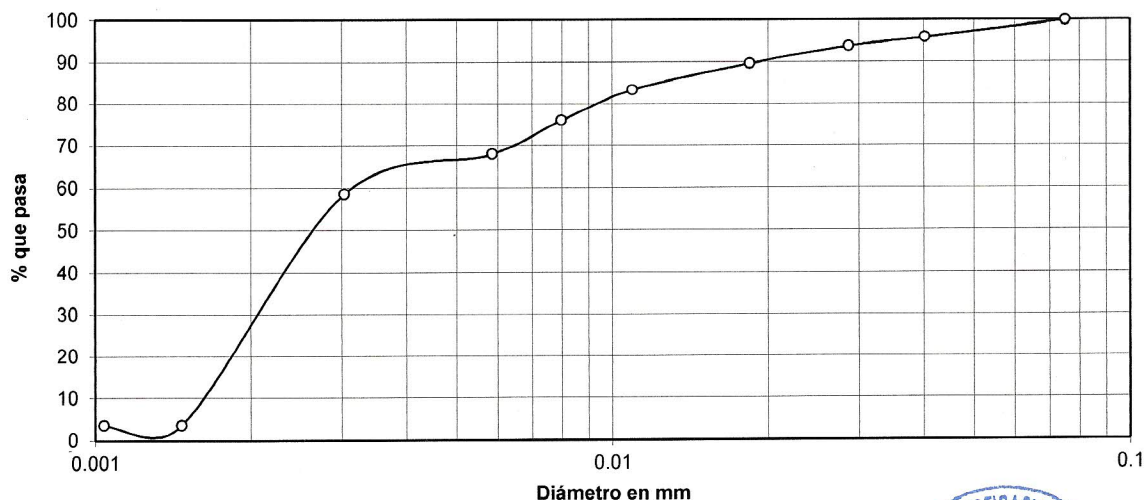
P.R.A.: A-7-5

Descripción del suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

$G_{20^{\circ}\text{C}} = 2.41$

Curva de Distribución Granulométrica



Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 081 S.S. O.T. No.: 31,577
INTERESADO: Lia Fernanda Boiton Tello
ENSAYO: Análisis Granulométrico por Sedimentación
NORMA: ASTM D422-02
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"
UBICACIÓN: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal
FECHA: miércoles, 26 de febrero de 2014 MUESTRA: 2

ANÁLISIS POR MALLAS

Tamiz	Abertura	% que pasa
1 1/2"	38.1 mm	100.00
3/4"	19.05 mm	100.00
4	4.75 mm	99.34
10	2.00 mm	98.29
40	425 μ m	96.55
200	75 μ m	96.39

ANÁLISIS POR HIDRÓMETRO

Abertura	% que pasa
75.00 mm	96.39
35.95 μ m	94.75
25.71 μ m	93.23
16.92 μ m	88.18
10.29 μ m	81.01
7.38 μ m	77.81
5.35 μ m	73.17
2.75 μ m	65.25
1.33 μ m	27.31
1.28 μ m	20.23
0.70 μ m	14.67

% de Grava: 0.66
% de Arena: 2.95
% de finos: 96.39

Clasificación:

S.C.U.: MH

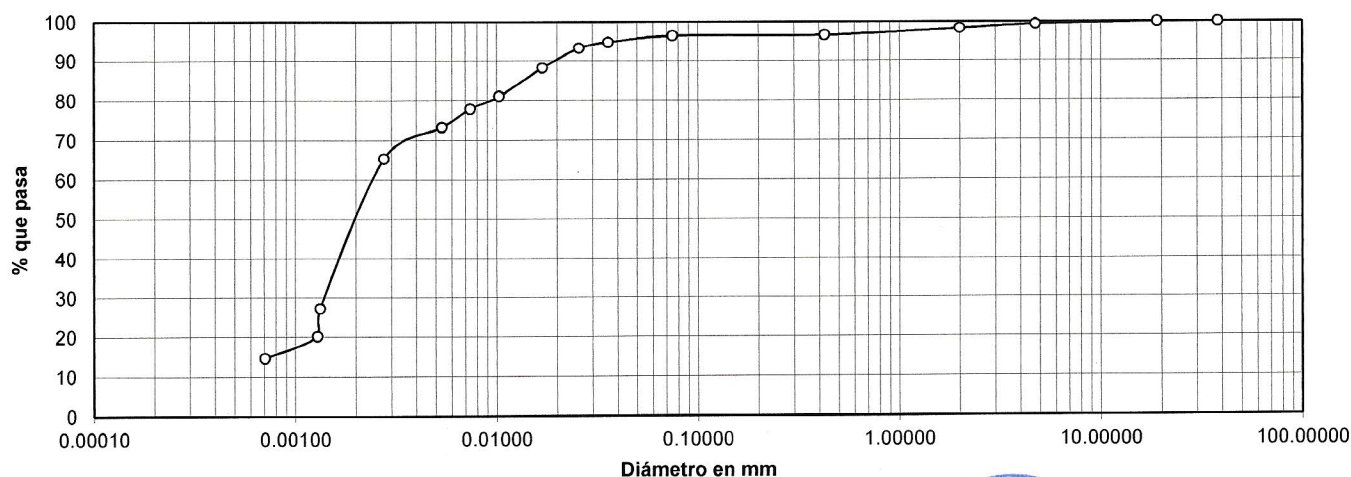
P.R.A.: A-7-5

Descripción del suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

G_{20°C} = 2.50

Curva de Distribución Granulométrica



Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

INFORME No.: 082 S.S.

O.T.: 31,577

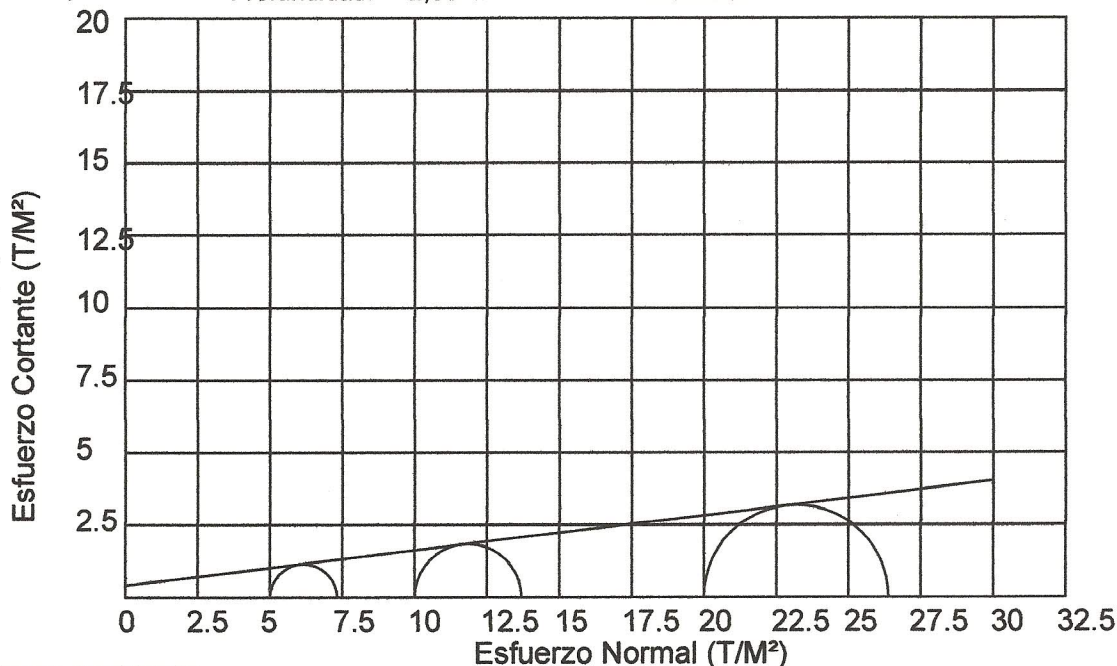
INTERESADO: Lia Fernanda Boiton Tello

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

pozo: 1 Profundidad: 2,00 m Muestra: 1



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 6,85^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 0,428 \text{ Ton/m}^2$

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo Arcilloso Color Beige

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)	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA q (T/m ²)	6.16	11.85	23.19
PRESION INTERSTICIAL u (T/m ²)	x	x	x
DEFORMACION EN ROTURA E_r (%)	2.0	3.5	6.0
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.12	1.12	1.12
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.70	1.70	1.70
HUMEDAD (%H)	52.90	52.90	52.90

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Atentamente,

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, DIAGRAMA DE MOHR

INFORME No.: 083 S.S.

O.T.: 31,577

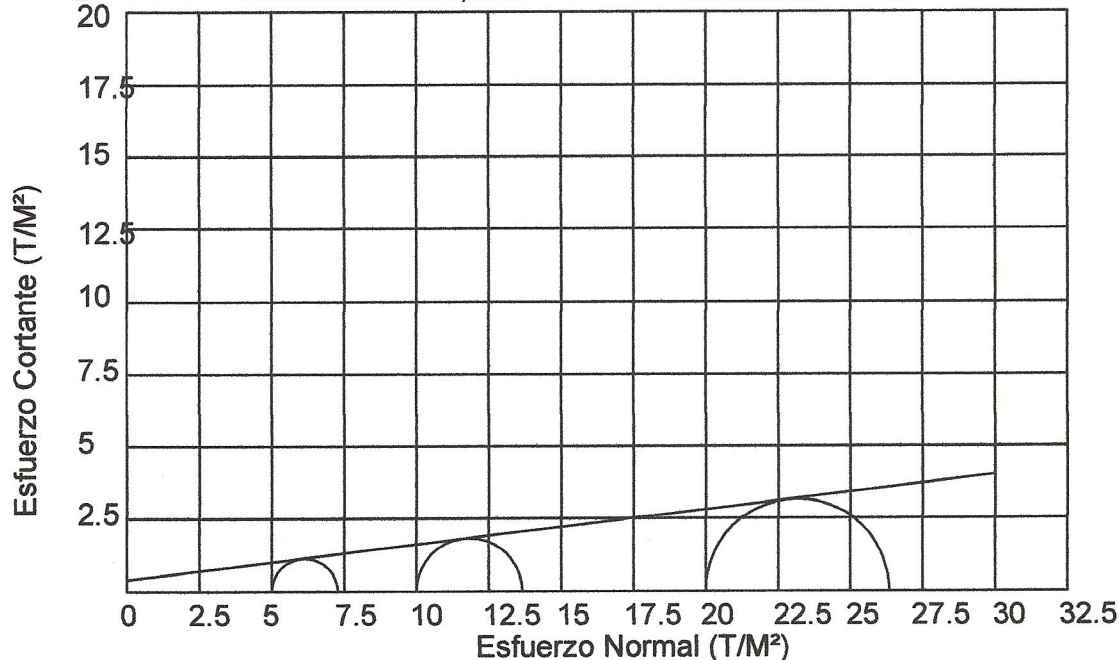
INTERESADO: Lia Fernanda Boiton Tello

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

UBICACIÓN: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

FECHA: miércoles, 26 de febrero de 2014

POZO: 2 PROFUNDIDAD: 2,00 m MUESTRA: 2



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 6,85^\circ$

COHESIÓN: $C_u = 0,411 \text{ Ton/m}^2$

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo Arcilloso Color Rojizo

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)	5	10	20
DESVIADOR EN ROTURA q (T/m ²)	6.14	11.83	23.17
PRESION INTERSTICIAL u (T/m ²)	x	x	x
DEFORMACION EN ROTURA E_r (%)	3.0	4.5	6.5
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.17	1.17	1.17
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.71	1.71	1.71
HUMEDAD (%H)	46.63	46.63	46.63

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

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>



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



INFORME No. 084 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

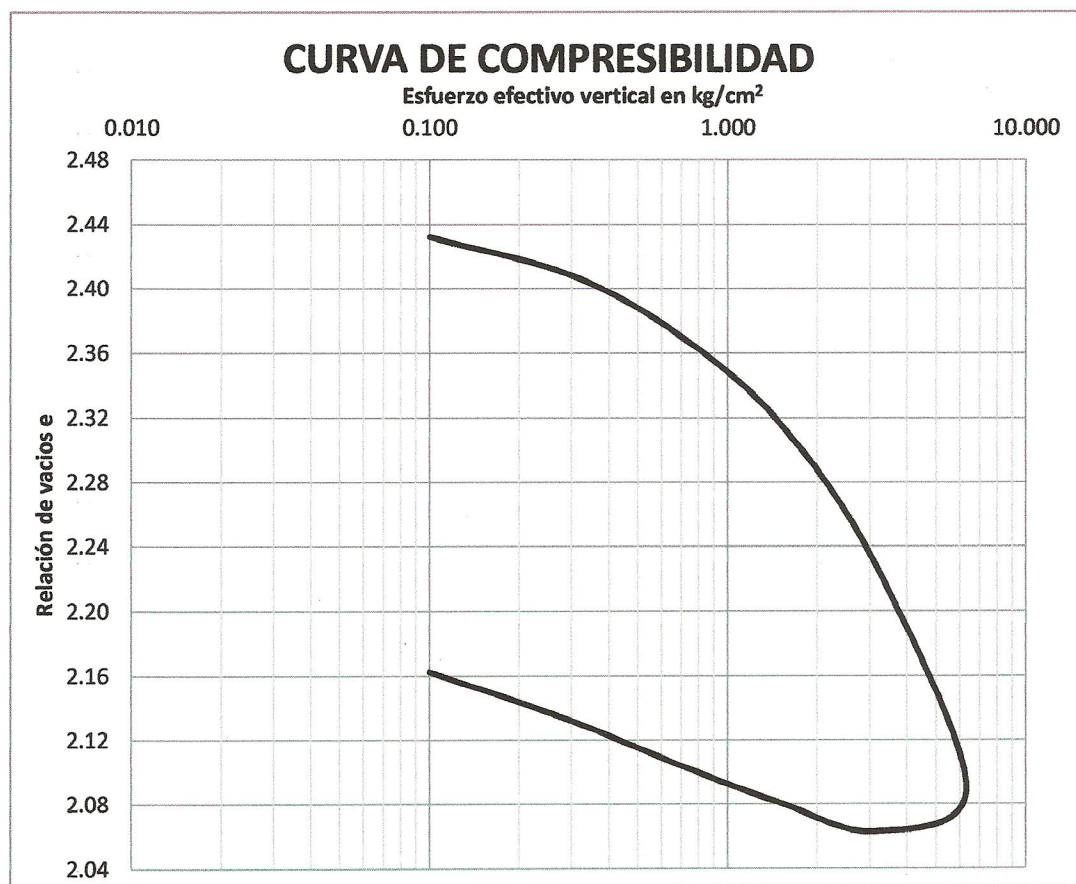
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 085 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Norma: ASTM D-2435

Pozo No.: 1

RESULTADOS		
ENSAYO No.		1
Muestra No.		1
Profundidad (m)		2.00
Gravedad Específica		2.41
Humedad (%)		42.71
γ (g/cm ³)		1.53
γ_d (g/cm ³)		1.07
σ'_v (kg/cm ²)		0.306
e_o		2.432
σ'_p (kg/cm ²)		1.90
C_s		0.0674
C_c		0.512
C_v (m ² /s)	0.027 (kg/cm ²)	7.60E-07
	0.081 (kg/cm ²)	2.85E-07
	0.188 (kg/cm ²)	9.91E-08
	0.403 (kg/cm ²)	4.56E-07
	0.833 (kg/cm ²)	7.60E-07
	1.692 (kg/cm ²)	1.30E-06

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

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>



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



INFORME No. 086 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

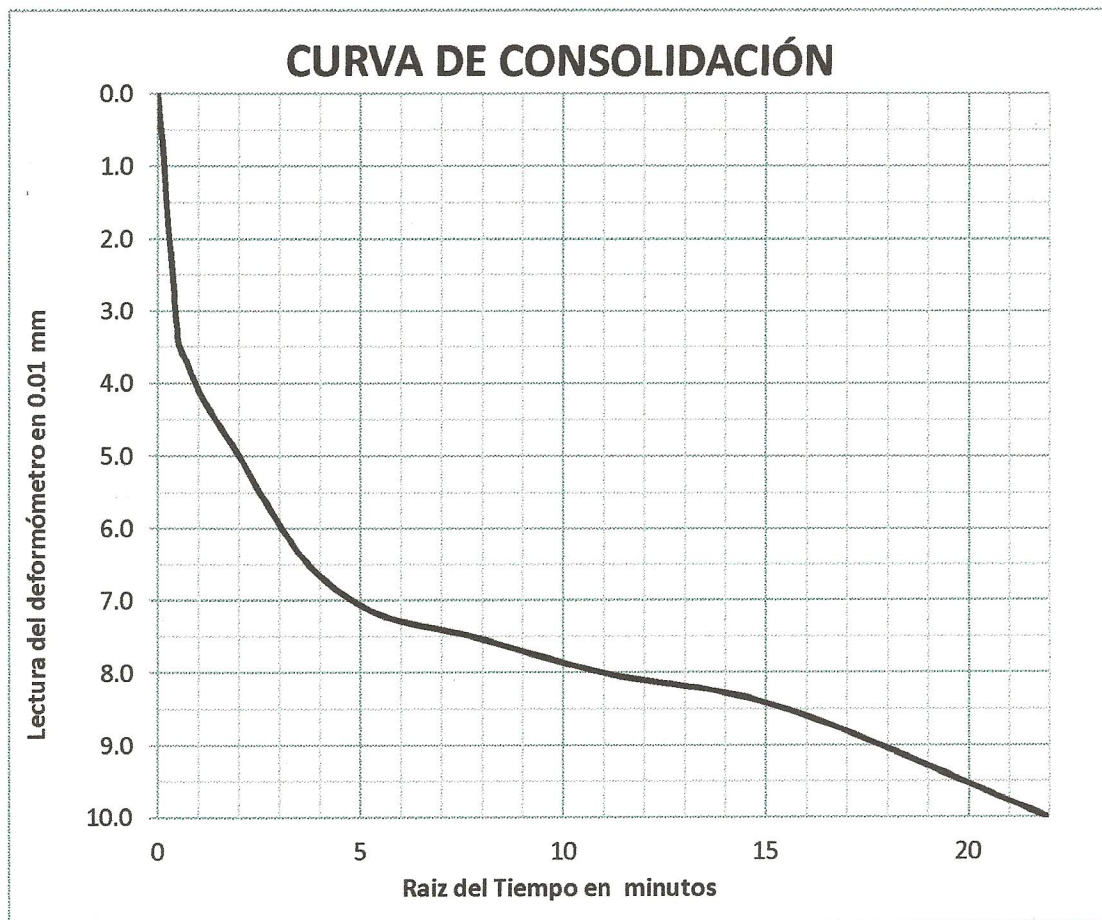
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical: 0.100 kg/cm²

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





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



INFORME No. 087 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

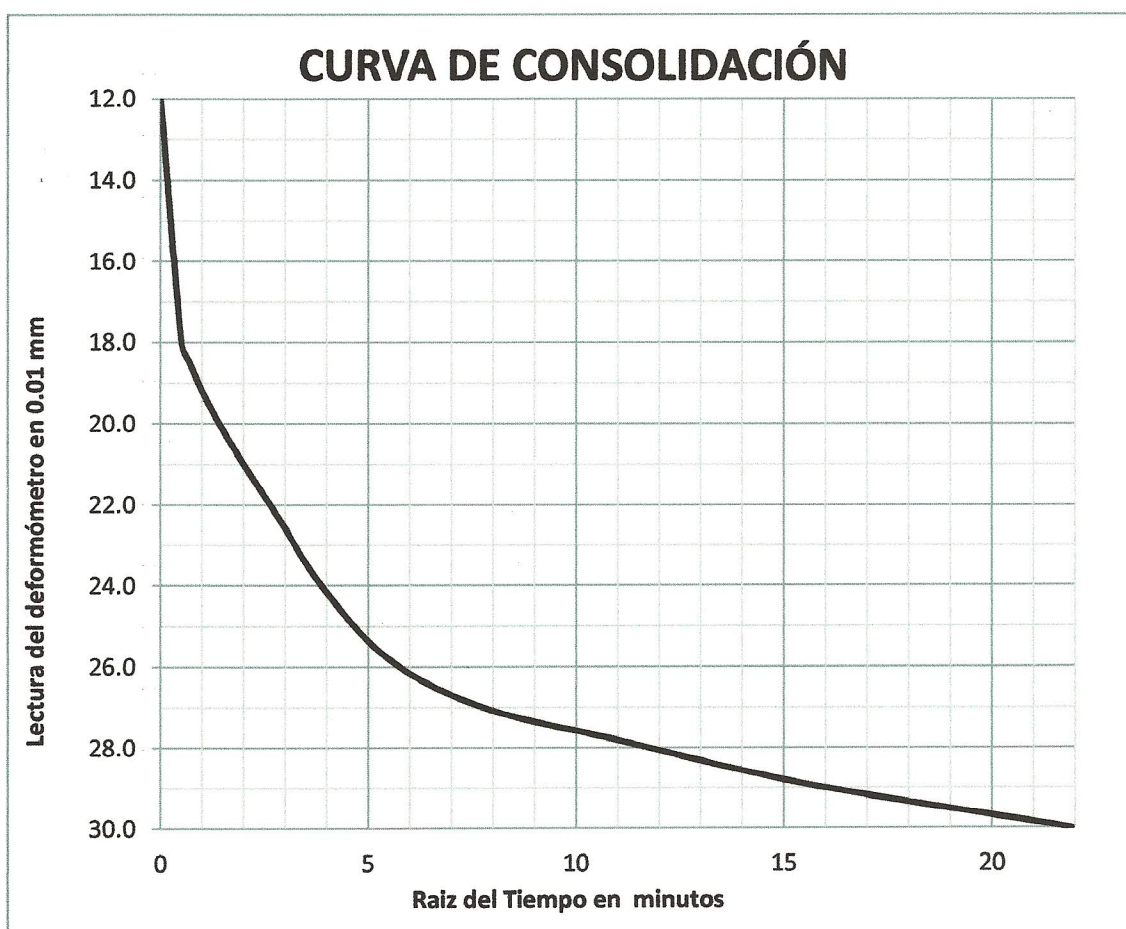
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical:

0.302 kg/cm²

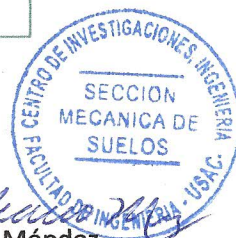
Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115, Plánta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



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



INFORME No. 088 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

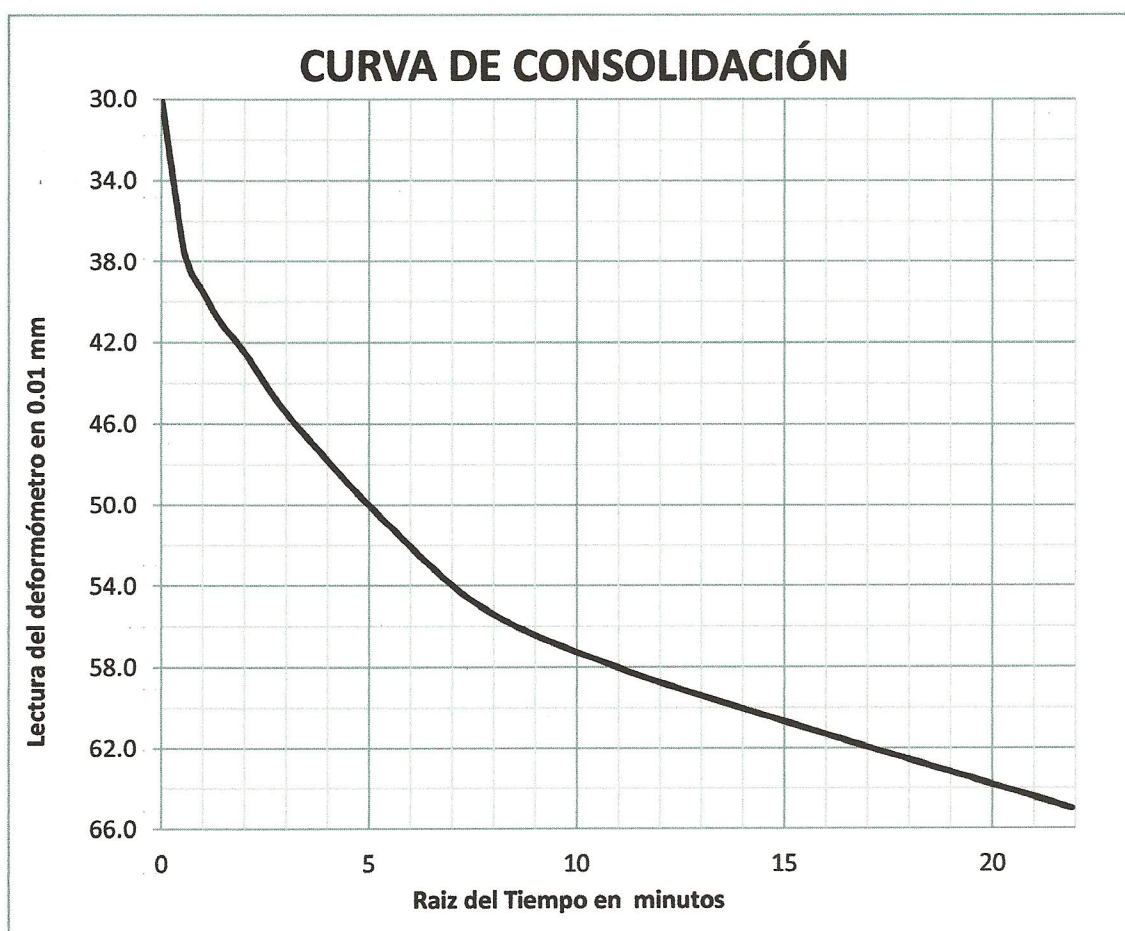
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical:

0.703 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 089 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

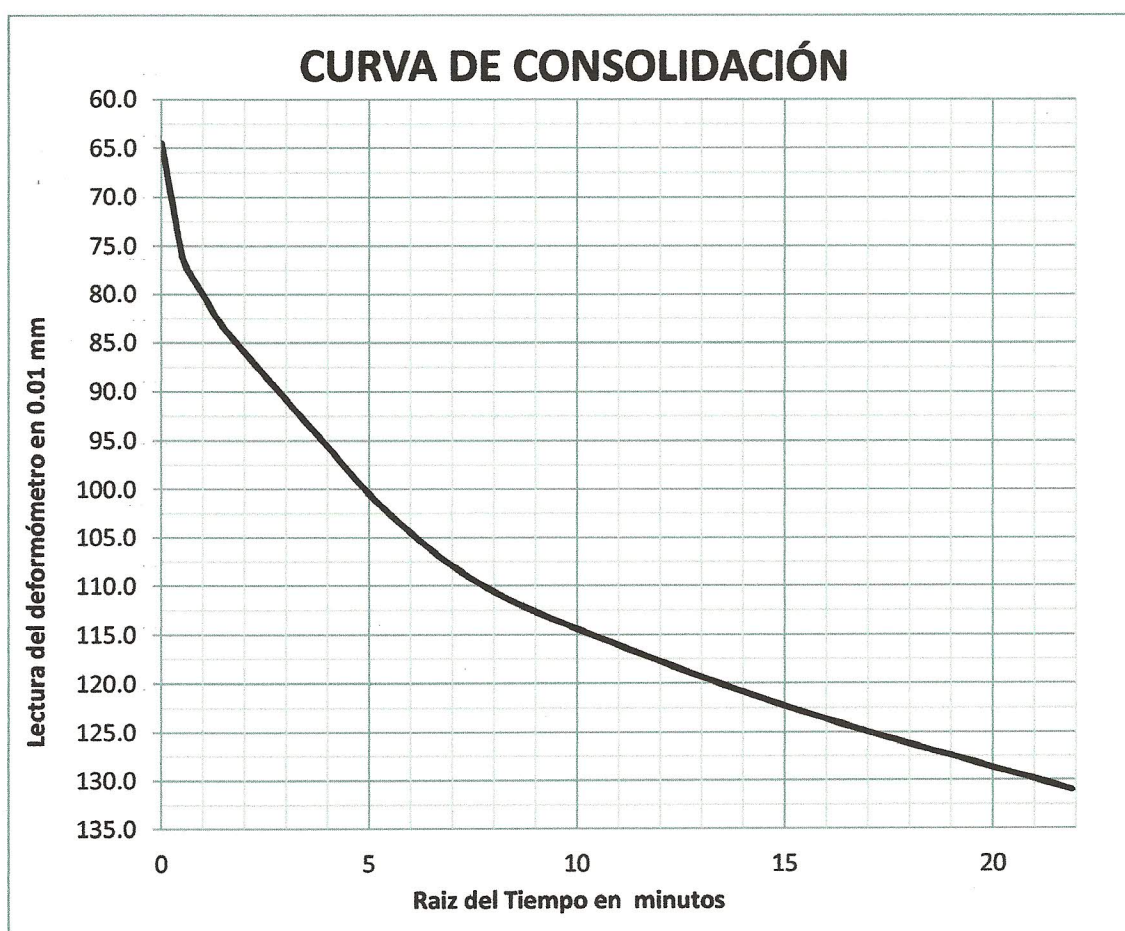
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical:

1.505 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio J-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>



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



INFORME No. 090 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

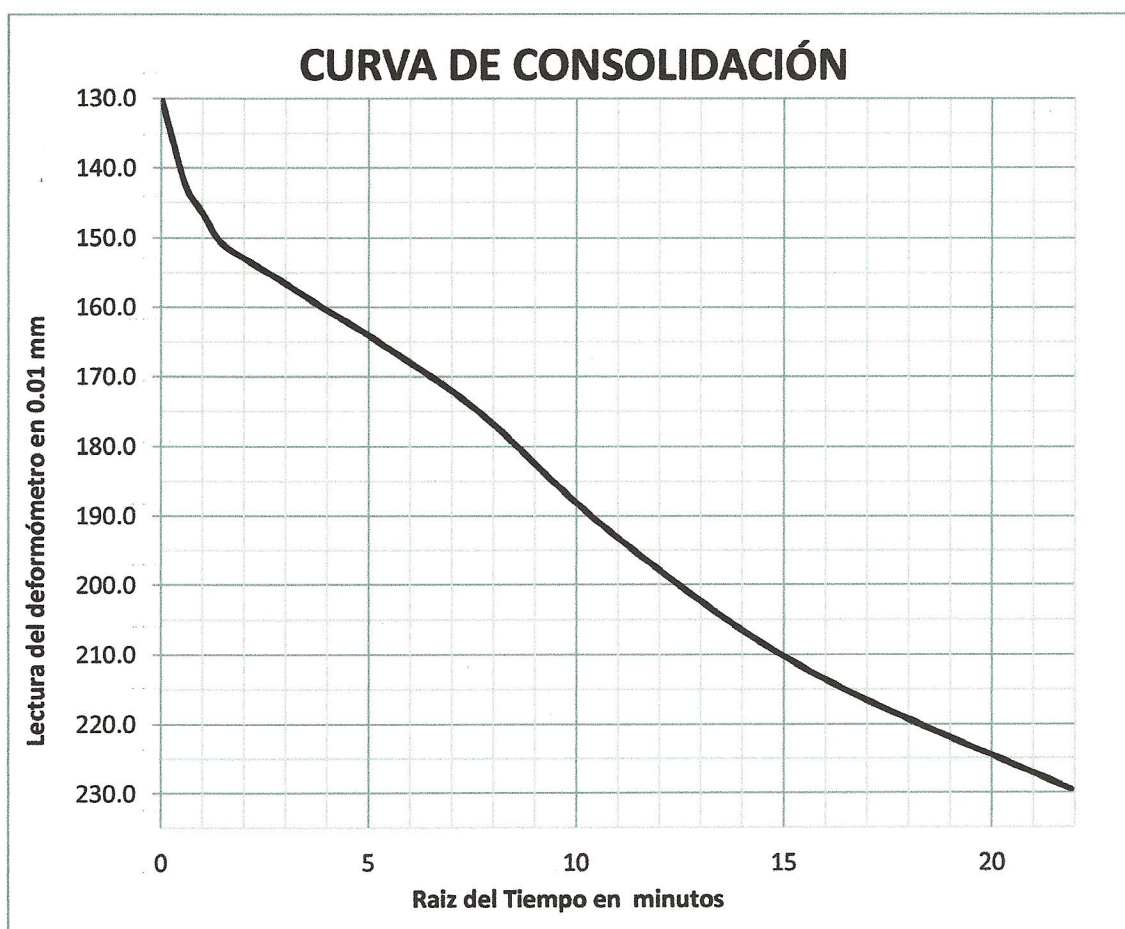
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical:

3.108 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 091 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

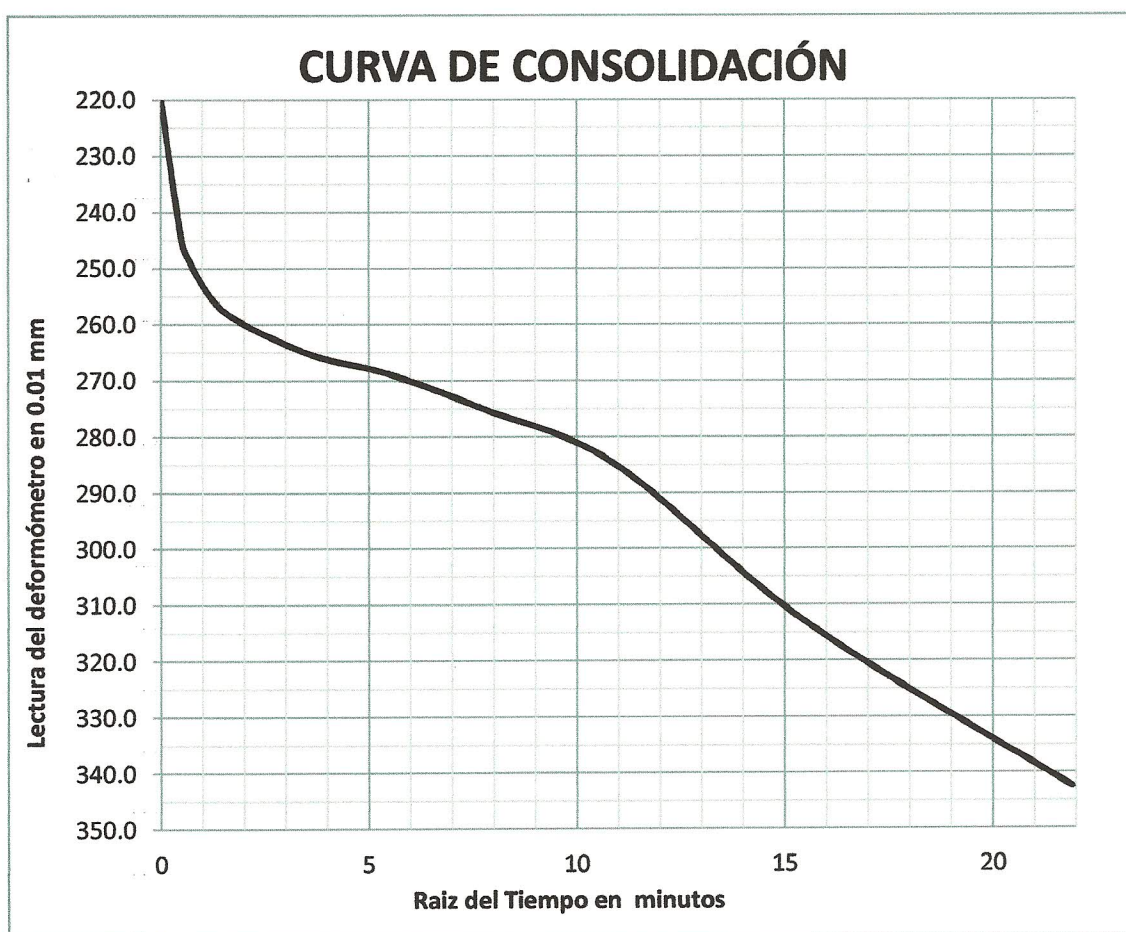
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 1

Muestra: 1



Esfuerzo Efectivo Vertical:

6.316 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Beige

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 092 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

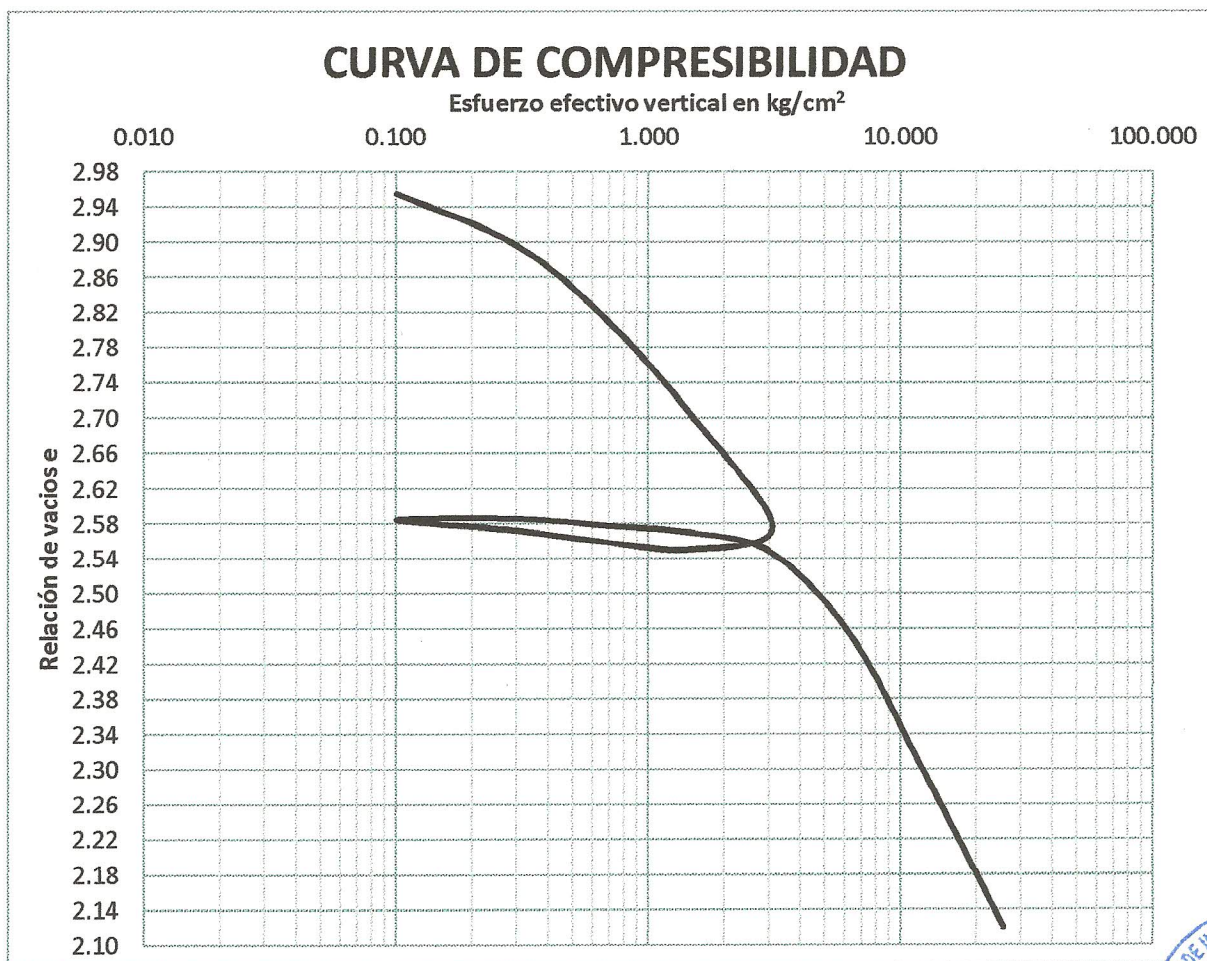
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-8115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



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



INFORME No. 093 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Norma: ASTM D-2435

Pozo No.: 2

RESULTADOS		
ENSAYO No.	1	
Muestra No.	2	
Profundidad (m)	2.00	
Gravedad Especifica	2.50	
Humedad (%)	58.60	
γ (g/cm ³)	1.58	
γ_d (g/cm ³)	1.00	
σ'_v (kg/cm ²)	0.316	
e_o	2.955	
σ'_p (kg/cm ²)	0.37	
C_s	0.027	
C_c	0.394	
C_v (m ² /s)	0.027 (kg/cm ²)	1.27E-06
	0.081 (kg/cm ²)	5.70E-07
	0.188 (kg/cm ²)	2.75E-07
	0.403 (kg/cm ²)	3.26E-07
	0.833 (kg/cm ²)	3.26E-07
	1.692 (kg/cm ²)	6.00E-07
	3.410 (kg/cm ²)	1.98E-07
	6.847 (kg/cm ²)	1.49E-09

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Marcela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



INFORME No. 094 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

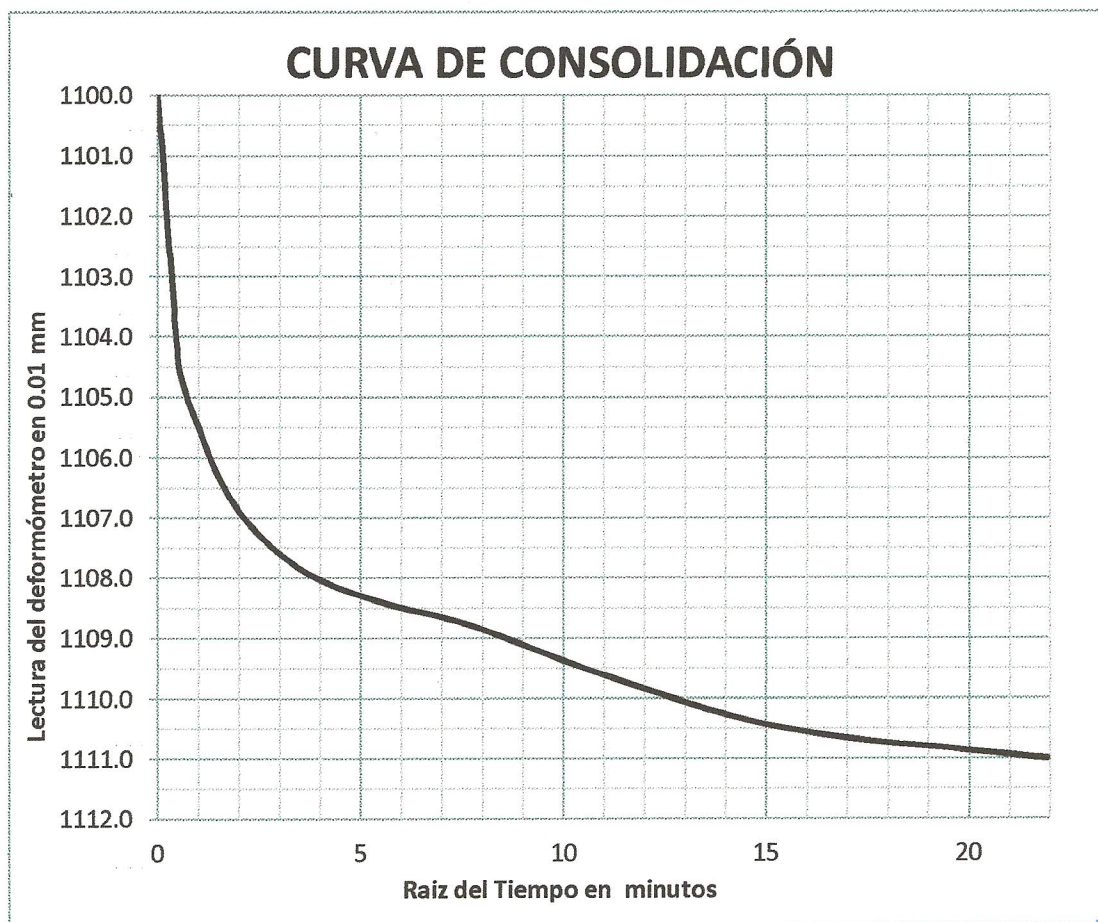
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Esfuerzo Efectivo Vertical:

0.100 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

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>



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



INFORME No. 095 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

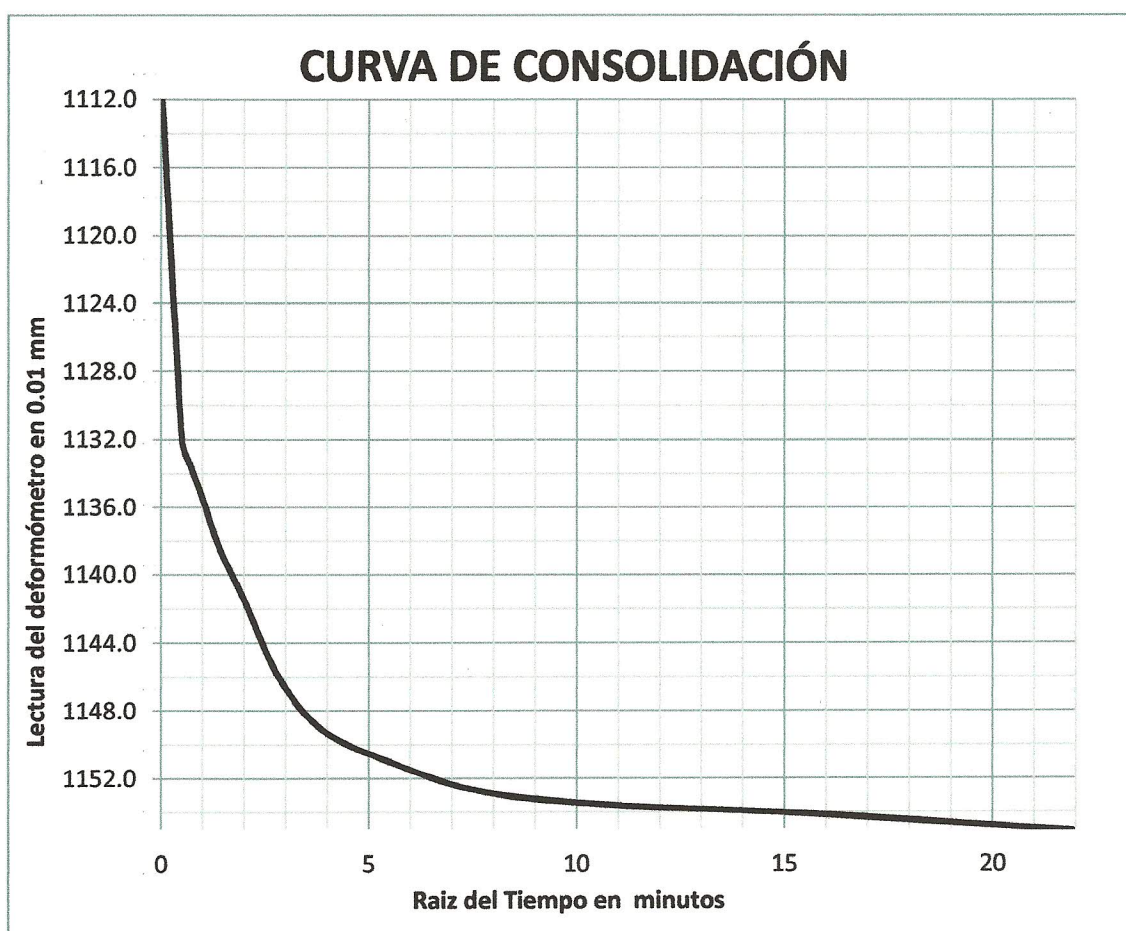
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Esfuerzo Efectivo Vertical:

0.302 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

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>



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



INFORME No. 096 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

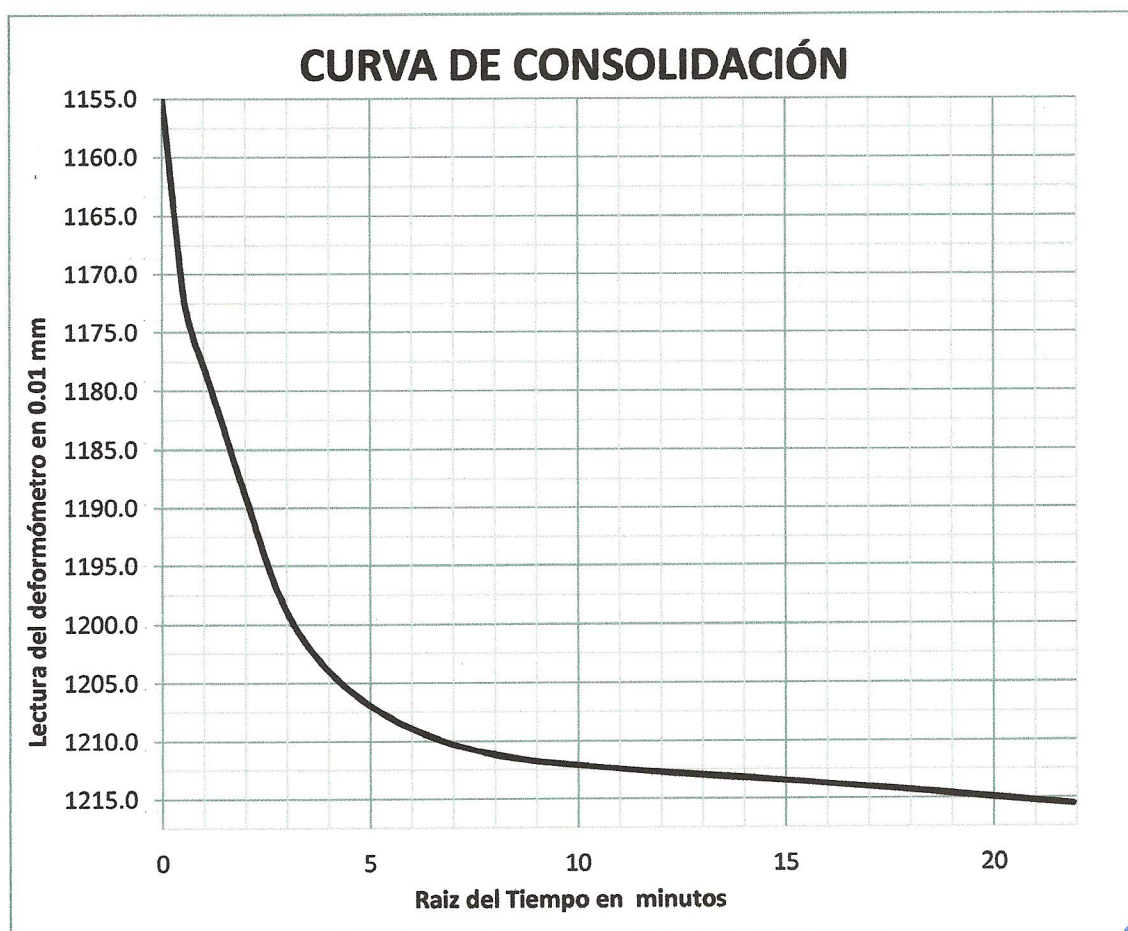
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Esfuerzo Efectivo Vertical:

0.703 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No. 097 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

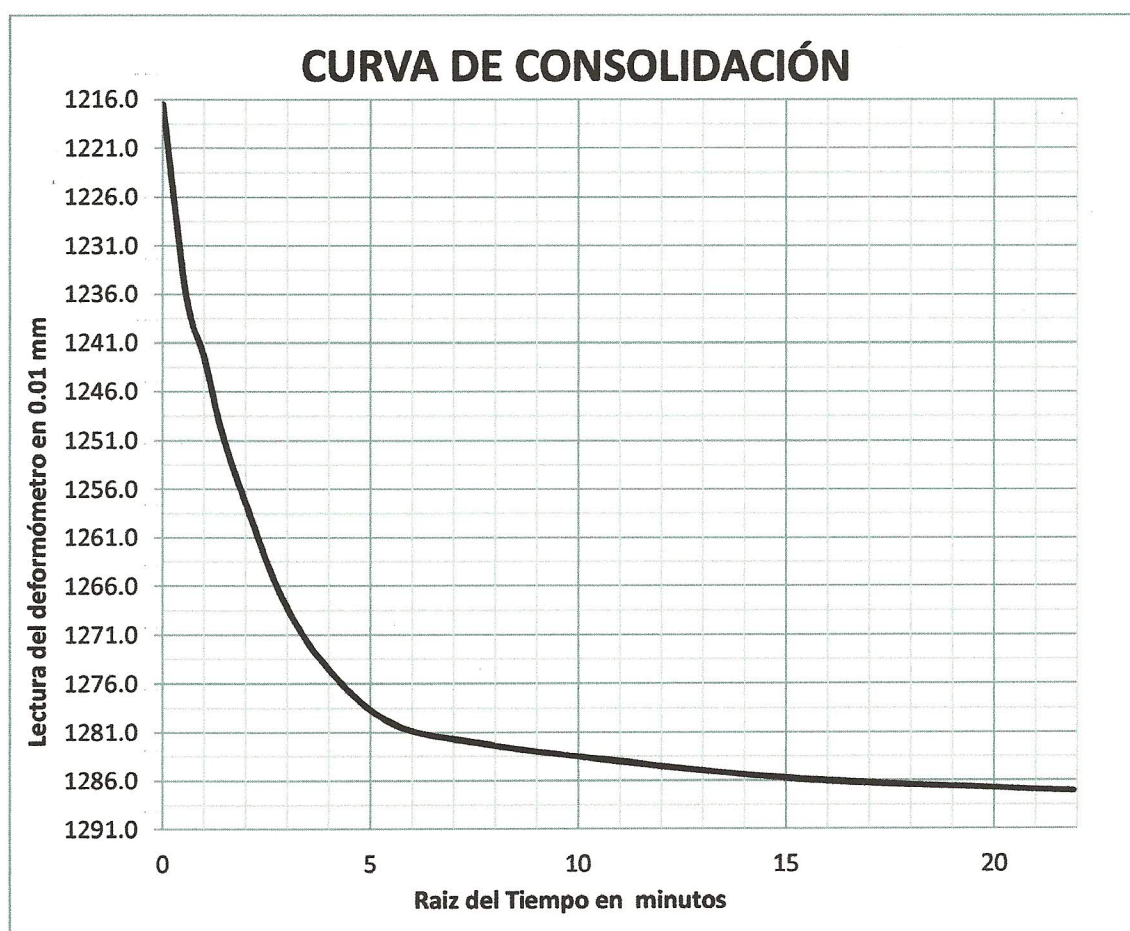
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Esfuerzo Efectivo Vertical:

1.505 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





INFORME No. 098 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lía Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos Cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Profundidad: 2.00 m

Ubicación: Avenida Zaragoza No.15, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

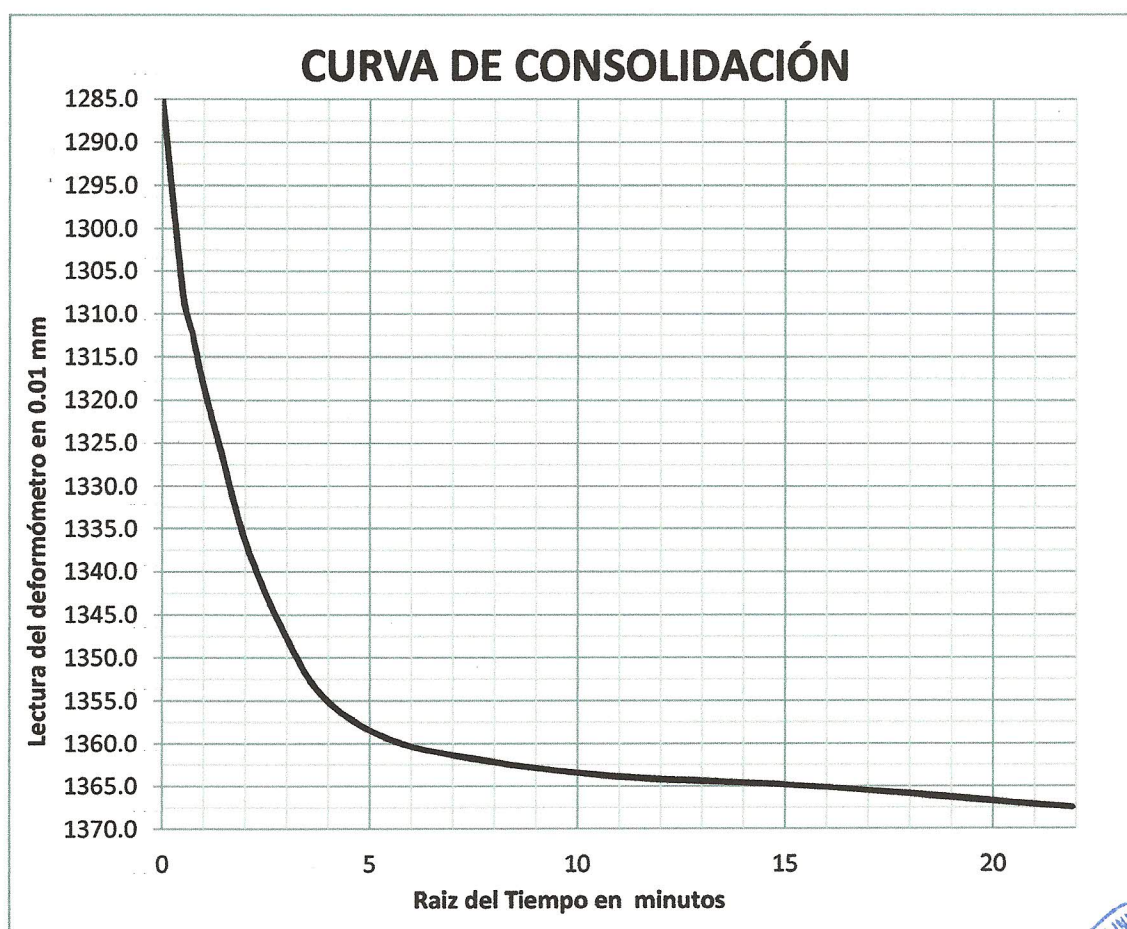
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Norma: ASTM D-2435

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Pozo No.: 2

Muestra: 2



Esfuerzo Efectivo Vertical:

3.108 kg/cm²

Descripción del Suelo:

Limo Arcilloso Color Rojizo

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



Informe No.: 099 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

Pozo: 1

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige

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: 938.43

Área Inicial: 39.73 cm²

Densidad Húmeda Inicial: 1.66 Ton/m³

Altura inicial: 14.22 cm

Humedad Inicial (%H): 53.15

Volúmen Inicial: 565.06 cm³

Gravedad Específica - G_{20°C}: 2.41

PARÁMETROS DE SATURACIÓN:

Tipo de Saturación: Método Húmedo

Contra-Presión Total: 49.20 Ton/m²

Parámetro B Final: 0.9862

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:

Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 70.31 Ton/m²

Volumen de agua expulsado del espécimen: 1.73 cm³

Humedad después de consolidación (%H): 50.32

Relación de Vacíos después de Consolidación: 2.597

PARÁMETROS DE CORTE:

Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

Probeta No.	1	2	3
Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	14.63	18.89	22.68
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	19.63	27.41	42.68
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	5.00	10.00	20.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	2.46	4.50	5.98
Deformación en Rotura - ε (%)	5.40	4.90	9.40
Densidad Seca (Ton/m ³)	1.66	1.66	1.66
Densidad Humeda (Ton/m ³)	1.10	1.10	1.10
Humedad (%H)	50.32	50.32	50.32

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

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



Informe No.: 100 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

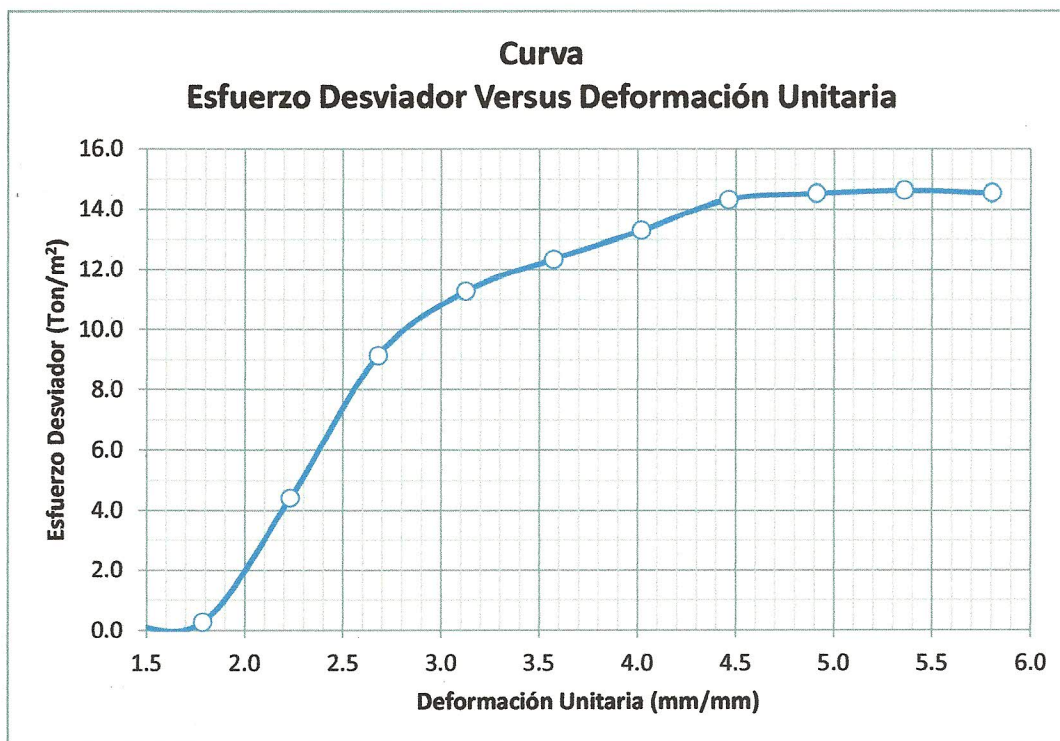
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige



Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	14.63
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	19.63
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	5.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	2.46
Deformación en Rotura - ϵ (%)	5.40

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



Informe No.: 101 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

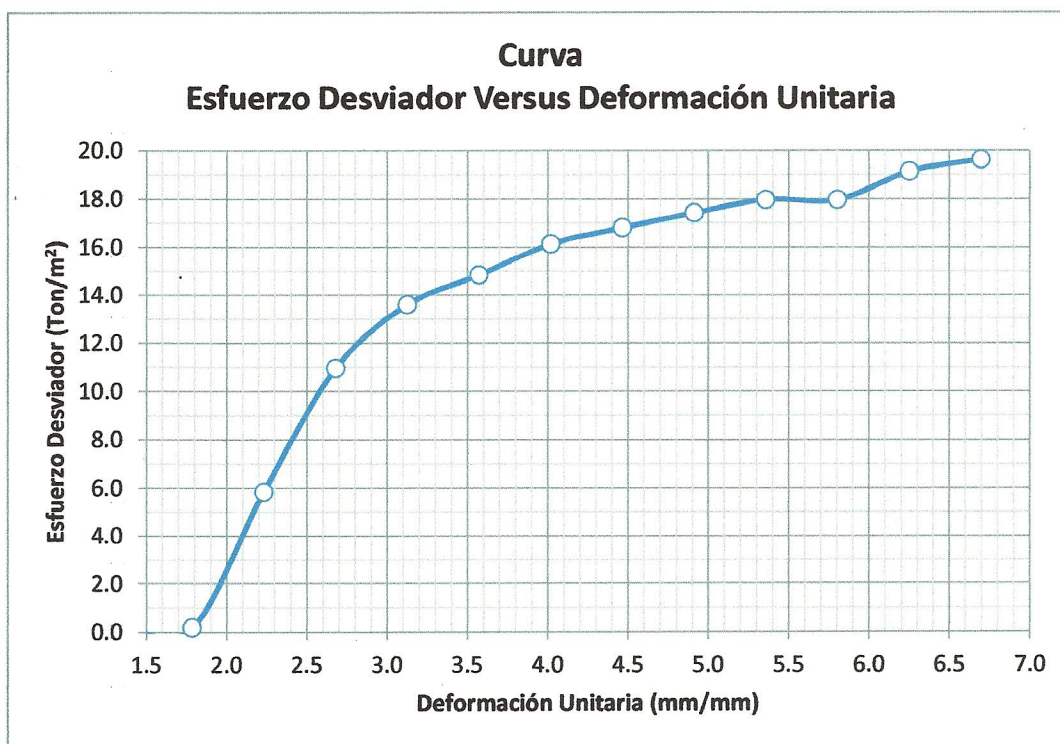
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige



Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	17.97
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	27.97
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	10.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	4.64
Deformación en Rotura - ϵ (%)	5.40

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



Informe No.: 102 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

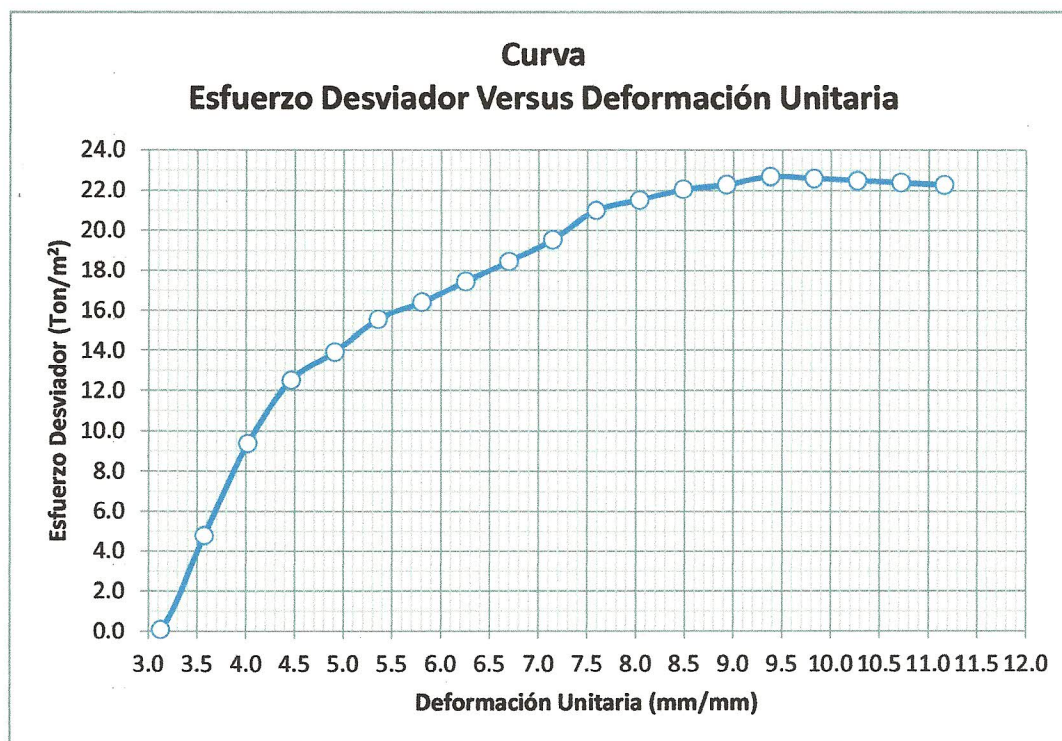
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige



Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	22.68
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	42.68
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	20.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	5.98
Deformación en Rotura - ϵ (%)	9.40

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



Informe No.: 103 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

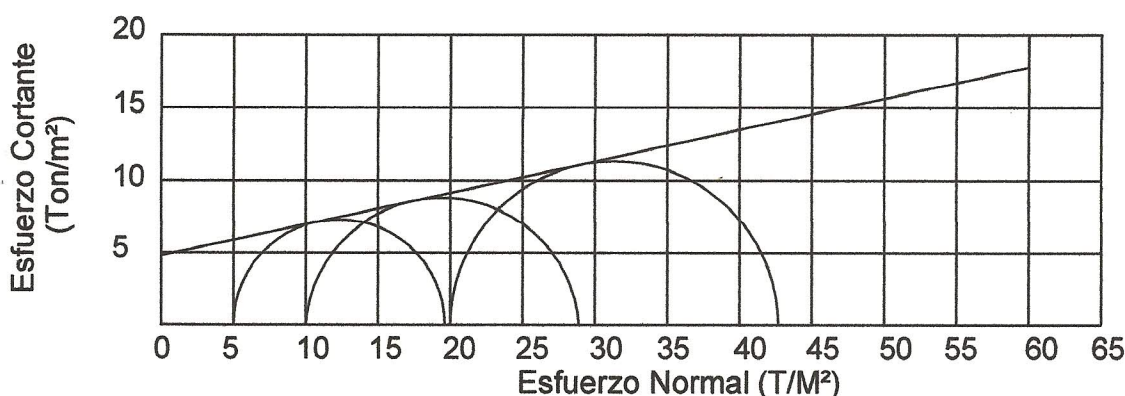
Pozo: 1

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Muestra: 1

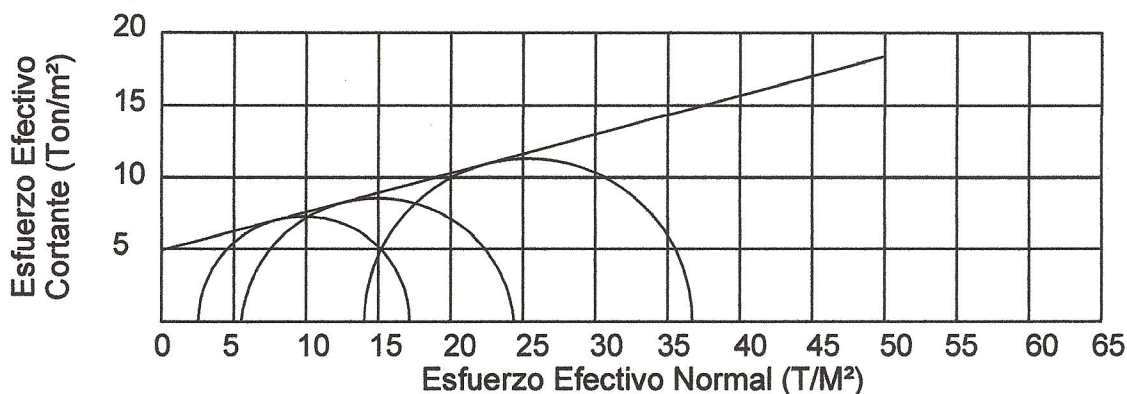
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Beige



PARÁMETROS DE CORTE:

Angulo de Fricción Interna: $\phi = 12.22^\circ$

Cohesión Aparente: $C_u = 4.81 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:

Angulo de Fricción Interna Efectivo: $\phi' = 15.05^\circ$

Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 4.92 \text{ Ton/m}^2$

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



Informe No.: 104 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO

Norma: ASTM D 4767-04

Pozo: 2

Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Muestra: 2

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo

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

Área inicial: 39.73 cm²

Altura inicial: 14.22 cm

Volúmen Inicial: 565.06 cm³

Masa Inicial: 915.39 g

Densidad Húmeda Inicial: 1.62 Ton/m³

Humedad Inicial (%H): 47.31

Gravedad Específica - G_{20°C}: 2.50

PARÁMETROS DE SATURACIÓN:

Tipo de Saturación: Método Húmedo

Contra-Presión Total: 42.156 Ton/m²

Parámetro B Final: 0.9826

PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN:

Esfuerzo Efectivo de Consolidación: 56.24 Ton/m²

Volumen de agua expulsado del espécimen: 0.73 cm³

Humedad después de consolidación (%H): 45.39

Relación de Vacíos después de Consolidación: 2.61

PARÁMETROS DE CORTE:

Velocidad de deformación: 0.05 plg/min

Probeta No.	1	1	1
Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	26.22	29.95	33.04
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	31.22	39.95	53.04
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	5.00	10.00	20.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	3.70	4.30	4.40
Deformación en Rotura - ε (%)	4.00	4.00	1.80
Densidad Seca (Ton/m ³)	1.10	1.10	1.10
Densidad Humeda (Ton/m ³)	1.60	1.60	1.60
Humedad (%H)	45.39	45.39	45.39

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

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Inga. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-5115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121

Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



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



Informe No.: 105 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

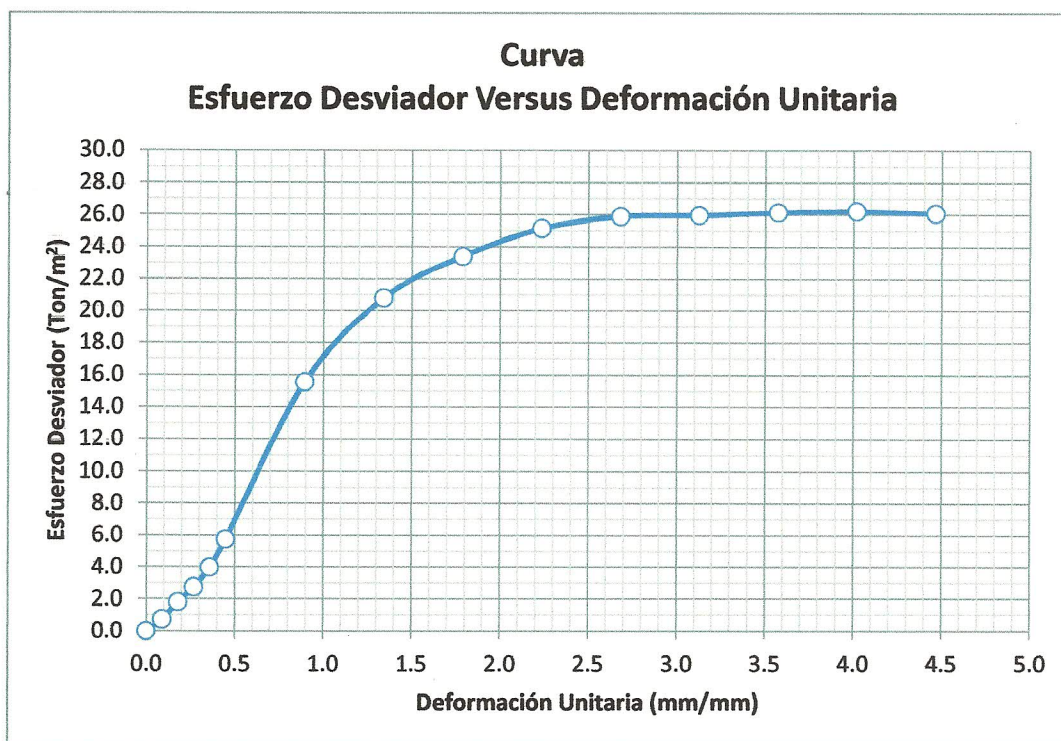
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo

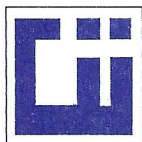


Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	26.22
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	31.22
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	5.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	3.70
Deformación en Rotura - ϵ (%)	4.00

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



Informe No.: 106 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

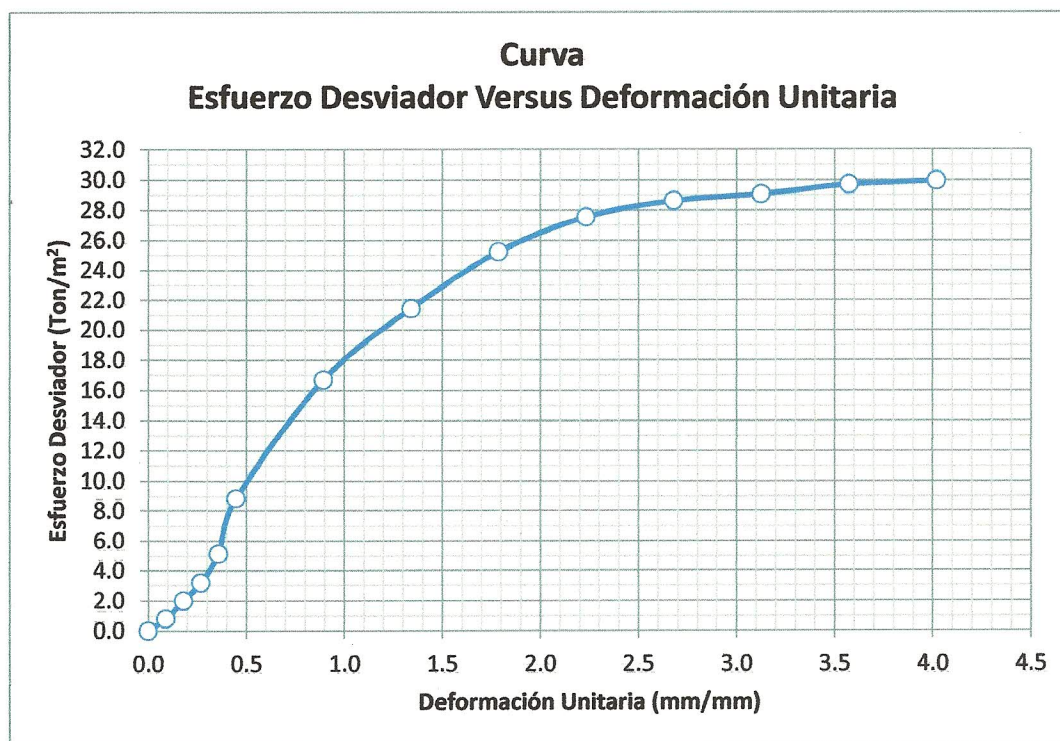
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo



Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	29.95
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	39.95
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	10.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	4.30
Deformación en Rotura - ϵ (%)	4.00

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —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>



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



Informe No.: 107 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

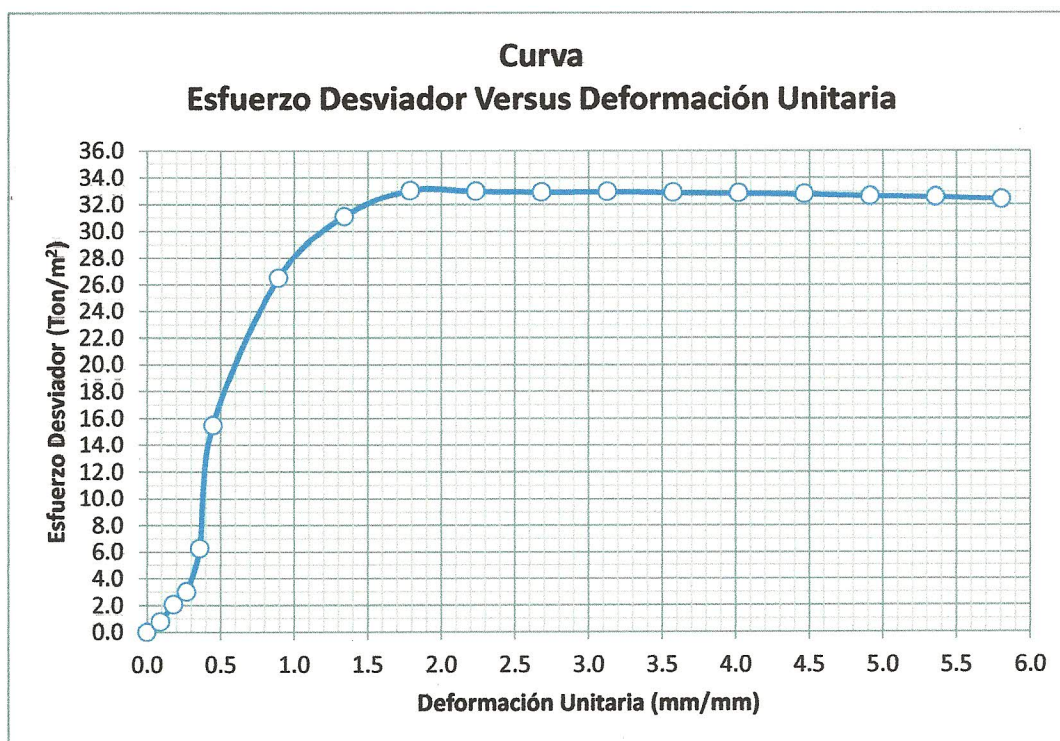
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 1

Muestra: 1

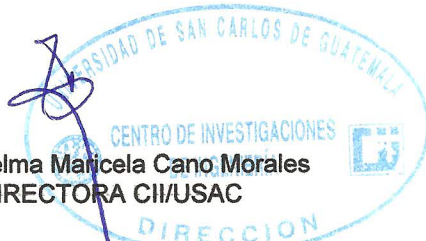
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo



Esfuerzo Desviador de Rotura (Ton/m ²)	33.04
Esfuerzo Principal Mayor (Ton/m ²)	53.04
Esfuerzo Principal Menor (Ton/m ²)	20.00
Presión Intersticial (Ton/m ²)	4.40
Deformación en Rotura - ϵ (%)	1.80

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





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



Informe No.: 108 S.S.

O.T.: 31,577

Interesado: Lia Fernanda Boiton Tello

Proyecto: Trabajo de Graduación "Determinación del Módulo Elástico en los Suelos cohesivos mediante pruebas de Laboratorio para estimar el asentamiento elástico"

Ubicación: Avenida Zaragoza No. 16, Residenciales Las Terrazas 1, Ciudad San Cristobal

Ensayo: **COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO**

Norma: **ASTM D 4767-04**

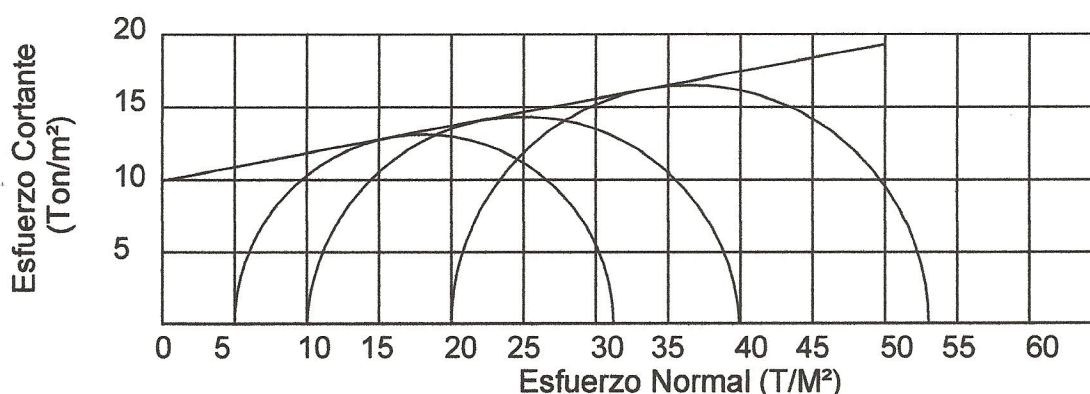
Fecha: miércoles, 26 de febrero de 2014

Profundidad: 2.00 m

Pozo: 2

Muestra: 2

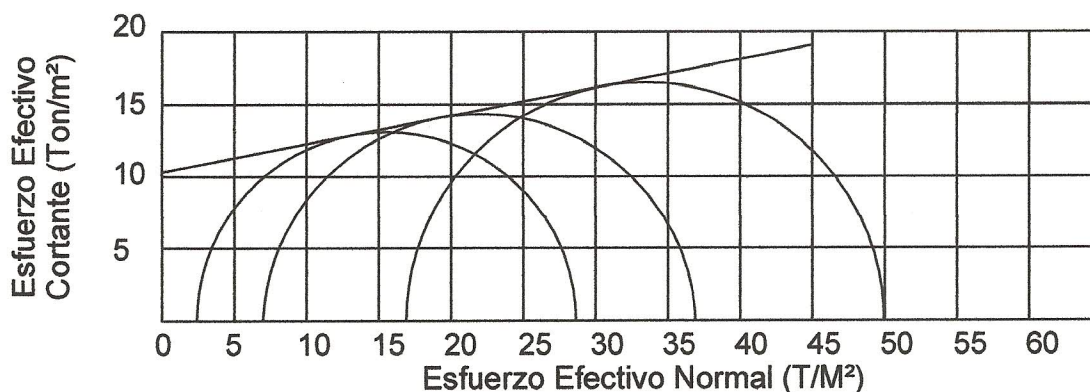
Descripción del Suelo: Limo Arcilloso Color Rojizo



PARÁMETROS DE CORTE:

Angulo de Fricción Interna: $\phi = 10.67^\circ$

Cohesión Aparente: $C_u = 9.92 \text{ Ton/m}^2$



PARÁMETROS DE CORTE:

Angulo de Fricción Interna Efectivo : $\phi' = 10.97^\circ$

Cohesión Aparente Efectiva: $C_u' = 10.34 \text{ Ton/m}^2$

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos