

Evolución de las propiedades dinámicas de un suelo a diferentes condiciones de humedad

Laura Lisbeth Pimiento Quintero

Richard Fabian Ruiz Carvajal

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Doctor of Philosophy

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Metodología	15
1.1 Recolección de la muestra.....	15
1.2 Caracterización del material.....	16
1.2.1 Clasificación del suelo.....	16
1.2.2 Humedad óptima (WA) y densidad seca (γ_d).....	17
1.3 Re-moldeamiento de las muestras.....	19
1.4 Protocolo de secado y humecimiento.....	24
1.5 Ensayos triaxial dinámico.	26
1.5.1 Preparación de las muestras antes del ensayo	26
1.5.2 Saturación	27
1.5.3. Consolidación	27
1.5.4. Aplicación de la carga cíclica.....	28
2. Recopilación de datos y análisis de resultados	29
2.1. Cálculo del módulo de corte (G) y la razón de amortiguamiento (ξ).....	29
2.1.1. Cálculo de módulo de corte secante (Gsec).	30
2.1.2. Cálculo de la razón de amortiguamiento	32
2.2 Resultados.	34

2.2.1 Módulo de corte (τ) vs Deformación (ϵ máx.)	36
2.2.2 Amortiguamiento (ξ) vs Deformación (ϵ_{max})	37
2.2.3. Presión de poros vs Tiempo.....	38
3. Conclusiones.....	39
4. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	41
Apéndices.....	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sitio de la toma de la muestra.....	15
Figura 2. Sitio de la toma de la muestra.....	15
Figura 3. Muestra en estudio.....	16
Figura 4. Gráfico Diámetro (mm) vs Porcentaje que pasa (%).....	16
Figura 5. Carta de plasticidad casa grande.....	17
Figura 6. Ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.....	18
Figura 7. Gráfica % Humedad vs Densidad seca.....	19
Figura 8. Molde.....	20
Figura 9. Molde.....	20
Figura 10. Probeta creada en el laboratorio.	22
Figura 11. Probeta creada en el laboratorio.	22
Figura 12. Gráfica Tiempo vs Peso probeta.....	23
Figura 13. Desecador empleado para el humedecimiento de la probeta.....	25
Figura 14. Agua destilada utilizada para el humedecimiento de la probeta.	25
Figura 15. Muestra preparada y montada en el equipo de triaxial dinámico.....	27
Figura 16. Gráfica de consolidación de un espécimen.	28
Figura 17. Curvas de histéresis de deformación de corte (γ) y tensión de corte (τ).	30
Figura 18. Curva de histéresis amplitud 1, ciclo 2 de la muestra de control	31

Figura 19. Curva de histéresis amplitud 1, ciclo 2 y la recta secante a la curva.....	31
Figura 20. Curva de histéresis.....	32
Figura 21. Calculo del área del bucle de histéresis.	33
Figura 22. Bucle de histéresis desplazado al origen	33
Figura 23. Probeta de control (P1).....	35
Figura 24. Probeta seca (P2)	35
Figura 25. Probeta húmeda (P3)	35
Figura 26. Gráfica de τ máx. vs ϵ máx. de las tres muestras ensayadas.	37
Figura 27. Gráfica de Amortiguamiento vs Deformación de las tres muestras ensayadas.....	37
Figura 28. Gráfica de Presión de poros vs Deformación de las tres muestras ensayadas.....	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del suelo	17
Tabla 2. Resultados del ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.	18
Tabla 3. Resultados del ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.	18
Tabla 4. Peso compactado de cada probeta.	22
Tabla 5. Amplitudes y número de ciclos aplicados a las muestras	29
Tabla 6. Datos para el cálculo del Gsec	31

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Granulometría	42
Apéndice B. Porcentajes de suelo acumulado.	43
Apéndice C. Grafica de porcentajes de suelo que pasan por el tamiz.	44
Apéndice D. Tabla límite líquido.....	45
Apéndice E. Tabla de cálculo de contenido de agua.	46
Apéndice F. Grafica del límite líquido de suelo con regresión lineal.....	47
Apéndice G. Contenido de agua para 25 golpes según la curva ajustada en la gráfica.	48
Anexo H. Tabla de límite plástico.	49
Apéndice I. Índice de plasticidad.....	50
Apéndice J. Proctor modificado.....	51
Apéndice K. Tabla de humedades; se realizaron dos por cada punto.....	52
Apéndice L. Gráfica humedad óptima vs densidad seca del suelo.	53
Apéndice M. Secado de la muestra en el horno a 120°C (grafica 12).....	54
Apéndice N. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra de control).....	55
Apéndice O. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra con un ciclo de secado y humedecimiento)	56
Apéndice P. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra seca) .	57

Apéndice Q. Calculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra de control. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.	58
Apéndice R. Calculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra seca. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.	60
Apéndice S. Calculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra húmeda. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.	62

Resumen

Título: Evolución de las propiedades dinámicas de un suelo a diferentes condiciones de humedad*

Autores: Laura Lisbeth Pimiento Quintero
Richard Fabian Ruiz Carvajal**

Palabras Claves: Propiedades dinámicas, triaxial dinámico, humedad, suelo.

En este trabajo se analizó la evolución que tienen las propiedades dinámicas de una muestra de suelo, cuando esta se somete a diferentes estados de humedad, que pueden ser producidos por los variables cambios de clima que se presentan en Bucaramanga. Para esto, se construyó un protocolo que consistió en tres muestras de suelo cada una sometida a diferentes condiciones de humedad. La primera probeta se construyó a la humedad óptima del 11.3% a la cual llamamos de control, la segunda muestra se dejó secar al ambiente durante una semana alcanzando una humedad del 4% y finalmente a la tercera muestra se le aplicó un ciclo de secado y humedecimiento permitiendo que perdiera humedad hasta un 4.45%, luego se usó un desecador con agua destilada para que esta ganará humedad llegando hasta un 7.88%. Se realizaron tres ensayos de triaxial dinámico teniendo en cuenta los procedimientos expuestos en la norma ASTM-D3999-91, usando el método de *carga controlada*, con el fin de encontrar la respuesta del material en términos de esfuerzos ante deformaciones o desplazamientos que fueron aplicados, así mismo la prueba es de tipo consolidado no drenado, para establecer niveles de esfuerzos similares a los que estaría expuesto el suelo en el terreno, con el fin de encontrar y analizar el modulo cortante y el amortiguamiento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Abstract

Title: Evolution of the dynamic properties of a soil at different conditions of humidity*

Author: Laura Lisbeth Pimiento Quintero
Richard Fabian Ruiz Carvajal**

Keywords: Dynamic properties, dynamic triaxial,, water content, humidity, soil

In this project the evolution of the dynamic properties of a soil sample was analyzed, when it is subjected to different moisture conditions that can be produced by the variable climate changes that occur in Bucaramanga. For this, a protocol was constructed consisting of three soil samples each subjected to different humidity conditions. The first test piece was constructed at the optimal humidity of 11,3% which we call control, the second sample was left to dry for a week reaching a humidity of 4% and finally to the third sample was applied a drying cycle and humidification allowing it to lose moisture up to 4,45%, then a desiccator with distilled water was used so that it will gain humidity reaching up to 7.88%.

Three dynamic triaxial tests were carried out, taking into account the procedures outlined in the ASTM-D3999-91 standard, using the controlled load method, in order to find the response of the material in terms of deformation vs displacement efforts that were applied, likewise, the test is of a non-drained consolidated type, to establish levels of effort similar to those that would be exposed to the ground, in order to find and analyze the cutting module and the damping.

* Project of grade

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Introducción

Los suelos según su área de trabajo pueden tener diversas definiciones y usos, según lo mencionan diversos autores.

El término suelo ha tenido acepciones verdaderamente simplistas como: el suelo es, desde el punto de vista del agricultor, el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas, para un geólogo podría ser el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso, para un constructor, el suelo es el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas, para un ecólogo es uno de los componentes del ecosistema que estudia, para un químico, es el laboratorio donde se producen reacciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y finalmente para un antropólogo o un arqueólogo podrán ver el suelo como un tipo de registro del pasado. (Jaramillo, 2002, p. V)

Para otras áreas como la geotecnia, el suelo puede definirse como un conjunto de partículas, que posee diversas características según el clima, topografía, minerales, y demás factores, que posea la zona donde se encuentre. Además con ello se pueden presentar propiedades internas como lo son el ángulo de fricción, la cohesión, peso específico, módulo de corte y amortiguamiento, entre otros, que son indispensables y de sumo interés para la ingeniería civil y profesiones afines.

Este proyecto pretende mostrar los diferentes cambios internos que sufre un suelo, manifestados en su módulo de corte y amortiguamiento, al estar sometido a cambios de secado y humedecimiento, para así analizar su evolución y llegar a una conclusión al respecto.

1. Metodología

1.1 Recolección de la muestra

El material que se utilizó para este estudio se tomó de las excavaciones que se realizaron en la remodelación del edificio de Residencias Universitarias en la Universidad Industrial de Santander.



Figura 1. Sitio de la toma de la muestra.

Nota. Tomada de Google maps.



Figura 2. Sitio de la toma de la muestra.

Tabla 1.

Clasificación del suelo

Gravas (%)	0,24
Arenas (%)	45,69
Finos (%)	54,07
LL	30,52
LP	18,49
IP	12,03

La clasificación de la muestra se realizó con el sistema de clasificación unificado U.S.C.S. (Unified Soil Classification System).

A partir de los resultados se puede concluir que el suelo de estudio es una arcilla, "CL".

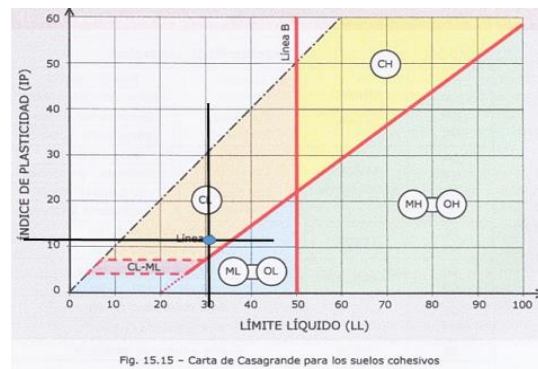


Figura 5. Carta de plasticidad casa grande.

1.2.2 Humedad óptima (W_A) y densidad seca (γ_d). La norma I.N.V.E – 142 – 13 establece los procedimientos prácticos a seguir, para determinar experimentalmente la masa unitaria seca (densidad seca) de equilibrio y la humedad correspondiente.



Figura 6. Ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.

Con una humedad inicial de la muestra almacenada de 2.62 %, se tomó 2.5 [kg] como indica la norma para realizar el ensayo.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de laboratorio nombrado anteriormente.

Tabla 2.

Resultados del ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.

PUNTO	VOLUMEN (cm ³)	HUMEDAD APARENTE (ml)	HUMEDAD REAL W	W MOLDE + MAT (g)
1	887.5	100	7.49	5941
2	887.5	150	9.31	6110
3	887.5	200	11.51	6310
4	887.5	250	12.93	6290

Tabla 3.

Resultados del ensayo I.N.V.E. – 142 – 13.

PUNTO	W MOLDE (g)	W MAT (g)	DENSIDAD HUMEDA	DENSIDAD SECA
1	4400	1541	1.736	1.615
2	4400	1710	1.927	1.763
3	4400	1910	2.152	1.930
4	4400	1890	2.130	1.886

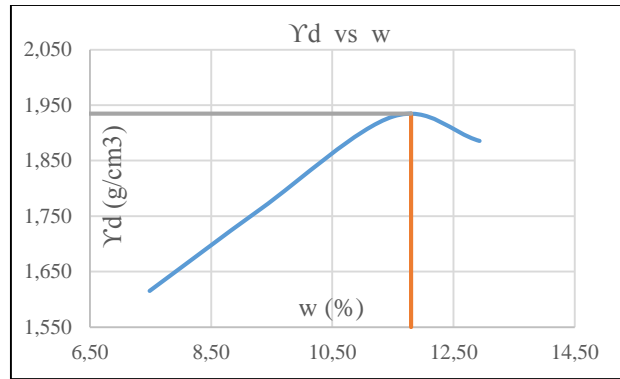


Figura 7. Gráfica % Humedad vs Densidad seca.

A partir de los resultados se puede concluir que para una muestra de 2.5 [kg] se necesitan 210 [g] de agua, para obtener la humedad óptima (W_A) de 11.8% (teórica) con una densidad seca (γ_d) de 1.935. ($\frac{g}{cm^3}$)

1.3 Re-moldeamiento de las muestras.

Para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo, es necesario realizar un ensayo triaxial dinámico, en donde se requieren probetas con una dimensión determinada de 10 cm de alto y 5 cm de diámetro.

El laboratorio de caracterización de materiales de la universidad no contaba con un molde con las dimensiones necesarias para el re-moldeamiento de la muestra, por tanto, fue necesario realizar el diseño y construcción del molde.



Figura 8. Molde.



Figura 9. Molde.

Para la compactación de las probetas en el molde de la imagen anterior, fue necesario utilizar la ecuación de energías para calcular el número de golpes que equivalen a los que indica la norma de INVIAS I.N.V.E – 142 – 13.

$$E = \frac{N. golpes * N. capas * Wm.* Hm.}{Vmolde} \quad (1)$$

Donde:

E: Energía

N. golpes: Número de golpes.

N. capas: Número de capas.

Wm.: Peso del martillo.

Hm.: Altura del matillo.

Vmolde: Volumen del molde

Según la norma **INVIAS I.N.V.E – 142 – 13**. Se tiene que:

N. golpes: 25

N. capas: 3

Wm.: 4.39 [Kg]

Hm.: 60.5 [cm]

Vmolde: 903.21 [cm^3]

Ahora teniendo en cuenta las dimensiones del nuevo molde, definido el peso del martillo y la altura de caída de este, se tiene que:

N. golpes: X

N. capas: 3

Wmart.: 2.18 [Kg]

Hmart.: 10 [cm]

Vmolde: 196.35 [cm^3]

Se planteó el N. golpes como una incógnita ya que es el valor por hallar.

Igualando las ecuaciones:

$$\frac{25 * 3 * 4.39 * 60.5}{903.21} = \frac{X * 3 * 2.18 * 10}{196.35} \quad (2)$$

Despejando la incógnita de la ecuación se tiene que:

$$X = 66.2 \approx 67 \text{ golpes}$$

Conocido el número de golpes, la cantidad de agua necesaria para obtener la humedad óptima se procede a compactar la muestra, creando 4 probetas con los pesos descritos en la Tabla 4.

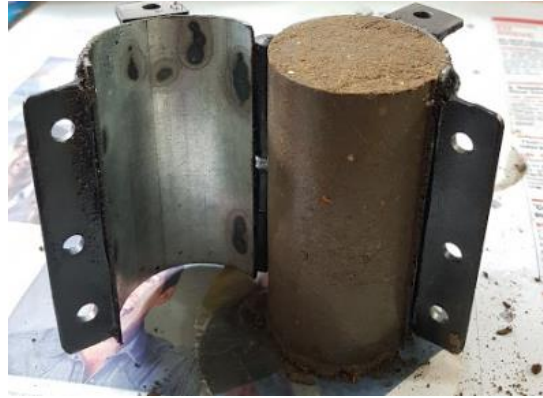


Figura 10. Probeta creada en el laboratorio.



Figura 11. Probeta creada en el laboratorio.

Tabla 4.

Peso compactado de cada probeta.

P0	469.7 (g)
P1	459.1 (g)
P2	466 (g)
P3	468 (g)

Para conocer la humedad a la cual se crearon las probetas en el laboratorio, se colocó la probeta “P0” en el horno a 120 °C y se realizó un chequeo del peso cada 5 minutos durante 3 horas. Obteniendo la siguiente curva.

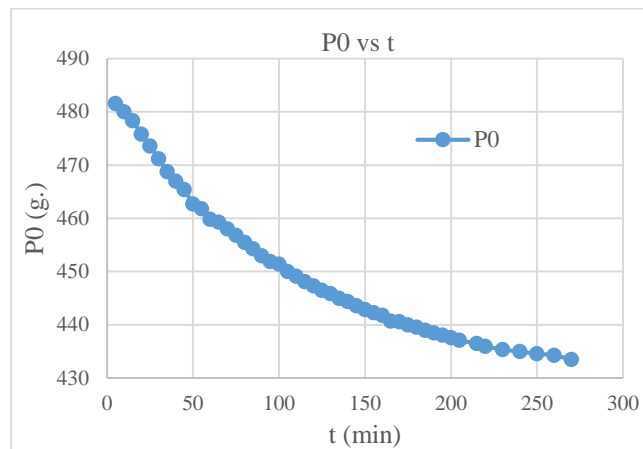


Figura 12. Gráfica Tiempo vs Peso probeta

Conociendo el peso inicial y el peso de los sólidos se calculó la humedad a la que se construyeron las probetas en el laboratorio.

Peso inicial P0: 469.7 [g]

Peso final P0: 433.5 [g]

Peso tara: 12.6 [g]

Peso inicial P0 + tara: 482.3 [g]

$$w_f = \frac{W_i - W_s}{W_s} \quad (3)$$

Donde

w_f = Humedad final.

W_i = Peso inicial.

W_s = Peso de los sólidos.

$$w_f = \frac{482.3 - 433.5}{433.5} * 100 \quad (4)$$

$$w_f = 11.3 \% \quad (5)$$

$$\% \text{ Error} = \frac{11.8 - 11.3}{11.8} * 100 = 4.2 \% \quad (6)$$

La humedad final de las probetas creadas en el laboratorio fue de 11.3%, obteniendo un error del 4.2 %.

1.4 Protocolo de secado y humecimiento.

Uno de los principales parámetros que ejerce una influencia directa en las propiedades mecánicas y dinámicas de un suelo es la humedad, pues esta altera su resistencia interna provocando una menor área de contacto entre sus partículas (Jaramillo, 2002). Esto puede ocasionar fallas locales en la masa de suelo, generando así deslizamientos, asentamientos diferenciales.

Con el objetivo de estudiar el grado de afectación de la humedad sobre las propiedades dinámicas del suelo, se hicieron tres probetas las cuales se colocaron a diferentes condiciones de humedad. Todas las probetas fueron cubiertas en papel vinilpel y almacenadas en un compartimiento a una temperatura estable para mantener la humedad de las mismas.

A continuación, se explica el estado de cada una de ellas:

Probeta 1: Esta probeta fue llamada la probeta de control (P1) ya que se ensayó con humedad óptima $w_f = 9.6 \%$ y un peso final de 451.4 g.

Probeta 2: Esta probeta (P2) se sometió a un ciclo de secado al aire durante seis días. El peso final fue 426.7 g. y la humedad 2.09 %

Probeta 3: Esta última probeta (P3) inicialmente se sometió a un ciclo de secado llegando a un peso de 438 g. y una humedad 4.45 %.

Posteriormente a un ciclo de humedecimiento con la ayuda de un desecador con agua destilada en su interior creando un ambiente húmedo, obteniendo finalmente un peso de 453 g. y una humedad final 7.88%.

La probeta estuvo en el desecador desde el 27/11/2017 hasta el 13/03/2018. Con un total de 106 días.



Figura 13. Desecador empleado para el humedecimiento de la probeta.



Figura 14. Agua destilada utilizada para el humedecimiento de la probeta.

1.5 Ensayos triaxial dinámico.

Se realizaron tres ensayos de triaxial dinámico teniendo en cuenta los procedimientos expuestos en la norma ASTM-D3999-91, usando el método de *carga controlada*, con el fin de encontrar la respuesta del material en términos de esfuerzos ante deformaciones o desplazamientos que fueron aplicados, así mismo la prueba es de tipo consolidado no drenado, para establecer niveles de esfuerzos similares a los que estaría expuesto el suelo en el terreno. A continuación, se explicará el procedimiento que se llevó a cabo para realizar los ensayos de triaxial dinámico.

1.5.1 Preparación de las muestras antes del ensayo Una vez construidas las muestras con las dimensiones correctas para el triaxial dinámico, se dio paso al revestimiento de estas con un cilindro metálico y una membrana de látex, donde se colocaron en la parte superior e inferior de la muestra dos discos porosos, con el fin de que las muestras pudieran saturarse y consolidarse, además de esto se ubicó un cabezal superior. Para mantener estos elementos juntos y seguros se utilizaron tres aros elásticos llamados O-ring, cada uno a los extremos de los especímenes, luego se montó cada espécimen en la máquina de triaxial y se conectó la manguera de contrapresión al cabezal superior.

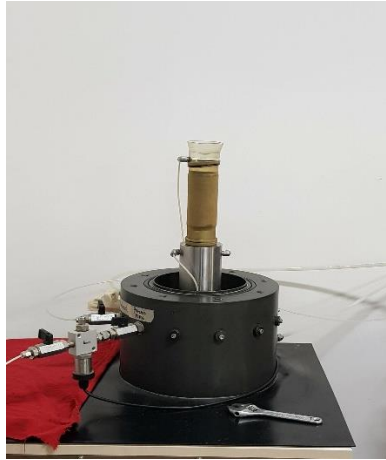


Figura 15. Muestra preparada y montada en el equipo de triaxial dinámico.

1.5.2 Saturación Antes de realizar la saturación de las probetas se preparó el equipo de triaxial subiendo el pedestal hasta que existiera un espacio mínimo entre los cabezales. Una vez listo el equipo se procedió al llenado con agua de la cámara de triaxial, realizando un lavado de la muestra para evacuar todo el aire que haya podido quedar en el interior del equipo, evitando problemas en la saturación y en el correcto funcionamiento del ensayo.

Para chequear que las probetas se saturaron correctamente, la máquina arrojó el “B value” (B-Skempton), (Cárdenas & León, 2016). “ Δu es el cambio en la presión de poros en la muestra producido por un cambio en la presión de la cámara $\Delta \sigma_3$ ” (p.143). Mostrando valores entre 0.91 y 1.0 para una saturación completa. La ecuación del B- Skempton es:

$$B - \text{Skempton} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (7)$$

1.5.3. Consolidación La etapa de consolidación se llevó a cabo mediante el aumento de la presión de cámara mientras automáticamente el controlador mantenía una contrapresión constante (a menudo igual a la presión de poros alcanzado durante el B-check saturación final), hasta que la

diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión fuese igual al esfuerzo de consolidación efectivo requerido para la prueba. (Cárdenas & León, 2016, p.152).

Es importante realizar una consolidación adecuada para obtener resultados que represente el comportamiento del suelo ante un fenómeno sísmico. Cuando la gráfica permanezca constante como se observa en la Figura 16 se dará por hecho que la consolidación se completó. Seguido a esto se procedió a aplicar la carga cíclica, a cada una de las probetas.

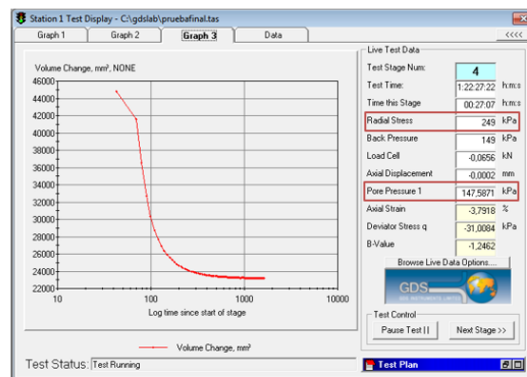


Figura 16. Gráfica de consolidación de un espécimen.

Nota. Tomado de: Cárdenas, J. & León, L. (2016) Manual didáctico para el funcionamiento del equipo triaxial dinámico marca GDS

1.5.4. Aplicación de la carga cíclica (Cárdenas & León, 2016). “Esta etapa se realiza con el objetivo de observar, analiza y comprender el comportamiento del suelo ante cargas dinámicas con formas sinusoidales de una sola frecuencia” (p.163). Para el análisis de este laboratorio se ensayaron las muestras a una frecuencia de 1 Hz que sería equivalente a la simulación de un terremoto y acción de vientos, por otra parte, se aplicaron amplitudes como se muestran en la tabla 5 con sus respectivos números de ciclos.

Tabla 5.

Amplitudes y número de ciclos aplicados a las muestras

Amplitud (mm)	No Ciclos
0,035	10
0,05	10
0,08	10
0,13	10
0,24	10
0,4	10
0,6	10

Inicialmente se planteó realizar el ensayo de triaxial dinámico a deformación controlada, pero a causa de un error en la manipulación del equipo el ensayo se llevó a cabo a carga controlada.

2. Recopilación de datos y análisis de resultados

2.1. Cálculo del módulo de corte (G) y la razón de amortiguamiento (ξ).

El movimiento provocado por un terremoto es una carga rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el descrito en la Figura 17, que corresponde a la curva de histéresis de deformación de corte (γ) y tensión de corte (τ). Las propiedades dinámicas más importantes son el módulo de corte (G) y la razón de amortiguamiento (ξ). El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la Figura 17 y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la

pendiente de la curva tensión-deformación en función de donde se evalúa está pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente (G_{tan}), secante (G_{sec}) o máximo (G_{max}).

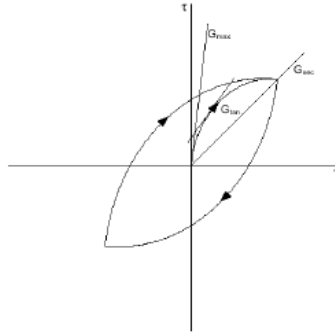


Figura 17. Curvas de histéresis de deformación de corte (γ) y tensión de corte (τ).

Nota. Tomado de: Diapositivas de la clase de Geotecnia avanzada.

En base a las deformaciones arrojadas por el ensayo se procede a hacer el análisis con el módulo de corte secante (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. En estas condiciones el comportamiento del suelo es elastoplástico.

2.1.1. Cálculo de módulo de corte secante (G_{sec}). El módulo de corte secante se calcula como el valor de la pendiente de la recta secante a la curva. Para ilustrar el método de cálculo se tomó el segundo ciclo de la primera amplitud de la muestra de control ensayada. Se toman los valores máximos y mínimos de los datos obtenidos de Shear Strain (%) y Max Shear Stress \square (kPa).

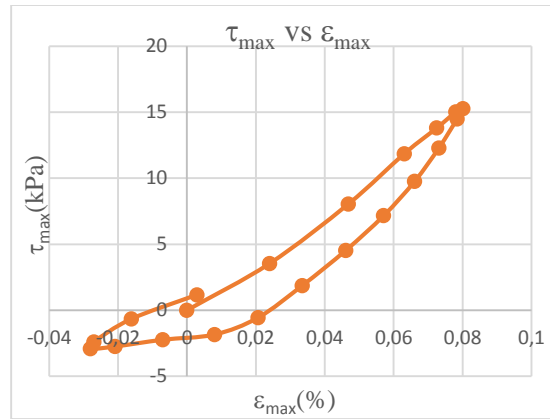


Figura 18. Curva de histéresis amplitud 1, ciclo 2 de la muestra de control

Tabla 6.

Datos para el cálculo del G_{sec}

	Mínimo		Máximo
Shear Strain (%)	Max Shear Stress t (kPa)	Shear Strain (%)	Max Shear Stress t (kPa)
-0.1136	-12.1067	-0.0055	6.0557

A continuación, se muestra la recta secante de la curva de histéresis y el cálculo de G_{sec}

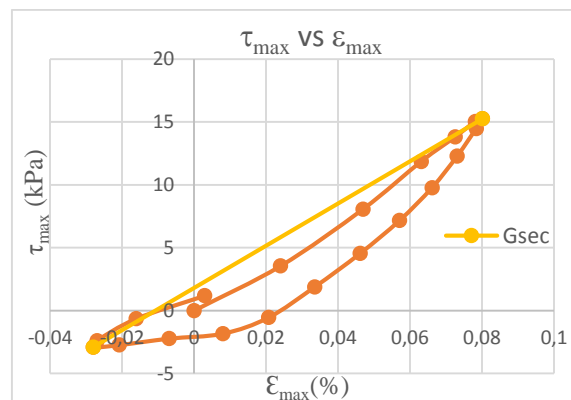


Figura 19. Curva de histéresis amplitud 1, ciclo 2 y la recta secante a la curva

$$G_{sec} = \frac{|6.0057 - (-12.1067)|}{|(-0.0055) - (-0.1136)|} = 168.014 \quad (8)$$

Este procedimiento se repitió con cada ciclo de cada amplitud.

2.1.2. Cálculo de la razón de amortiguamiento La razón de amortiguamiento expresa la capacidad del material para disipar energía y se calcula según:

$$\xi = \frac{A_T}{4 * \pi * A_L} \quad (9)$$

$$A_L = S * L \quad (10)$$

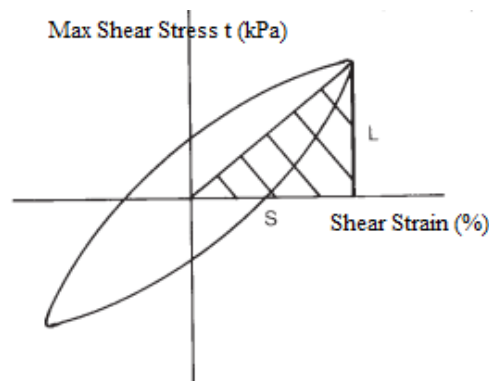


Figura 20. Curva de histéresis

Nota Tomado de: ASTM-D3999-91

Donde:

A_T : Area total del bucle de histeresis

A_L : Area de triangulo Figura 16.

Para el cálculo del área total del bucle de histéresis se construyó una poli línea con las coordenadas en AutoCAD. Para el cálculo del área se hizo una aproximación cerrando los bucles

y se utilizó la herramienta medir área. En la Figura 21 se muestra el área del bucle del ciclo 2, de la primera amplitud.

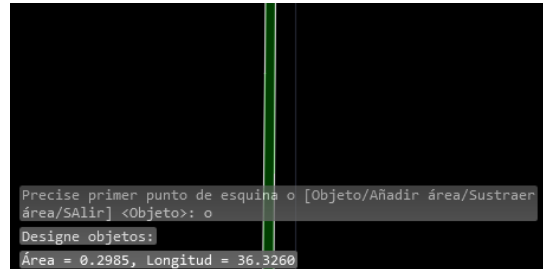


Figura 21. Cálculo del área del bucle de histéresis.

Para el ciclo 2, de la primera amplitud de la muestra de control el área total es $A_T = 0.2985$ (kPa-mm)

Para el cálculo del área del triángulo A_T se desplazó el primer punto del bucle de histéresis al origen para facilitar el cálculo de la misma.

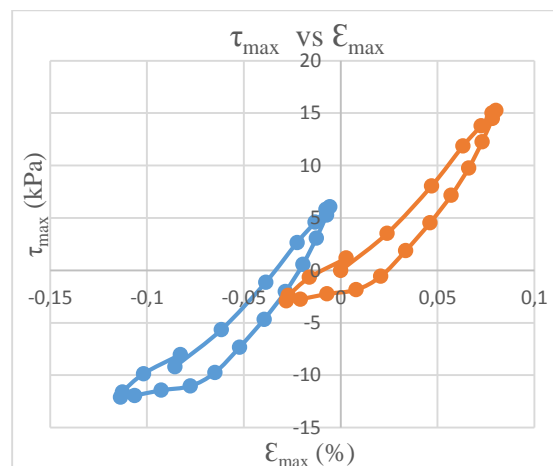


Figura 22. Bucle de histéresis desplazado al origen

Para el ciclo 2, de la primera amplitud de la muestra de control obtenemos los siguientes valores.

$$S: 0.0801 \text{ (mm)} \quad (11)$$

$$L: 15.25 \text{ (kPa)} \quad (12)$$

$$A_L = (0.0801)15.25(0.5) = 0.61 \quad (13)$$

$$A_L = 0.61 \text{ (kPa - mm)} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{0.2985}{4 * \pi * 0.61} = 0.039 \% \quad (15)$$

Este proceso se repitió con cada ciclo de cada amplitud.

2.2 Resultados.

El programa utilizado para la obtención y procesamiento de los datos fue el GDSLAB. A través de este programa, se logró monitorear la ejecución del ensayo durante cada una de las etapas desde la saturación de la muestra hasta su respectiva falla.

Una vez fallada cada muestra de suelo, se procedió a realizar los respectivos cálculos para la obtención de la gráfica del G_{sec} (kPa) vs deformación cónica (%), la razón de amortiguamiento y la presión de poros. Al realizar el análisis de los resultados se omitieron algunos datos que no proporcionaba información relevante para el análisis de estos.

A continuación se puede observar las probetas después de la falla.



Figura 23. Probeta de control (P1)



Figura 24. Probeta seca (P2)

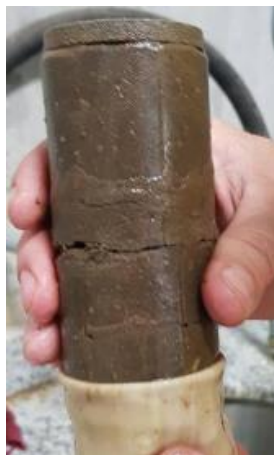


Figura 25. Probeta húmeda (P3)

2.2.1 Módulo de corte (τ) vs Deformación (ϵ máx.) En la actualidad la mayoría de las obras de tierras se construyen a la humedad óptima del material a trabajar, es por ello por lo que se busca analizar cuáles son los cambios que se generan en las propiedades dinámicas del suelo a diferentes condiciones de humedad.

En la Figura 26 se presenta la gráfica de Módulo de corte (G_{sec}) contra deformación, de las tres probetas ensayadas en el triaxial dinámico, donde se puede observar el comportamiento que tiene cada una de estas. Se observa que las tres probetas presentaron deformaciones mayores del rango de $1 * 10^{-2}$ presentando así un cambio en las propiedades del suelo en cada ciclo aplicado, así mismo es notorio ver que cuando el suelo adquiere más ciclos de carga las deformaciones aumentan y el módulo de corte comienza a degradarse progresivamente, es importante mencionar que el suelo usado posee un índice de plasticidad del 12% el cual no es muy bajo permitiendo que el módulo de corte decretezca menos.

Se puede observar que la muestra húmeda adquirió una mayor rigidez al aplicársele cambios en la humedad, sufriendo un cambio brusco en el módulo de corte en el mismo rango de deformación con referencia a la muestra de control, esto se debe a que el suelo presenta mayor presión en los poros y se encuentra más susceptible al haber estado en un proceso de secado y además de humedecimiento, contribuyendo a un estado de falla por ablandamiento cíclico. Por otra parte, la muestra seca presentó cambios más suaves en el módulo de corte, con la particularidad que se da deformaciones mayores que las deformaciones de las otras muestras. Para esta gráfica se hizo una aproximación lineal de los datos obtenidos

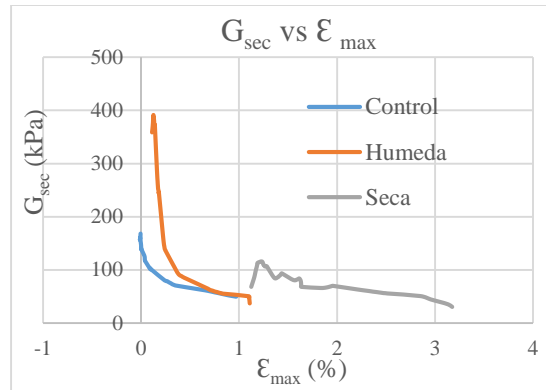


Figura 26. Gráfica de τ máx. vs ϵ máx. de las tres muestras ensayadas.

2.2.2 Amortiguamiento (ξ) vs Deformación (ϵ_{max}) En la Figura 27 se puede observar que cuando el módulo de corte es mayor, el suelo tiene una mayor capacidad de disipar energía y además de esto cuando disminuye el módulo de corte, aumenta el porcentaje de amortiguamiento, concluyendo con lo anterior que el comportamiento de estas dos propiedades es inversamente proporcional. Se debe tener en cuenta que a mayores índices de plasticidad la razón de amortiguamiento disminuye con el aumento de la deformación. Para esta gráfica se hizo una aproximación lineal de los datos obtenidos

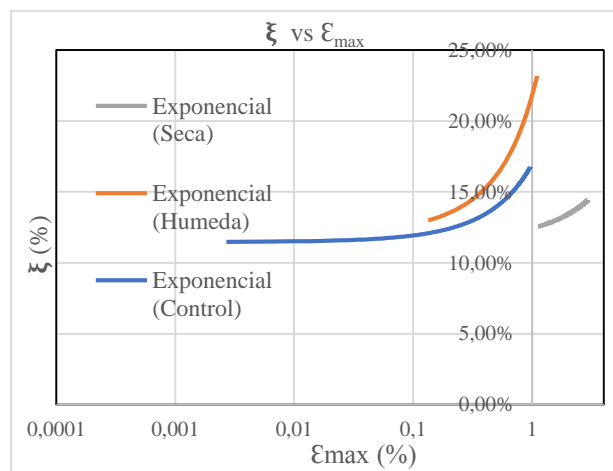


Figura 27. Gráfica de Amortiguamiento vs Deformación de las tres muestras ensayadas.

2.2.3. Presión de poros vs Tiempo Como se observa en la Figura 28, se encuentran expuestos los datos de presión de poros contra el tiempo de las tres probetas ensayadas.

Al observar la gráfica se puede evidenciar que la presión de poros para cada muestra tuvo una variación al finalizar la consolidación en el ensayo Triaxial dinámico. Esto se debió a que en las diferentes condiciones de humedad presentes en las muestras pudo ocurrir un cambio en la porosidad original que tenía el suelo, ya que para todas las probetas se mantuvieron las mismas condiciones iniciales en el ensayo. Se puede observar que a medida que transcurre el tiempo se evidencia una disminución de la presión de poros, manteniendo un mismo comportamiento entre todas las probetas. En este caso se observa que la muestra húmeda presenta unas presiones de poros negativas que se deben a que se encuentra en la franja capilar donde la mayor parte de los vacíos están llenos de agua, pero también pueden existir burbujas de aire, siendo parte de los suelos parcialmente saturados, esto puede deberse a las condiciones de secado y humedecimiento que se le aplicó a la muestra. La muestra seca como era de esperarse presentó menores valores en la presión de poros, pero sin embargo el contenido de agua es alto.

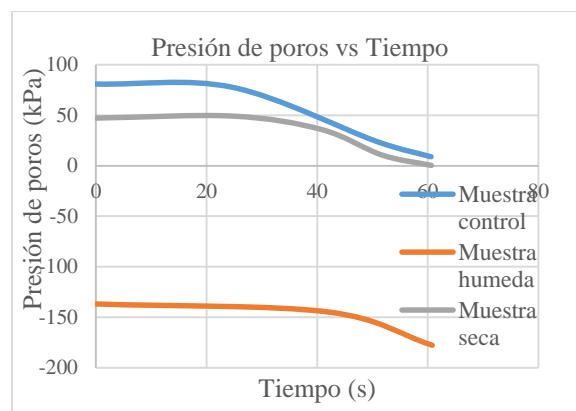


Figura 28. Gráfica de Presión de poros vs Deformación de las tres muestras ensayadas.

3. Conclusiones

Se observó que, al aplicarse un ciclo de secado y humedecimiento, el suelo adquirió un cambio representativo en el módulo cortante con respecto a la muestra de control, tomando valores como 391,51 kPa y 168 kPa respectivamente, a su vez se observa que a medida en que el suelo sufre una pérdida de humedad, este tiene la capacidad para soportar mayores deformaciones con una menor rigidez. Esto se puede apreciar en la Figura 26.

Se evidenció que a medida en que el módulo cortante disminuye, el amortiguamiento aumenta proporcionándole una mayor capacidad de disipación de energía al suelo. Concluyendo que estas propiedades tienen un comportamiento inversamente proporcional. Se puede apreciar en la Figura 27 que la muestra se sometió a un proceso de secado y humedecimiento tiene una mayor capacidad de disipación de energía con respecto a la muestra de referencia (muestra de control), mientras que en la muestra seca se evidenció un deterioro en estas propiedades, presentando una menor capacidad para disipar la energía.

El estudio realizado muestra que los cambios de humedad en el suelo bajo cargas cíclicas afectan considerablemente las propiedades dinámicas, como lo son el módulo de corte (G) y el amortiguamiento (ξ), siendo uno de los parámetros indispensable para diferentes obras en el campo de la ingeniería civil.

En este estudio el módulo de corte se ve afectado favorablemente para ambas muestras con respecto a la control. Para el amortiguamiento la muestra húmeda mejoró la capacidad de disipar energía, mientras que la muestra seca perdió capacidad con respecto a la de control.

4. Recomendaciones

Sería interesante realizar este mismo ensayo con diferentes valores de frecuencia para recrear los distintos fenómenos de la naturaleza y analizando el comportamiento de estas propiedades dinámicas

Se recomienda realizar una investigación más detallada aumentando la cantidad y el campo muestral de ciclos por espécimen, para así poder concluir qué tan nocivos pueden llegar a ser estos para las propiedades dinámicas del suelo en estudio.

Es preciso utilizar el mismo tipo de suelo para los ciclos de secado y humedecimiento dado que el objetivo principal del proyecto requirió medir las variaciones en las propiedades mecánicas, las cuales deben ser isotrópicas en las muestras de suelo utilizadas para la respectiva investigación

Referencias Bibliográficas

- ASTM-D3999-91, Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus1.
- Cárdenas, J. & León, L. (2016). Elaboración de un manual didáctico para el funcionamiento del equipo triaxial dinámico marca GDS. (Tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Chaves, J. F. (2011) Generación de presión de poros en procesos cíclicos no drenados. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- I.N.V.E. – 123 – 13. Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- I.N.V.E. – 142 – 13. Relaciones de humedad - Peso Unitario en los suelos (Ensayo modificado de compactación).
- Jaramillo, D. F. (2002) “Introducción a la ciencia del suelo”. Documento de trabajo, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>
- Ortiz, M., Gaitán, J. & Camacho, J. (2013). Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba, DYNA 81 (184).
- Santibáñez, D. H. (2006) Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. (Tesis para optar al título de ingeniero constructor), Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Silva, J. & Suarez, J. (2018). Evolución de las propiedades mecánicas del suelo en ciclos de secado de humedecimiento parte I-triaxial estático (Tesis de pregrado), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Granulometría

Resultados de la caracterización del material estudiado.

Peso de la muestra (gr) =700.4

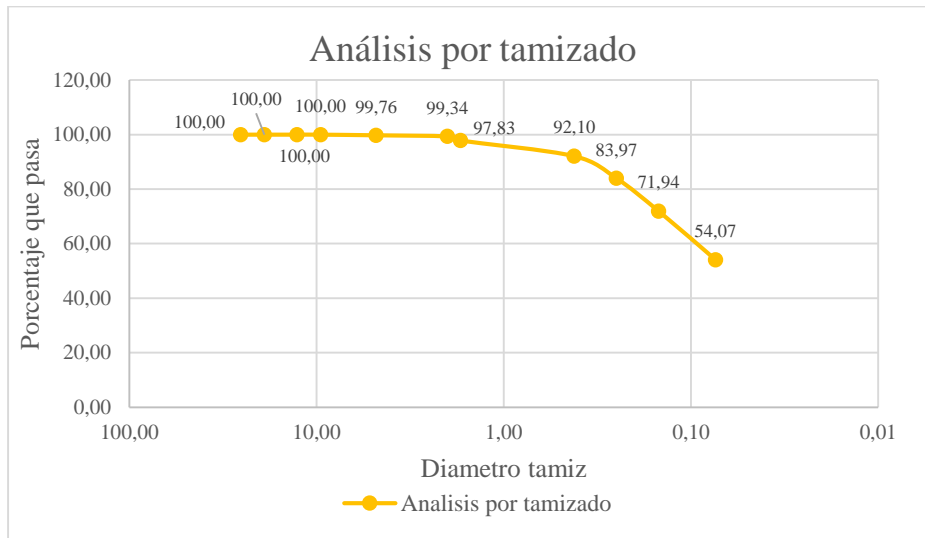
Peso de la muestra lavada por tamiz No. 200 (gr)= 329.9

Tamiz	PESO				Pasa %
	Diametro (mm)	Parcial (g)	Parcial %	Acumulado %	
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,7	0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	0	100
No. 4	4,8	1,7	0,24271845	0,242718447	99,76
No. 10	2	2,9	0,41404911	0,656767561	99,34
No. 20	1,7	10,6	1,5134209	2,170188464	97,83
No. 40	0,42	40,1	5,72529983	7,895488292	92,1
No. 60	0,25	57	8,13820674	16,03369503	83,97
No. 100	0,149	84,2	12,0217019	28,05539692	71,94
No. 200	0,074	125,2	17,8754997	45,93089663	54,07
Fondo		378,7	54,0691034	100	0

Apéndice B. Porcentajes de suelo acumulado.

GRAVAS (%)	0,24
ARENAS (%)	45,69
FINOS (%)	54,07

Apéndice C. Grafica de porcentajes de suelo que pasan por el tamiz.



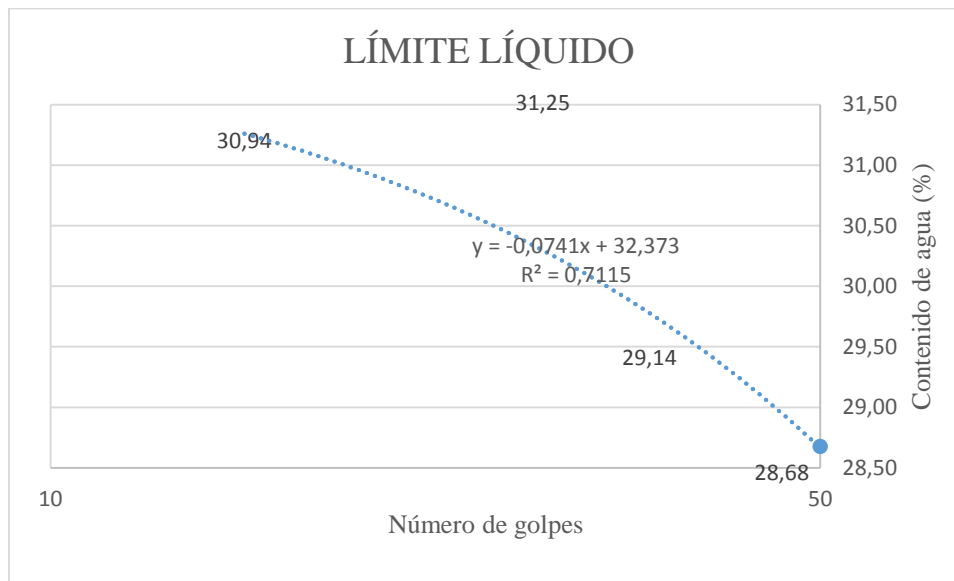
Apéndice D. Tabla límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO					
Prueba No	Capsula No.	No. Golpes	Peso capsula + suelo húmedo	Peso capsula + suelo seco	Peso de la capsula
1	1	50	23	19,1	5,5
2	2	35	25	20,6	5,5
3	3	28	22	18	5,2
4	4	15	23,5	19,2	5,3

Apéndice E. Tabla de cálculo de contenido de agua.

Prueba No	Capsula No.	No. Golpes	Peso capsula + suelo húmedo	Peso capsula + suelo húmedo	peso del agua (g)	peso de la capsula (g)	peso del suelo seco (g)	Contenido de agua (%)
1	1	50	23	19,1	3,9	5,5	13,6	28,68
2	2	35	25	20,6	4,4	5,5	15,1	29,14
3	3	28	22	18	4	5,2	12,8	31,25
4	4	15	23,5	19,2	4,3	5,3	13,9	30,94

Apéndice F. Grafica del límite líquido de suelo con regresión lineal.



Apéndice G. Contenido de agua para 25 golpes según la curva ajustada en la gráfica.

$$y = -0.0741x + 32.373$$

$$y = 0.0741 * 25 + 32.373$$

$$y = 30.52$$

Luego, el contenido de agua es del **30.52 %**, siendo este el límite líquido del suelo en estudio.

$$**LL = 30.52%**$$

Anexo H. Tabla de límite plástico.

LÍMITE PLÁSTICO								
Prueba No	Capsula No.	No. Golpes	peso capsula + suelo húmedo	peso capsula + suelo seco	peso del agua (gr)	peso de la capsula (gr)	peso del suelo seco (gr)	Contenido de agua (%)
1	5		19,9	18,1	1,8	4,8	13,3	13,5338346
2	6		20,5	17,5	3	4,7	12,8	23,4375

Haciendo los cálculos pertinentes con los datos obtenidos, el límite plástico es:

$$\frac{13.53 + 23.44}{2} = 18.49\%$$

$$LP = 18.49\%$$

Apéndice I. Índice de plasticidad.

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 30.52 - 18.49$$

$$IP = \mathbf{12.03\%}$$

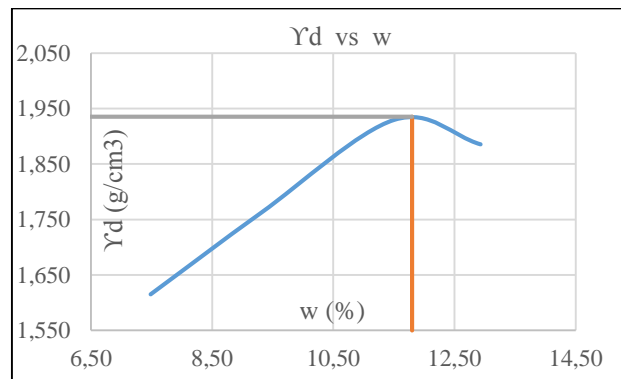
Apéndice J. Proctor modificado.

Inicialmente se tomó una muestra de suelo de 2500 gramos que fueron pasados primero por el tamiz No. 40 antes de continuar con el ensayo. Se realizaron cuatro puntos.

Punto	Volumen (cm³)	Humedad aparente (ml)	Humedad real (%)	Peso molde + material (g)	Peso mold e(g)	Peso material (g)	Densidad húmeda (g/cm³)	Densida d seca (g/cm³)
1	887,5	100	7,49	5941	4400	1541	1,736	1,615
2	887,5	150	9,31	6110	4400	1710	1,927	1,763
3	887,5	200	11,51	6310	4400	1910	2,152	1,930
4	887,5	250	12,93	6290	4400	1890	2,130	1,886

Apéndice K. Tabla de humedades; se realizaron dos por cada punto.

COPA	PESO COPA (g)	PESO COP+MAT HUM	PESO COP+MAT SEC	HUMEDAD (%)	HUMEDAD (%)
1	8,7	48,6	45,9	7,26	7,49
2	5,5	44,6	41,8	7,71	
3	4,5	48,8	45,1	9,11	9,31
4	4,5	49,4	45,5	9,51	
5	5,6	49,2	44,7	11,51	11,51
6	5,7	49,3	44,8	11,51	
7	5,5	34,4	31,1	12,89	12,93
8	5,5	32,5	29,4	12,97	

Apéndice L. Gráfica humedad óptima vs densidad seca del suelo.

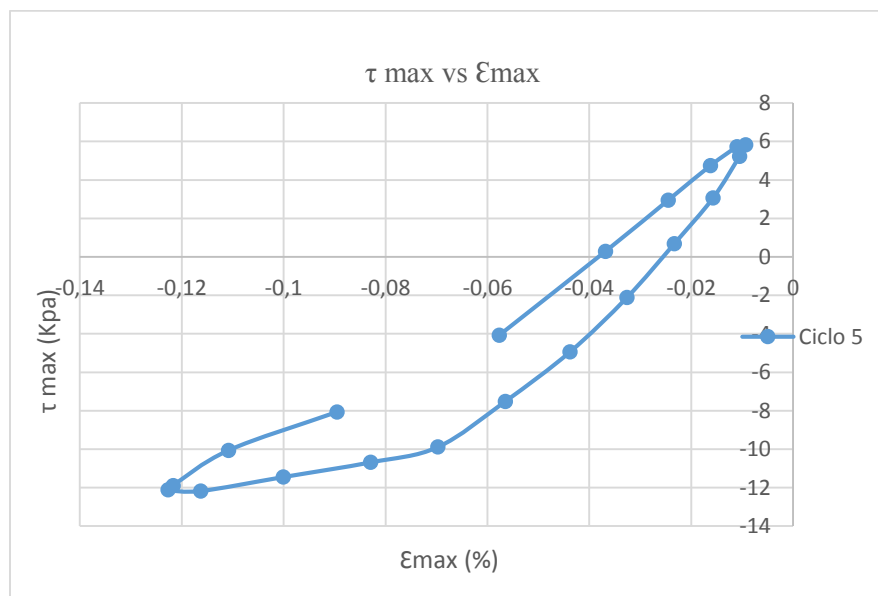
Apéndice M. Secado de la muestra en el horno a 120°C (grafica 12)

Se tomó datos cada 5 minutos durante 3 horas para obtener que tanto disminuía la humedad en la muestra compactada.

TIEMPO (min)	PESO (g)	TIEMPO (min)	PESO (g)	TIEMPO (min)	PESO (g)	TIEMPO (min)	PESO (g)	TIEMPO (min)	PESO (g)
5	481,6	55	463,8	105	450	155	442,3	205	437,1
10	480,02	60	460,8	110	449,1	160	441,8	215	436,5
15	478,3	65	459,3	115	448,1	165	440,7	220	436
20	475,8	70	458	120	447,3	170	440,6	230	435,4
25	473,6	75	456,8	125	446,5	175	440	240	435
30	471,2	80	455,5	130	445,9	180	439,6	250	434,6
35	468,8	85	454,3	135	445	185	439	260	434,3
40	467	90	453	140	444,4	190	438,5	270	433,5
45	465,4	95	451,9	145	443,6	195	438,1	-	-
50	462,3	100	454	150	442,9	200	437,6	-	-

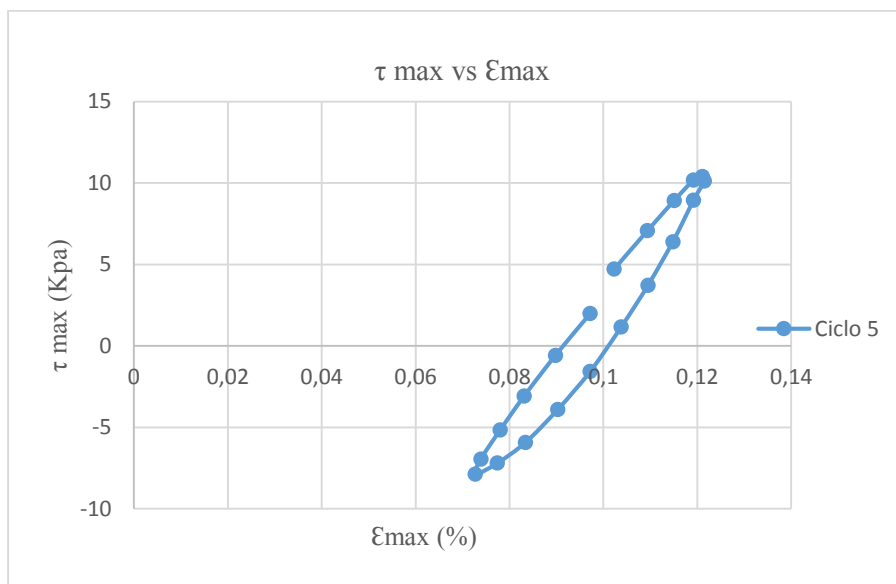
Apéndice N. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra de control)

La carga aplicada a la muestra fue de 100Kpa, se observa la curva de histéresis para la muestra de control en el ciclo 5 para la amplitud 1.



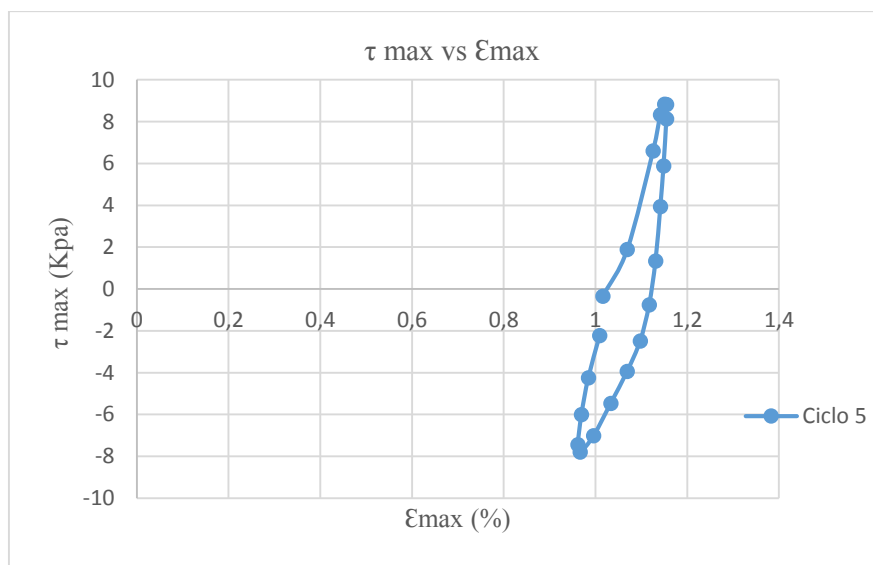
Apéndice O. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra con un ciclo de secado y humedecimiento)

La carga aplicada a la muestra fue de 100Kpa, se observa la curva de histéresis para la muestra con un ciclo de secado y humedecimiento en el ciclo 5 para la amplitud 1.



Apéndice P. Gráfica de Esfuerzo cortante vs Deformación bajo cargas cíclicas (muestra seca)

La carga aplicada a la muestra fue de 100Kpa, se observa la curva de histéresis para la muestra seca en el ciclo 5 para la amplitud 1.



Apéndice Q. Cálculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra de control. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.

Amplitud	Ciclo	Gsec	D (%)
0.035	1	170.609	
	2	168.015	0.039
	3	160.274	0.106
	4	161.116	0.101
	5	158.798	0.108
	6	157.902	0.104
	7	159.117	0.101
	8	156.181	0.103
	9	157.627	0.103
	10	156.560	0.103
0.050	1	155.204	0.122
	2	147.336	0.111
	3	144.980	0.118
	4	143.313	0.117
	5	141.011	0.113
	6	140.588	0.114
	7	141.180	0.110
	8	139.010	0.112
	9	139.927	0.107
	10	139.415	0.123
0.080	1	126.843	0.134
	2	122.633	0.121
	3	121.255	0.114
	4	119.295	0.114
	5	118.768	0.113
	6	117.682	0.112
	7	117.083	0.113
	8	116.861	0.112
	9	116.623	0.112

Amplitud	Ciclo	Gsec	D (%)
0.130	10	116.389	0.113
	1	101.235	0.148
	2	103.771	0.131
	3	103.403	0.138
	4	102.648	0.137
	5	102.388	0.136
	6	101.955	0.135
	7	101.591	0.135
	8	101.205	0.132
	9	100.695	0.128
0.240	10	100.482	0.131
	1	80.504	0.168
	2	78.977	0.144
	3	77.058	0.147
	4	75.827	0.145
	5	74.571	0.143
	6	73.339	0.143
	7	72.673	0.142
	8	71.969	0.143
	9	71.499	0.141
0.400	10	70.909	0.140
	1	64.121	0.164
	2	62.064	0.154
	3	59.997	0.151
	4	58.069	0.149
	5	56.525	0.149
	6	54.923	0.149
	7	53.477	0.148
	8	52.116	0.147
	9	51.012	0.144
10	49.959	0.143	

Apéndice R. Cálculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra seca. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.

Amplitud	Ciclo	Gsec	D
0.035	1	152081.000	0.000
	2	24.558	0.000
	3	67.920	0.129
	4	78.317	0.111
	5	86.076	0.120
	6	94.380	0.106
	7	100.975	0.105
	8	104.944	0.108
	9	109.754	0.118
	10	113.063	0.107
0.05	1	115.591	0.087
	2	109.352	0.146
	3	108.655	0.133
	4	106.424	0.135
	5	106.611	0.135
	6	106.810	0.140
	7	106.680	0.133
	8	106.385	0.134
	9	106.714	0.134
	10	106.410	0.135
0.08	1	89.853	0.141
	2	84.149	0.146
	3	84.087	0.128
	4	85.482	0.130
	5	86.591	0.132
	6	88.320	0.134
	7	89.325	0.137
	8	90.937	0.136
	9	92.034	0.138
	10	93.342	0.140
0.13	1	82.700	0.153

Amplitud	Ciclo	Gsec	D
	2	80.194	0.132
	3	81.265	0.126
	4	82.672	0.128
	5	83.721	0.135
	6	81.855	0.143
	7	79.611	0.145
	8	75.298	0.141
	9	70.408	0.140
	10	67.887	0.132
	1	65.755	0.137
	2	65.957	0.121
	3	66.589	0.123
	4	67.085	0.126
0.24	5	67.687	0.132
	6	68.251	0.134
	7	68.678	0.137
	8	69.125	0.134
	9	69.489	0.139
	10	69.813	0.138
	1	62.966	0.163
	2	61.172	0.128
	3	60.012	0.123
	4	58.915	0.127
0.4	5	58.222	0.122
	6	57.457	0.125
	7	56.833	0.122
	8	56.199	0.124
	9	56.009	0.121
	10	55.496	0.126
	1	50.505	0.154
	2	44.316	0.201
	3	39.594	0.223
0.6	4	34.959	0.246
	5	30.173	0.285
	6	12.757	0.000
	7	9.528	0.000

Apéndice S. Cálculo del módulo de corte (G_{sec}) y la razón de amortiguamiento. (ξ) para la muestra húmeda. Las filas pintadas de rojos fueron valores omitidos.

Amplitud	Ciclo	Gsec	D
0.035	1	211.258	0.000
	2	358.745	0.209
	3	364.488	0.214
	4	369.860	0.215
	5	374.451	0.207
	6	378.245	0.203
	7	386.056	0.197
	8	387.753	0.191
	9	390.119	0.185
	10	391.508	0.193
0.05	1	380.156	0.098
	2	364.633	0.195
	3	360.839	0.189
	4	361.705	0.188
	5	362.630	0.193
	6	365.814	0.187
	7	366.448	0.169
	8	369.063	0.222
	9	371.117	0.185
	10	373.614	0.174
0.08	1	284.847	0.129
	2	266.867	0.283
	3	258.993	0.297
	4	253.113	0.300
	5	250.848	0.300
	6	250.192	0.299
	7	248.469	0.296
	8	246.320	0.303
	9	244.083	0.296

Amplitud	Ciclo	Gsec	D
	10	245.964	0.304
0.13	1	165.313	0.173
	2	151.940	0.177
	3	146.137	0.183
	4	144.818	0.172
	5	140.786	0.170
	6	138.779	0.174
	7	137.935	0.171
	8	136.692	0.174
	9	135.789	0.167
	10	135.300	0.168
0.24	1	95.231	0.226
	2	90.282	0.190
	3	88.829	0.178
	4	87.799	0.174
	5	86.750	0.175
	6	86.159	0.174
	7	85.357	0.175
	8	84.968	0.178
	9	84.357	0.176
	10	84.098	0.173
0.4	1	64.347	0.229
	2	64.347	0.180
	3	62.150	0.189
	4	60.776	0.187
	5	59.233	0.180
	6	58.353	0.184
	7	57.381	0.176
	8	56.505	0.173
	9	55.744	0.175
	10	55.114	0.175
0.6	1	50.314	0.204
	2	45.810	0.208
	3	36.869	0.244
	4	23.619	0.467
	5	15.039	0.061