

Estudio del comportamiento dinámico de un suelo arenoso compactado

Yohel Fabiany Quintero Ramírez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Hebenly Celis Leguízamo

Ingeniera civil M. Sc.

Universidad Industrial De Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Dedicatoria

A mis padres por ser mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por educarme desde el amor, por ser mí mayor ejemplo y por depositar su confianza en mí y en cada uno de los sueños y metas que me he propuesto. Gracias por ser mi motor y mi mayor motivación para seguir forjando mi camino.

A mis hermanos por las enseñanzas y el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, por acompañarme y motivarme a seguir adelante aún en los momentos más difíciles.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco teórico y estado del arte	14
2.1 Ensayo triaxial dinámico	14
2.2 Módulo de cortante G	15
2.3 Módulo cortante máximo (G_{\max})	15
2.4 Curvas de degradación del módulo cortante.....	16
3. Metodología y descripción de los ensayos	16
3.1 Recolección de la muestra	17
3.2 Caracterización y clasificación del material	18
3.2.1 Ensayo granulométrico.....	18
3.2.2 Ensayo de límite líquido y límite plástico.....	18
3.2.3 Ensayo de compactación.....	19
3.3 Ensayo triaxial dinámico	20

3.3.1 Determinación de la humedad requerida y compactación de la muestra	21
3.3.2 Determinación del módulo.....	22
4. Resultados y análisis.....	24
4.1 Caracterización y clasificación del material	24
4.1.1 Granulometría del suelo.	24
4.1.2 Compactación del suelo.....	25
4.2 Triaxial dinámico.....	26
4.2.1 Módulo secante.....	27
4.2.2 Propiedades de amortiguación.....	30
5. Conclusiones.....	33
Referencias bibliográficas.....	34
Apéndices.....	36

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características del molde usado en el ensayo de compactación	19
Tabla 2. Sistema de compactación modificado.....	20
Tabla 3. Frecuencias típicas según la carga	23
Tabla 4. Amplitudes ingresadas al equipo	23
Tabla 5. Pesos retenidos en cada tamiz.....	24
Tabla 6. Porcentaje de humedad del suelo.....	25
Tabla 7. Densidad seca del suelo	26
Tabla 8. Datos muestra inalterada, ciclo 2, amplitud 0,08 mm	27
Tabla 9. Datos para la determinación del módulo secante, ciclo 2, amplitud 0,08 mm	28
Tabla 10. Datos promedio del módulo secante (G) de cada muestra.....	28
Tabla 11. Datos de amortiguación, ciclo 2, amplitud 0,08 mm	31
Tabla 12. Datos promedio de los porcentajes de amortiguación de cada muestra	31

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Curvas de degradación del módulo a lo largo de las diferentes zonas de deformación cortante cíclica	16
Figura 2. Localización de la construcción.	17
Figura 3. Muestra alterada del suelo recolectado.....	18
Figura 4. Muestra de suelo húmedo y seco, respectivamente.....	21
Figura 5. Muestra compactada (probeta).	22
Figura 6. Montaje de la probeta en el equipo triaxial dinámico.	22
Figura 7. Curva de compactación.	25
Figura 8. Curva de histéresis muestra inalterada, amplitud 0,08, ciclo 2.	26
Figura 9. Curvas de degradación del módulo secante a lo largo de diferentes deformaciones. ...	29
Figura 10. Áreas generadas por la curva de histéresis para el cálculo de amortiguación.....	30
Figura 11. Coeficientes de amortiguación a lo largo de diferentes amortiguaciones.	32

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Determinación del módulo secante G	36
Apéndice B. Determinación del coeficiente de amortiguación.....	37

Resumen

Título: Estudio del comportamiento dinámico de un suelo arenoso compactado.*

Autor: Yohel Fabiany Quintero Ramírez**

Palabras clave: curva de histéresis, módulo secante, módulo de amortiguación, triaxial dinámico.

Descripción: Santander es un departamento que presenta zonas de alta e intermedia sismicidad, debido a que en él se encuentra ubicado el denominado Nido sísmico de Bucaramanga, por lo cual, esta ciudad presenta altas probabilidades de ocurrencia de eventos sísmicos y movimientos telúricos. En el presente artículo, se estudia el comportamiento dinámico de un suelo areno-limoso ubicado en la Universidad Industrial de Santander de la ciudad de Bucaramanga, a través de pruebas triaxiales. El ensayo triaxial cíclico, se llevó a cabo a través de variaciones en las amplitudes de deformación en diferentes porcentajes de humedad de compactación del suelo, lo cual permitió determinar los valores del módulo secante (G) y las propiedades de amortiguación (coeficiente D) del mismo. Los resultados obtenidos muestran que el comportamiento dinámico del material estudiado se ve afectado por los factores anteriormente mencionados, pues al aumentar las amplitudes de deformación, el módulo secante disminuye para todas las humedades aplicadas a la muestra compactada. Así mismo, se evidenció que el módulo secante es menor en aquellas muestras cuya humedad se aparta del rango de la humedad óptima (14,3%) y para la muestra con humedad natural (muestra no alterada), el comportamiento es similar al presentado por las muestras alteradas; sin embargo, la muestra con humedad natural presenta una mayor disipación de energía (coeficiente de amortiguación) al someterla a esfuerzos o deformaciones.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: M. Sc. Hebenly Celis Leguízamo.

Abstract

Title: Study of the dynamic behavior of a compacted sandy soil.*

Author: Yohel Fabiany Quintero Ramírez**

Key words: hysteresis curve, secant modulus, damping properties, triaxial dynamic.

Description: Santander is a department that presents areas of high and intermediate seismicity, due to the fact that the so-called Bucaramanga seismic nest is located in it, therefore, this city has high probabilities of occurrence of seismic events and telluric movements. This article studies the dynamic behavior of a silty sandy soil located in the Industrial University of Santander of the city of Bucaramanga, through triaxial tests. The cyclic triaxial test was carried out through variations in the deformation amplitudes in different percentages of soil compaction humidity, which allowed to find the values of the secant modulus (G) and the damping properties (coefficient D) thereof. The results obtained show that the dynamic behavior of the studied material is affected by these factors, because when the deformation amplitudes increase, the secant modulus decreases for all the humidities applied to the compacted sample. Likewise, it was evident that the secant modulus is lower in those samples whose humidity deviates from the optimal humidity range (14.3%) and for the sample with natural humidity (unaltered sample), the behavior is similar to that presented by altered samples; however, the sample with natural humidity presents a greater dissipation of energy (damping coefficient) when subjecting it to stresses or deformations.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: M. Sc. Hebenly Celis Leguízamo.

Introducción

La continua liberación de energía que presenta la Tierra debido al contacto de sus placas tectónicas, genera gran cantidad de movimiento asociado a fenómenos sísmicos que afectan la estructura del suelo; de esta manera, se presentan deformaciones transitorias y permanentes de sus propiedades influyendo significativamente en la estabilidad de los terraplenes, estructuras de retención, pendientes naturales, entre otros (Okur & Ansal, 2007).

Colombia es un país que se encuentra ubicado en una zona de alta actividad sísmica en la Tierra, lo que ha desencadenado la formación de cordilleras, montañas, fallas geológicas y el denominado “nido sísmico de la ciudad de Bucaramanga”, por lo cual, el Servicio Geológico Colombiano ha identificado que esta ciudad, tiene altas probabilidades de movimientos telúricos y eventos sísmicos (Servicio Geológico Colombiano, 2020); de este modo, resulta importante analizar el comportamiento dinámico de los suelos destinados a edificaciones en esta zona.

Para describir las posibles fallas de un suelo y su infraestructura, existe una gran variedad de mecanismos propuestos en la literatura, basados en modelos desarrollados a partir de estudios experimentales (Shojaei & Voyiadjis, 2017); sin embargo, los resultados obtenidos a través de estos ensayos se han enmarcado en escenarios uniaxiales, limitando la aplicabilidad de sus parámetros. Así bien, se han desarrollado técnicas de pruebas triaxiales que permiten evaluar diferentes niveles de estrés en la muestra a tratar y con ello, analizar el comportamiento dinámico de la misma (Hancock & Mackenzie, 1976).

Para llevar a cabo dichas pruebas triaxiales es necesario conocer las propiedades del material, las cuales están relacionadas a su caracterización y clasificación, con el fin de obtener parámetros como el módulo cortante G (módulo de rigidez al esfuerzo cortante) y la relación de amortiguación (D) (González B. & Romo O., 2011). Estos parámetros permiten evaluar la respuesta dinámica del suelo, superpuesto ante el estado tensional inducido por un terremoto (Pastor , Blazquez, & Olalla, 1983).

Teniendo en cuenta lo anterior, mediante la realización del presente proyecto, se ejecutará el ensayo triaxial dinámico a un tipo de suelo de la ciudad de Bucaramanga (Santander) y se estimarán los parámetros de cizallamiento dinámico y de amortiguación para evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación ante posibles cargas cíclicas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo areno-limoso compactado ante cargas cíclicas.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar la muestra de suelo con el fin de obtener parámetros que permitan su clasificación.

Analizar el efecto del cambio de humedad del suelo en la relación esfuerzo-deformación.

Comparar los resultados obtenidos de las muestras alteradas con la muestra que presenta humedad natural.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Ensayo triaxial dinámico

El ensayo triaxial dinámico es un método de estudio de suelos que permite determinar las propiedades dinámicas del terreno estudiado. En este tipo de mediciones influyen una serie de

parámetros que están en función del tipo, amplitud y duración de la excitación, material ensayado, variables controladas y fenómenos a modelar (Pastor , Blazquez, & Olalla, 1983).

2.2 Módulo de cortante G

Para evaluar el comportamiento sísmico de una zona, es necesario estimar la respuesta dinámica del suelo mediante el parámetro denominado modulo cortante (G) que relaciona la tensión y la deformación de corte en un punto determinado (Ortiz Pulido, Gaitán Serrano, & Camacho Tauta, 2014). Así bien, este modelo permite generalizar la variación de la rigidez del suelo por medio de curvas de degradación teniendo en cuenta la relación de vacíos, el confinamiento y el efecto de la deformación (Ishihara, 1996).

2.3 Módulo cortante máximo (G_{máx})

En el estudio de suelos, el módulo cortante máximo o módulo de corte inicial define el comportamiento esfuerzo-deformación y permite la normalización de las curvas de degradación de este parámetro a pequeñas deformaciones (Camacho-Tauta, 2011), teniendo en cuenta factores como el confinamiento efectivo y la relación de vacíos propuestos por algunos autores presentes en la literatura (Richart, Hall, & Woods, 1970), (Kokusho, 1980), (Ishihara, 1996) y (Dos Santos & Gomes-Correia, 2001). Las diferentes aplicaciones del módulo de corte máximo permiten evaluar cómo este se reduce a medida que aumenta la deformación de corte del suelo (como se presenta en la figura 1) (Vucetic, 1994).

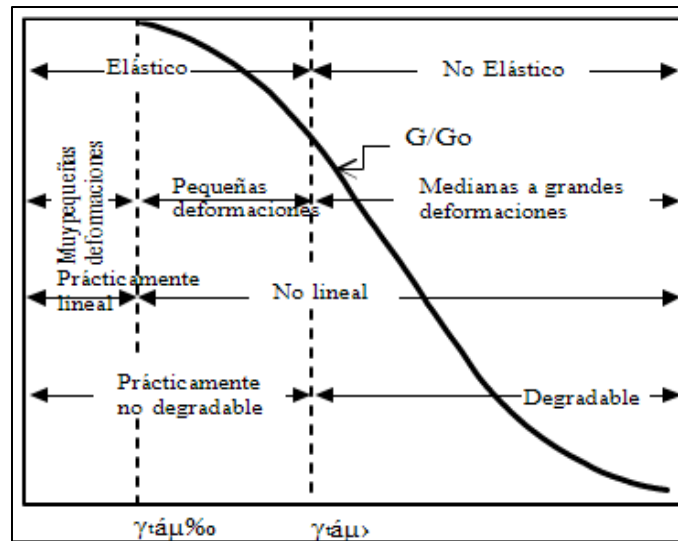


Figura 1. Curvas de degradación del módulo a lo largo de las diferentes zonas de deformación cortante cíclica

Por Vucetic, 1994.

2.4 Curvas de degradación del módulo cortante

Las curvas de degradación del módulo, permiten representar el comportamiento del suelo teniendo en cuenta el módulo secante dividido por el módulo cortante máximo en función de la deformación cortante (Camacho-Tauta, 2011); esta representación facilita la generación del módulo cortante a cualquier nivel de deformación, teniendo como dato principal el módulo cortante inicial (Vucetic, 1994).

3. Metodología y descripción de los ensayos

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se llevaron a cabo las etapas que se presentan a continuación.

3.1 Recolección de la muestra

El material fue recolectado el año 2018, en un sitio, en la Universidad Industrial de Santander en la ciudad de Bucaramanga (ver figura 2).

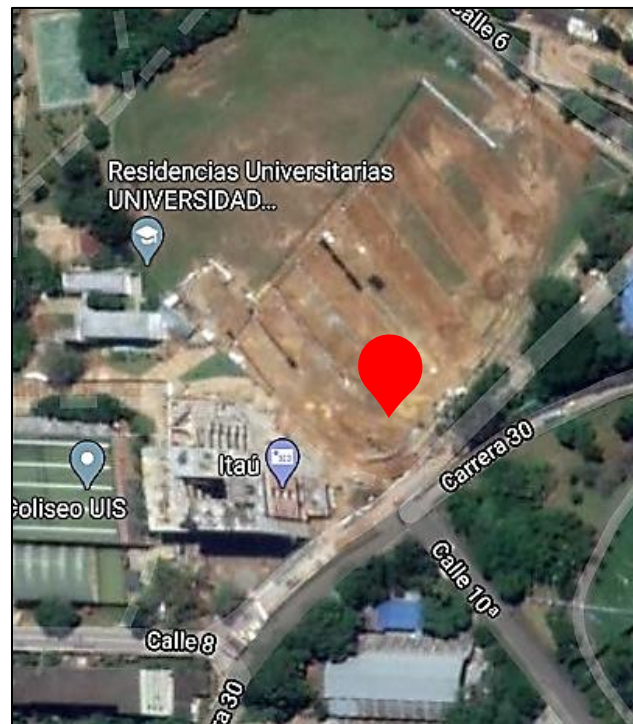


Figura 2. *Localización de la construcción.* Por Google maps (2020) recuperado de <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Industrial+de+Santander/@7.140017,-73.1175269,281m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e68156d1c0c8689:0x873d16bf1221d419!8m2!3d7.140089!4d-73.1205516>

Se recolectó a 5 m de profundidad con ayuda de herramientas de excavación y posteriormente se tomaron tres muestras inalteradas las cuales se almacenaron en un refrigerador con el fin de conservar las propiedades presentes en el suelo; por otra parte, se tomó una muestra de suelo alterado que fue almacenado en un recipiente destapado. Las muestras recolectadas se observan en la figura 3.



Figura 3. Muestra alterada del suelo recolectado.

3.2 Caracterización y clasificación del material

La muestra recolectada se sometió a algunos ensayos según lo establecido en normas y especificaciones INVIAS 2013.

3.2.1 Ensayo granulométrico. El análisis granulométrico se realizó con base en la norma I.N.V.E-123 que permite determinar cuantitativamente la distribución de las partículas de un suelo (Instituto Nacional de Vías, 2013). Se tomó una cantidad de la muestra alterada y se registró su peso, el cual correspondió a 899,5 g. Se lavó sobre el tamiz número 200 y se secó en el horno a 110° C, luego se realizó el tamizado, lo que permitió identificar los granos retenidos.

3.2.2 Ensayo de límite líquido y límite plástico. Para realizar el ensayo de límite líquido y límite plástico, se tomó como referencia las normas I.N.V.E 125 y I.N.V.E 126, respectivamente.

De este modo, se procedió a realizar inicialmente el ensayo de límite plástico, teniendo en cuenta que el límite líquido es dependiente del primero. En este sentido, se tomaron aproximadamente 30

g de la muestra alterada previamente secada al aire y pasada por el tamiz N° 40. Dicha masa se humedeció hasta tener una consistencia suave y uniforme que permitiera formar rollos con un diámetro de 3 mm; sin embargo, el material no se dejó moldear impidiendo el desarrollo del ensayo, motivo por el cual fue imposible hallar los límites propuestos, por lo que la muestra adquiere la característica de “NP”.

3.2.3 Ensayo de compactación. Este ensayo se realizó siguiendo los parámetros establecidos en la norma I.N.V.E-142 que permite determinar las relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (Instituto Nacional de Vías, 2013). De este modo, se tomó una masa de la muestra alterada y se pasó por el tamiz N° 4, seguidamente se agregó una cantidad arbitraria de agua y se mezcló hasta alcanzar una textura homogénea. Posteriormente, se alistó un molde de 10,10 cm de diámetro y 11,50 cm de altura, el cual se dividió en 5 capas, según lo indicado en la norma y con los parámetros presentados en la tabla 1 a continuación.

Tabla 1.

Características del molde usado en el ensayo de compactación.

Tipo de ensayo	Modificado
Número de capas	5
Número de golpes por capa	25
Diámetro molde (cm)	10,10
Altura molde (cm)	11,50
Volumen molde (cm³)	921,4

Se procedió a verter la muestra anteriormente preparada y a dar 25 golpes en cada capa con un martillo de 44,48 N que cayó libremente desde una altura aproximada de 45,72 cm, lo cual produjo una energía de compactación de 2700 KN-m/m³. Se registró el peso del conjunto molde-suelo compactado, se extrajo una pequeña muestra del suelo compactado, se pesó y se llevó al horno con

el fin de calcular la humedad adquirida. Este procedimiento se repitió con cuatro muestras más, a las cuales se les fue aumentando la cantidad de agua a agregar.

3.3 Ensayo triaxial dinámico

A partir de este ensayo, se determinó el módulo secante y las propiedades de amortiguación del suelo, teniendo en cuenta la norma internacional ASTM-D3999 (ASTM Standard D3999, 91). Es necesario ajustar un nuevo sistema de compactación basado en nuevo molde y un nuevo martillo, que mantenga la energía establecida en el ensayo de compactación realizado previamente; por este motivo, se modificaron las variables presentadas en la siguiente tabla.

Tabla 2.
Sistema de compactación modificado.

Variable	Inicial	Final
N° capas	5	5
N° golpes/capa	25	8
Peso martillo (N)	44,48	24,47
Volumen muestra (m ³)	921,4E-6	196,35E-6
Altura de caída (m)	0,46	0,56
Energía (KN-m/m ³)	2700	2700

La variable correspondiente a número de golpes por capa se determinó a partir de la ecuación que se presenta a continuación.

$$E = \frac{N * N' * W * H}{V} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

N: número de capas

N': número de golpes/capa

W: peso martillo

H: altura de caída

V: volumen de la muestra

E: energía

Para este caso, se elaboraron cinco (5) probetas con la muestra alterada. Una vez establecido el nuevo método de compactación para la creación de dichas probetas requeridas para el ensayo, se llevaron a cabo los siguientes pasos.

3.3.1 Determinación de la humedad requerida y compactación de la muestra. Se pesó una pequeña muestra de suelo para cada probeta y posteriormente se llevó a la etapa de secado en el horno con el fin de determinar la humedad natural de la muestra (ecuación 1). A partir de este dato, se estableció la cantidad de agua a agregar para alcanzar la humedad deseada que permitió la compactación de la muestra y su posterior montaje en el equipo de ensayo (Ver figuras 4 y 5).



Figura 4. Muestra de suelo húmedo y seco, respectivamente.



Figura 5. Muestra compactada (probeta).

3.3.2 Determinación del módulo. La probeta anteriormente elaborada, fue llevada al equipo triaxial (figura 6) y sometida a saturación hasta alcanzar un porcentaje del 95% y después de esto, se consolidó a una presión de 50 kPa. Posteriormente, se procedió a la etapa de aplicación de la carga cíclica con una frecuencia constante de 1 Hz, la cual es considerada como la frecuencia típica de un terremoto según la norma ASTM-D3999 (ASTM Standard D3999, 91), como se puede observar en la tabla 3.



Figura 6. Montaje de la probeta en el equipo triaxial dinámico.

Tabla 3.

Frecuencias típicas según la carga.

Tipo de carga	Frecuencia típica (Hz)
Acción de las olas	0,1
Acción del viento	0,1-1
Terremoto	1
Tránsito ferroviario	>1
Maquinaria vibrante	=<20

Se aplicó dicha frecuencia a diferentes amplitudes que variaron de 0,035 mm hasta 2 mm, con 40 ciclos para cada una de estas amplitudes (ver tabla 4), como está estipulado en la norma ya mencionada. Esto se realizó a cinco probetas alteradas y una inalterada.

Tabla 4.

Amplitudes ingresadas al equipo.

Amplitud (mm)	N° Ciclos
0,035	40
0,05	40
0,08	40
0,13	40
0,24	40
0,4	40
0,6	40
1	40
2	40

Los datos anteriormente tabulados, permitieron la obtención de los resultados correspondientes a módulo secante y las propiedades de amortiguación del suelo a través de las curvas de histéresis presentadas por el software GDSLAB con el cual trabaja el equipo.

4. Resultados y análisis

4.1 Caracterización y clasificación del material

4.1.1 Granulometría del suelo. A partir del ensayo granulométrico se obtuvo el porcentaje de partículas retenidas en cada tamiz, que se presentan en la tabla 5.

Tabla 5.
Pesos retenidos en cada tamiz.

Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	% Retenido	% Pasa
2"	50,8	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	7,64	0,85	99,15
3/8"	9,52	5,65	0,63	98,52
No 4	4,75	14,20	1,58	96,94
10	2	9,80	1,09	95,85
20	0,84	8,7	0,97	94,89
40	0,42	19,2	2,13	92,75
60	0,25	24,1	2,68	90,07
100	0,149	331,2	36,82	53,25
200	0,074	157,2	17,48	35,78
Fondo		321,80	35,78	
Total		899,5	100,00	

A partir de estos datos, se observa que la muestra tiene 3,1 % de gravas, 61,2 % de arenas y 35,7% de finos.

Estos resultados indican que el suelo muestreado tiene la característica de arena "S", ya que más del 50% de la muestra gruesa pasó el tamiz N° 4 en el ensayo granulométrico; por otra parte, los ensayos de límite líquido y límite plástico permitieron dar la característica de NP al suelo, como

ya se mencionó anteriormente, es por esto que se trata de una arena limosa “SM” según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

4.1.2 Compactación del suelo. A través del ensayo de compactación se establecieron los valores óptimos de humedad y peso específico del suelo, los cuales fueron de 14,3% y 1,88 g/cm³, respectivamente tal como se observa en la figura 7.

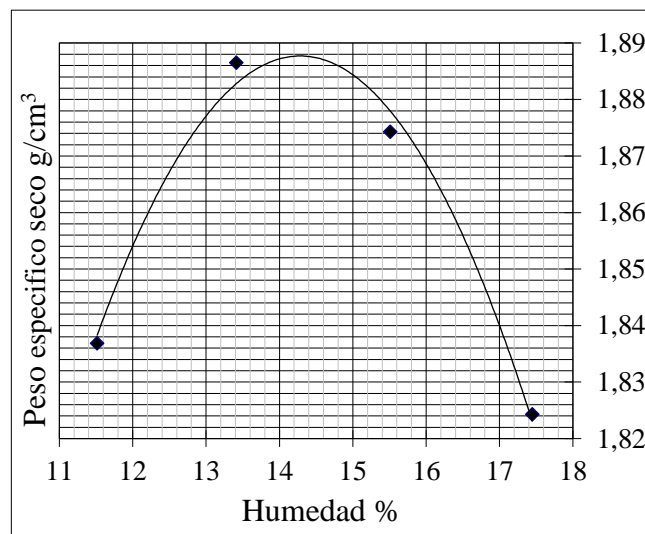


Figura 7. Curva de compactación.

Dicha figura representa la gráfica realizada a partir de los datos obtenidos durante el ensayo de compactación y relaciona los diferentes porcentajes de humedad correspondientes a los pesos específicos secos de cinco muestras del suelo. Los datos se consignan en las tablas 6 y 7.

Tabla 6.
Porcentaje de humedad del suelo.

Muestra	1		2		3		4	
Peso agua (g)	3,6	3,7	4,5	4,3	4,9	5,4	5,3	5,5
Peso suelo seco (g)	31,6	31,8	33,0	32,6	31,7	34,7	30,8	31,1
Humedad (%)	11,4	11,6	13,6	13,2	15,5	15,6	17,2	17,7
Promedio humedad (%)	11,51		13,41		15,51		17,45	

Tabla 7.

Densidad seca del suelo.

Muestra	1	2	3	4
Peso suelo húmedo (g)	1875	1952	1985	1981
Densidad húmeda (g/cm ³)	2,048	2,14	2,17	2,143
Densidad seca (g/cm ³)	1,84	1,89	1,87	1,82

4.2 Triaxial dinámico

Teniendo en cuenta la metodología propuesta y finalizado el ensayo, se exportaron los resultados del software GDSLAB al software Microsoft Office Excel, en el que se realizaron los cálculos para la obtención de gráficas de curvas de histéresis, módulo secante y amortiguación. Para los fines propuestos, se escogieron los datos más relevantes arrojados por el software GDSLAB con los cuales se procedió a graficar las curvas de histéresis (deformación Vs. cortante máximo). Este procedimiento se repitió para cada uno de los 40 ciclos de las nueve amplitudes mencionadas en la tabla 4 y para todas las muestras a fallar.

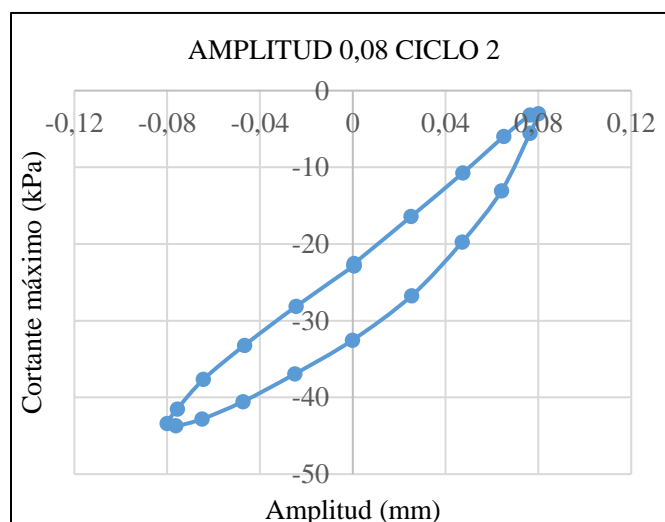


Figura 8. Curva de histéresis muestra inalterada, amplitud 0,08, ciclo 2.

En este caso se tomó, como ejemplo arbitrario la curva que se presenta en la figura 8, la cual se graficó a partir de los datos que se consignan en la tabla a continuación.

Tabla 8.

Datos muestra inalterada, ciclo 2, amplitud 0,08 mm.

Etapa	Tiempo (s)	Deformación (%)	Cortante máximo (KPa)
9	1	0,0005	-22,5541
9	1,05	0,0251	-16,4179
9	1,1	0,0474	-10,7398
9	1,15	0,065	-5,9988
9	1,2	0,0763	-3,199
9	1,25	0,08	-3,0086
9	1,3	0,0763	-5,5834
9	1,35	0,0641	-13,0614
9	1,4	0,0471	-19,747
9	1,45	0,0253	-26,7477
9	1,5	-0,0002	-32,5407
9	1,55	-0,025	-36,935
9	1,6	-0,0474	-40,5472
9	1,65	-0,065	-42,8132
9	1,7	-0,0763	-43,7094
9	1,75	-0,0801	-43,3845
9	1,8	-0,0757	-41,5191
9	1,85	-0,0644	-37,6616
9	1,9	-0,0467	-33,2061
9	1,95	-0,0244	-28,119
9	2	0,0005	-22,8413

A partir de cada una de las curvas de histéresis, se obtuvieron los valores necesarios para determinar el módulo secante y las propiedades de amortiguación, como se explica a continuación.

4.2.1 Módulo secante. Con los puntos graficados en la curva de histéresis, se determinaron los cortantes máximos y mínimos con sus respectivas unidades de deformación y con estos se

determinó la pendiente que equivale al módulo secante (ver apéndice A). Los resultados para este caso (figura 8), se muestran en la tabla 9.

Tabla 9.

Datos para la determinación del módulo secante, ciclo 2, amplitud 0,08 mm.

	Deformación (%)	Cortante (kPa)
Máx.	0,08	-3,0086
Mín.	-0,0763	-43,7094
G secante	26040,18 kPa	

Es posible observar que el módulo secante hallado para el ciclo 2 con amplitud 0,08 mm es de 26040,18 kPa; sin embargo, este valor no corresponde al módulo secante total de esta amplitud para la muestra inalterada, debido a que este dato proviene del promedio de los 40 ciclos aplicados a esta.

Los resultados promedio del módulo secante se presentan en la tabla 10, en la cual las muestras de 1-5 corresponden a las probetas alteradas cuyas humedades son 12,5%, 16,5%, 14,5%, 15,5% y 13,5%, respectivamente y la última muestra es la inalterada (20,1%). Estas humedades se tomaron aleatoriamente a partir de la curva de compactación (figura 7), teniendo en cuenta la humedad óptima como punto de referencia.

Tabla 10.

Datos promedio del módulo secante (G) de cada muestra.

Humedad (%)	Densidad (g/cm ³)	Resultados de G (MPa)								
		Amplitud (mm)								
		0,035	0,05	0,08	0,13	0,24	0,4	0,6	1	2
12,5	1,888	7,1	5,9	4,9	4,0	3,0	2,2	1,5	0,8	0,3
13,5	1,910	64,9	54,3	40,7	27,9	16,2	9,8	6,3	3,7	1,8
14,5	1,894	47,1	35,3	24,1	14,1	7,8	4,6	3,1	2,0	1,2
15,5	1,895	52,9	43,1	30,5	19,4	10,3	5,9	3,7	2,1	1,3
16,5	1,893	25,2	21,0	15,8	11,0	6,4	3,9	2,4	1,6	1,1
20,1	1,939	43,4	32,2	21,7	13,3	6,9	3,6	2,1	1,2	0,7

Estos datos permitieron realizar las gráficas correspondientes a la figura 9, que representan el comportamiento del suelo ante ciertas deformaciones (amplitudes), es por esto que se aprecia que a medida que se aumenta la amplitud de deformación, el suelo disminuye su resistencia en términos de módulo secante.

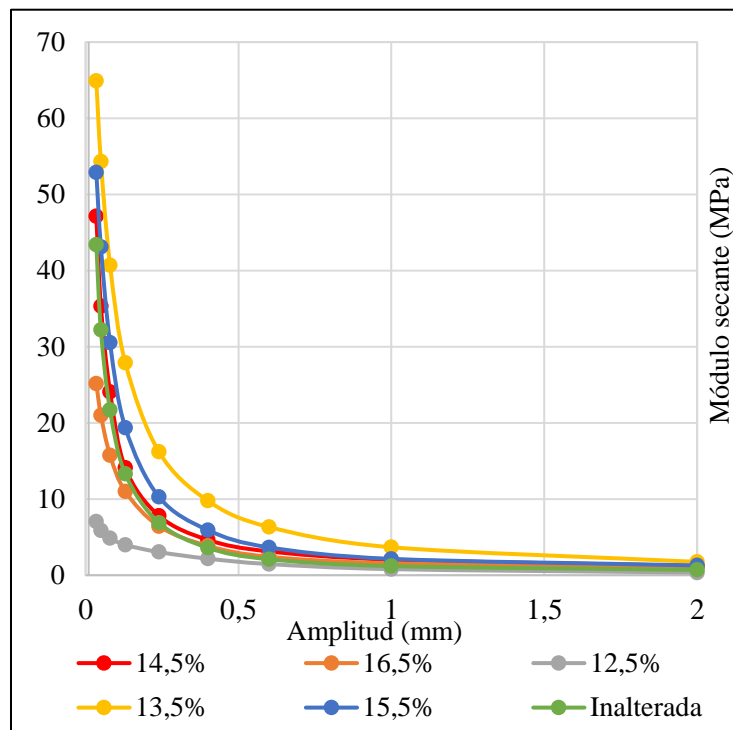


Figura 9. Curvas de degradación del módulo secante a lo largo de diferentes deformaciones.

Al comparar la muestra que tiene la humedad óptima con las demás muestras, es posible notar que esta presenta un mayor módulo ante eventos de cargas cíclicas.

De otra manera, la muestra inalterada, presenta un módulo secante cercano al obtenido para las muestras alteradas e incluso presenta mayor módulo que algunas de estas; lo cual indica que, al modificar ciertos parámetros como humedad, el suelo muestreado podría llegar a presentar fallas al ser sometido a diferentes deformaciones.

4.2.2 Propiedades de amortiguación. Es importante determinar el porcentaje de amortiguación, ya que este indica la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía.

Por esto, se determinó el coeficiente de amortiguación (D) haciendo uso de la ecuación 2 que se encuentra en la norma ASTM-D3999.

$$D = \frac{A_L}{4\pi A_T} * 100\% \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde A_L , corresponde al área que comprende el espacio que abarca la curva de histéresis y A_T es el área del triángulo que se forma con el centro de los ejes, el punto máximo en Y y su respectivo valor de X (ASTM Standard D3999, 91), tal como se muestra en la figura 10.

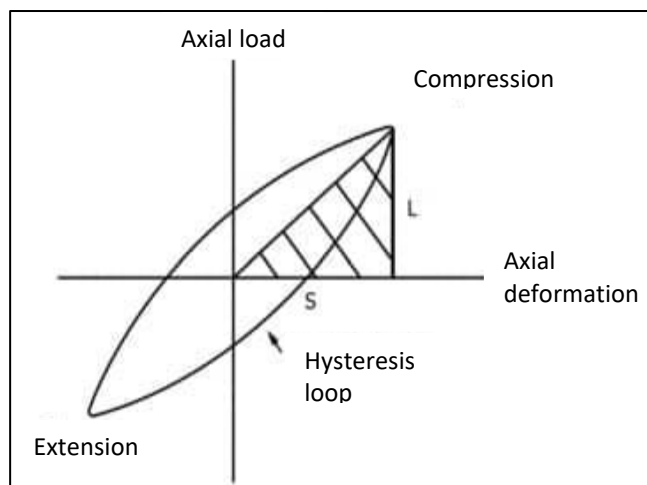


Figura 10. Áreas generadas por la curva de histéresis para el cálculo de amortiguación. Recuperado de (ASTM Standard D3999, 91)

De este modo:

$$A_T = 0,5 * S * L$$

Los resultados determinados para la curva de histéresis que se ha tomado como ejemplo, se muestran en la tabla 11 (ver procedimiento en el apéndice B).

Tabla 11.
Datos de amortiguación, ciclo 2, amplitud 0,08 mm.

Área A_L (kN*m)	1,4142
Damping (%)	13,83

Podemos observar que el coeficiente de amortiguación que se determinó para el ciclo 2 con amplitud 0,08 mm es de 13,83 %; sin embargo, este valor no corresponde al porcentaje de amortiguación total de esta amplitud para la muestra inalterada, debido a que este dato proviene del promedio de los 40 ciclos aplicados a esta. Los resultados promedio del coeficiente de amortiguación se presentan en la tabla 12 y estos datos permitieron realizar la gráfica de la figura 11.

Tabla 12.
Datos promedio de los porcentajes de amortiguación de cada muestra.

		Resultados de % de amortiguación D								
Humedad (%)	Densidad (g/cm³)	Amplitud (mm)								
		0,035	0,05	0,08	0,13	0,24	0,4	0,6	1	2
12,5	1,888	5,0	5,0	5,1	5,7	6,3	5,8	5,3	4,9	5,0
13,5	1,910	6,1	6,9	8,6	10,2	10,9	10,1	9,3	8,5	8,1
14,5	1,894	6,8	8,2	10,4	12,1	12,1	10,8	9,7	9,0	8,5
15,5	1,895	3,7	5,1	8,3	10,9	11,4	10,2	9,2	8,6	8,3
16,5	1,893	10,6	10,7	12,2	12,6	11,8	10,2	9,3	8,7	8,5
20,1	1,939	11,8	13,0	15,1	16,4	16,7	16,4	16,5	16,7	16,6

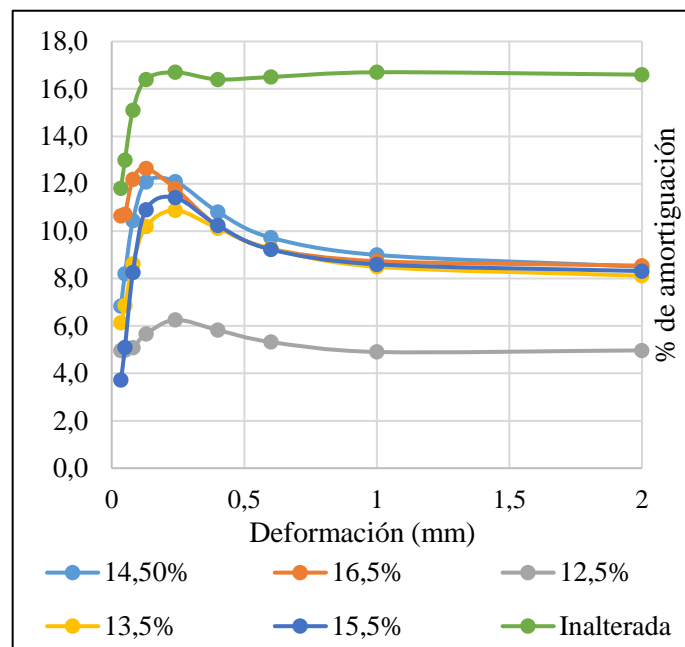


Figura 11. Coeficientes de amortiguación a lo largo de diferentes amortiguaciones.

Las curvas que se presentan en la figura 11, representan el comportamiento del suelo, en términos de amortiguación, ante diferentes amplitudes de deformación. Es posible apreciar que el porcentaje de amortiguación aumenta al aumentar la amplitud y con esto se genera la disminución en el módulo secante, por lo cual, el suelo disipa mayor energía.

En este sentido, se evidencia que las condiciones iniciales del suelo (muestra inalterada), permiten una mayor disipación de la energía recibida al someterse a esfuerzos dinámicos, en comparación con las muestras que fueron alteradas.

5. Conclusiones

El análisis granulométrico y los ensayos de límite líquido, límite plástico y de compactación, permitieron determinar que el suelo estudiado corresponde a una “Arena limosa SM” que tiene 3,1% de gravas, 61,2% de arenas y 35,7% de finos, con límites NP, densidad seca de 1,888 g/cm³ y una humedad óptima de 14,3%.

Al realizar el ensayo triaxial dinámico se caracterizó la rigidez del suelo a partir del efecto de 40 ciclos aplicados a las muestras con cinco humedades diferentes con el fin de analizar su comportamiento dinámico, el cual se ve afectado por factores como variaciones en la deformación y en las humedades aplicadas a la muestra. De este modo, se evidenció que, al aumentar las amplitudes de deformación, el módulo secante disminuye para todas las humedades aplicadas (muestras alteradas y muestra inalterada).

Al someter el suelo ante cargas cíclicas a diferentes porcentajes de humedad, fue posible determinar que las muestras que presentan menor módulo secante, son aquellas cuyas humedades se apartan del rango de la humedad óptima.

El valor del módulo secante obtenido de la muestra inalterada, se encuentra cercana a los valores hallados del módulo de la muestra con humedad óptima, lo cual indica que el comportamiento dinámico del suelo, en ambos casos, es similar.

Referencias bibliográficas

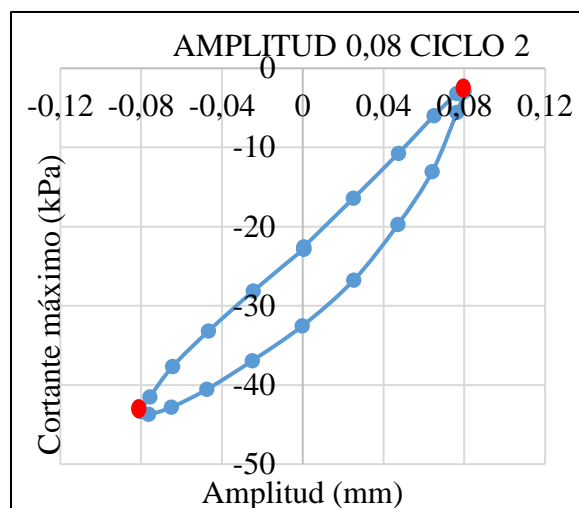
- ASTM Standard D3999. (91). Test Method for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus.
- Camacho Tauta, J. (2012). Hacia la obtención de un modelo unificado de curvas de reducción del módulo cortante. *Propuesta proyecto de investigación, Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Geotecnia.*
- Camacho-Tauta, J. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non- conventional dynamic testing methods.* Universidade Técnica de Lisboa.
- Dos Santos, J., & Gomes-Correia, A. (2001). Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain an unique strain-dependent shear modulus curve for soil. En *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* Istanbul.
- González B. , C. M., & Romo O., M. P. (2011). Estimación de propiedades dinámicas de arcillas. *SciELO Analytics.*
- Hancock, J., & Mackenzie, C. (1976). On the mechanisms of ductile failure in highstrength. *J. Mech. Phys. Solids.*, 147-160.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Norma de ensayo para materiales de carretera.* Bogotá.
- Ishihara, I. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics.* Oxford: Oxford University.
- Kokusho, T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. En *Soils and Foundations* (págs. 45-60).
- Okur, D., & Ansal, A. (2007). Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 843.

- Ortiz Pulido, M., Gaitán Serrano, J., & Camacho Tauta, J. (2014). Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba . *DYNA*, 78.
- Pastor , M., Blazquez, R., & Olalla, C. (1983). Caracterización en laboratorio de las propiedades dinámicas de los suelos. *REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS*, 427-428.
- Richart, F., Hall, J., & Woods, R. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y cambio Climático*. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rsismico>
- Shojaei, A., & Voyiadjis, G. (2017). Dynamic fracture mechanics in rocks with application to drilling and perforation. En *Porous Rock Fracture Mechanics* (pág. 233). L.A: ELSEVIER.
- Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strain in soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 89-107.

Apéndices

Apéndice A. Determinación del módulo secante G

El valor del módulo secante G para cada amplitud de deformación aplicada a cada uno de los ciclos, corresponde a la pendiente de su respectiva curva de histéresis. De este modo, se determinó dicho parámetro a partir de la ecuación que se presenta a continuación, la cual va multiplicada por el 100%, teniendo en cuenta que estas son las unidades de los coeficientes de deformación.



Al reemplazar los puntos máximos y mínimos identificados en la gráfica, se obtuvo el siguiente resultado.

$$G_{secante} = \frac{cortante\ Mín - cortante\ Máx}{Def.\ Mín - Def.\ Máx} * 100$$

$$G_{secante} = \frac{-43,7094 - (-3,0086)}{-0,0763 - 0,08} * 100$$

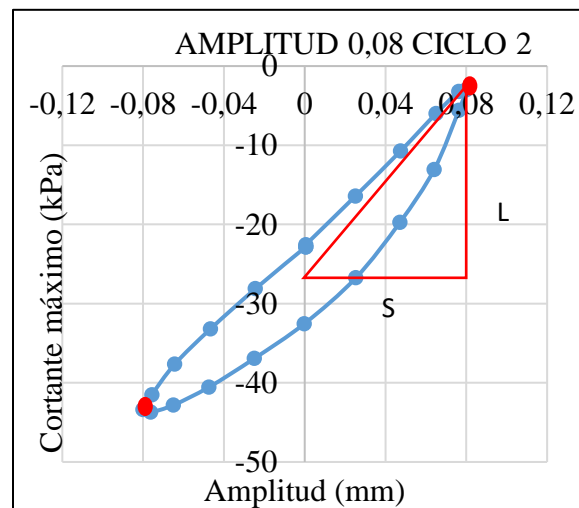
$$G_{secante} = 26040,18\ kPa$$

Apéndice B. Determinación del coeficiente de amortiguación.

Para determinar el módulo de amortiguación se hizo uso de la siguiente ecuación.

$$D=100*AL/4\pi AT$$

De este modo, fue necesario determinar el valor de AT (área generada por el triángulo) como se presenta a continuación.



$$S = Def. Máx. \quad S = 0,08$$

$$L = (Cortante máx. - cortante mín.) * 0,5$$

$$L = (-3,0086 + 43,7094) * 0,05$$

$$L = 20,3504$$

$$A_T = 0,5 * 0,08 * 20,3504$$

$$A_T = 0,814016$$

Seguidamente se determinó el área formada por la curva de histéresis (AL) por el método del trapecio, lo cual dio como resultado

$$A_L = 1,4142$$

Finalmente, se halló el porcentaje de amortiguación así:

$$D = \frac{1,4142}{4 * \pi * 0,814016}$$

$$D = 13,83\%$$