



INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS NATURALES Y RECONSTITUIDAS A TRAVÉS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

# INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS RECONSTITUIDAS, A TRAVÉS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

SEBASTIÁN RODRÍGUEZ VALDERRAMA

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director: Jorge Arturo Pineda Jaimes, Ingeniero Civil PhD  
Par Académico: José Andrés Cruz Wilches, Ingeniero Civil MSc

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2017



## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	7
3.2 JUSTIFICACIÓN .....	9
4. MARCO TEÓRICO .....	10
5. ANTECEDENTES.....	14
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
6.1 MATERIALES .....	19
6.2 METODOLOGÍA.....	20
7. DESARROLLO .....	21
7.1. OBTENCIÓN DE MUESTRAS.....	21
7.1.1. LABORES DE RECONOCIMIENTO DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	21
8. ENSAYOS DE SACRIFICIO.....	21
8.1. ENSAYO DE SACRIFICIO 1 .....	22
8.2. ENSAYO DE SACRIFICIO 2 .....	26
8.3. ENSAYO DE SACRIFICIO 3 .....	28
9. PROPIEDADES INTRÍNSECAS .....	29
9.1. ÍNDICE DE VACÍOS .....	30
10. MUESTRA RECONSTITUIDA.....	32
10.1. RESULTADOS UNIVERSIDAD NACIONAL.....	33
10.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA RECONSTITUIDA A 50 KPA. ....	36
10.2.1. HUMEDAD Y LÍMITES.....	36
10.2.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	38
10.2.3. CONSOLIDACIONES DE LA MUESTRA RECONSTITUIDA .....	39
10.3. RESULTADOS COLUMNA RESONANTE .....	48
CONCLUSIONES .....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	68



## GLOSARIO

*Consolidómetro:* El consolidómetro o edómetro es un aparato que permite determinar el asentamiento, conocer la compresibilidad de un suelo cuando es sometido a diversas cargas, el estado de la muestra puede ser natural saturado o para el caso tal de una muestra reconstituida.

*Densidad ( $\rho$ ):* En geotecnia, es la masa del suelo en un estado dado sobre su volumen.

*Diámetro ( $D$ ):* Es el tamaño en milímetros de las partículas de suelo. Dependen de un sistema de clasificación usado.

*Dispersión:* La dispersión se presenta cuando las fuerzas entre dos partículas arcillosas son repulsivas, es decir, se repelen.

*Estructura:* Se define estructura a la forma y agrupación de partículas individuales de arena, limos, arcillas o mixtos (limo-arcilla, arena-limosa, arena-arcillosa, entre otros), llevando consigo unas características químicas que difieren según la zona.

*Floculación:* La floculación se presenta cuando las fuerzas de atracción entre dos partículas arcillosas hacen que se junten y entren en contacto.

*Frecuencia ( $f$ ):* Se define frecuencia al número de ciclos en una unidad de tiempo.

*Frecuencia de Resonancia ( $f_r$ ):* Es una frecuencia, en donde los niveles de vibración son máximos y son generados por un nivel de esfuerzo que se colocó sobre el sistema (ensayo).

*Litósfera:* Es la capa superficial sólida de la tierra, que conforma los continentes e islas y donde se cubre la corteza oceánica producida por debajo de la corteza continental.

*Módulo de Corte ( $G$ ):* Es una constante que está ligada al esfuerzo y la deformación durante la acción de esfuerzos cortantes, basada de la teoría elástica.

*Ondas:* Son producidas por el movimiento de las placas tectónicas, maquinaria de construcción, automóviles, una explosión, etc., dando como resultado es un cambio en la tensión que perturba de forma temporal el suelo, generando daños en estructuras civiles.



*Proximeter:* El proxímetro o sensor de proximidad hace referencia al transductor que detecta las señales que rodean o se encuentran cerca del sensor.

*Reconstitución:* Es un procedimiento, en el cual se toma una muestra de suelo, se caracteriza, se disgrega, se seca en horno, se tritura, luego se coloca agua a para conformar un lodo y finalmente se coloca en un consolidómetro, el cual aplicara cargas para volver a generar la muestra con condiciones diferentes a las naturales.

*Torque:* El torque es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar o girar alguna cosa sobre un eje.

*Transformador diferencial de variación lineal (Linear Variable Differential Transformer, LVDT):* Es un tipo de transformador eléctrico que se utiliza para medir los cambios de volumen en condiciones edométricas con relación a la altura.



## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo pretende determinar las propiedades dinámicas de los suelos arcillosos en muestras reconstituidas de tres sectores de la vía Siberia-Tenjo en la Sabana de Bogotá, Colombia. Estas propiedades son para estudiar la respuesta a pequeñas deformaciones, los cambios de rigidez y el comportamiento volumétrico, teniendo como principal variable, las variaciones del contenido de agua en el suelo.

Como lo mencionan Rojas y Rivera (2014), algunos factores que comprometen la estabilidad de la estructura de la vía son: la subrasante de la vía, que puede presentar cambios volumétricos por el fenómeno de la desecación producido por las especies arbóreas, los cambios climáticos y los microclimas propios de la zona, además, la incidencia de estos factores podría afectar sustancialmente la rigidez de éstos materiales que son de tipo arcilloso, algo que busca responder.

El desarrollo de la investigación, se realizará mediante la extracción de muestras de suelo por sondeo, la determinación de propiedades naturales y posteriormente realizar una reconstitución de material para finalmente ser utilizado en el ensayo de columna resonante, con el cual, se determinarán las propiedades dinámicas de los suelos reconstituidos mediante procesos de sedimentación en laboratorio, de igual manera, se generarán variaciones durante el proceso de armado de las muestras para realizar cambios en el grado de saturación y el contenido de agua de las muestras.

Los resultados dinámicos, las propiedades de retención de humedad y el análisis comparativo de los mismos. Esta investigación pretenderán ser de gran aporte para un trabajo alterno que lleve a la construcción de un modelo de análisis numérico enfocado al estudio de estructuras de pavimentos por medio de geosintéticos, como parte de un proyecto que actualmente se ejecuta en la Facultad de Ingeniería Civil y el programa de Maestría en Infraestructura Vial de la Universidad Santo Tomás.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades dinámicas mediante el ensayo de columna resonante de arcillas reconstituidas para diferentes contenidos de agua.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar variaciones controladas del contenido de agua en las muestras reconstituidas.
- Analizar los resultados de contenido de saturación.
- Observar la variación que presenta la estructura de la muestra reconstituida con respecto a la muestra natural.
- Establecer las propiedades de rigidez en muestras naturales y reconstituidas a partir de los resultados de ensayos de columna resonante.



### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La zona de estudio localizada al occidente de la Sabana de Bogotá, en la vía Siberia-Tenjo, tiene una diversidad de problemáticas e inconvenientes que han afectado el estado de tránsito de la vía. Esto genera un riesgo de seguridad para las personas que la utilizan; dichos inconvenientes, se presentan por la vegetación, fallas geotécnicas generadas en la zona, entre otros.

Esta vía presenta cambios desde su última reparación realizada en 2012, según El Tiempo, como se muestra en la Figura 1. La vía que para el año 2015 ya no se encuentra en óptimas condiciones de tránsito, como se puede observar en la Figura 2, sufrió de diversos inconvenientes atribuidos a daños supuestamente estructurales, sin embargo y entrando en detalle, la vía presenta hundimientos y fracturas que se dan por fallos del suelo en donde se soporta la estructura de pavimento.

Para el 2016, la capa asfáltica que cubría este sector de la vía fue levantada debido a la fractura de la capa que se fisuraba en diferentes puntos de la vía, llegando a formar huecos de alto riesgo para el servicio vial; en la figura 3, se puede observar que la vía está sin capa asfáltica y que la base granular se deteriora con mayor facilidad causado por el tránsito. Es evidente que la reparación realizada en el 2012 no cumplió con los requisitos mínimos de duración estipulados por la normativa colombiana.

Teniendo en cuenta, que el suelo de la zona, está compuesto por arcillas de origen lacustre con comportamientos expansivos, la vía se ve afectada por fenómenos como el de la desecación arbórea, que infringen un daño por deformaciones, que a largo plazo se pueden visualizar al transitar por la vía. No solo es la desecación el único inconveniente, el clima bimodal y a los cambios fuera de la media del balance climático de los últimos 10 años que presenta la Sabana de Bogotá, se ve reflejado visualmente a lo largo de la vía, causando daños severos en la vía como lo muestra Rueda y Pineda, 2011 y Davison y Martinez, 2016.



**Figura 1**



Fuente. Extraída de Google maps (2016)

Detalle de la vía Siberia-Tenjo a 2,1 km, 2012; sector en buen estado, después de la reparación.

**Figura 2**



Fuente. Extraída de Google maps (2016)

Detalle de la vía Siberia-Tenjo a 2,1 km, 2015; sector con daños: fracturas, fisuras, hundimientos, tres años después de la reparación.

**Figura 3**



Fuente. Extraída de Google maps (2016)

Detalle de la vía Siberia-Tenjo a 2,1 km, 2016; sector sin capa asfáltica: con hundimientos y ahuellamientos cuatro años después de la reparación.

La vía se encuentra en una zona de cambios de temperatura que fluctúa entre -3 y 25 °C con una media de 13,3 °C. Además, en los meses de enero, junio, julio, agosto, diciembre y en ocasiones febrero son los que menores precipitaciones presentan mientras que en los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre son los meses donde se presentan mayores precipitaciones, como lo mencionan Davison y Martínez, 2016.



El elemento principal de este proyecto, estará basado en el ensayo de columna resonante, cuyo fin es hallar las propiedades dinámicas del suelo, por medio de parámetros como la velocidad de onda de corte y el módulo de cizallamiento teniendo en cuenta las propiedades de retención de suelo-agua. En este sentido, se obtendrán resultados para conocer las características de rigidez de las muestras a pequeñas deformaciones, como lo mencionan Hoyos et al. (2011).

Con los resultados de estos ensayos, y para un posterior trabajo investigativo, se podrán desarrollar modelos y diseños de estructuras de pavimentos para la vía, en un programa especializado que permita exponer diversos comportamientos dinámicos y posibilitará evaluarla con materiales y espesores diferentes, como solución a la problemática generada.

### 3.2 JUSTIFICACIÓN

En el occidente de la Sabana de Bogotá, se han presentado fallas en la infraestructura vial, disminuyendo así, el nivel de servicio de las vías. Es por esto que se pretende, mediante la realización de ensayos en laboratorio, comprender las características de suelos arcillosos mediante la determinación de las propiedades dinámicas. Además, obtener resultados que sean propios para el desarrollo y construcción de un futuro modelo, que permita proponer una estructura y un diseño de pavimento para que se adapte al contexto de la zona.

La intervención de la vía se realizó en el año 2012 dejando la carpeta en buen estado, como se ilustra en la Figura 2. Para el 2016 la vía no ha sido intervenida en su totalidad, es decir, que las intervenciones que se fueron realizando durante los años posteriores a la reparación se han realizado procesos de parcheo y bacheo, para la reparación superficial en hundimientos o fisuras en sectores del pavimento que pueden comprometer el nivel de servicio que se suministra, sin embargo, en la Figura 3 se puede observar con claridad que la vía no se encuentra en condiciones de operación ni funcionamiento, ya que fue fresada y dejada sin su carpeta asfáltica.

Al realizar el ensayo de columna resonante con *proximeter* como ensayo principal, que permiten conocer las características de rigidez del suelo a pequeñas deformaciones en función del contenido de agua. Finalmente, el aspecto más relevante se verá reflejado en el uso de muestras reconstituidas, siendo una de las principales modificaciones al desarrollar dicho ensayo, además, se realizara la comparación con los resultados en muestras naturales y realizándoles cambios en el contenido de agua.



Estos resultados permitirán complementar una base de datos que se está realizando dentro de la Universidad Santo Tomás, entre el pregrado y posgrado de la facultad de ingeniería civil, sobre esta zona de estudio, para que en un futuro se realicen modelos de análisis numéricos de la vía, que permitirán realizar diseños estructurales de los pavimentos, manuales constructivos y la oportunidad de implementar materiales alternativos como solución a las problemáticas que presenta la vía en la actualidad.

#### 4. MARCO TEÓRICO

Este capítulo ira describiendo las temáticas para desarrollar en este proyecto, se tendrán en cuenta varios factores que serán determinantes para complementar el ensayo principal: columna resonante; entorno al ensayo mencionado, uno de los cambios que se van a realizar es el de usar una muestra reconstituida variando el grado de saturación y al variar la saturación, la muestra podría presentar cambios volumétricos.

La reestructuración de las partículas o reconstitución en una muestra, es una configuración en la parte física (tangible) del material, no cambia químicamente ningún componente que contenga, permitiendo distribuir las partículas de suelos por los componentes de floculación o dispersión, según Lull (2009).

- En la floculación las partículas se sedimentan con mayor facilidad, puesto que las partículas se agrupan y caen por peso propio.
- En la dispersión las partículas se repelen haciendo que se mantengan en suspensión y evitando la sedimentación.

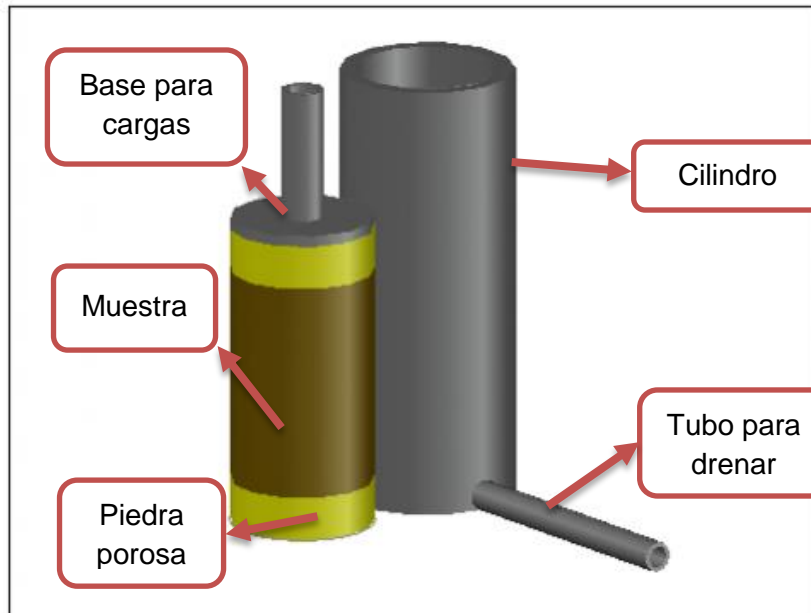
Además de la reorganización dentro del cilindro, las partículas recibirán una carga axial que permitirá consolidar la muestra (como se muestra en la Figura 4), sin cambiarle sus características iniciales, dejándola en condiciones aptas para un posterior uso en ensayos mecánicos o dinámicos, según (Meijer, G.J., 2012).

Para realizar la reconstitución, se requiere de la extracción en campo, por medio de un tubo *Shellby*, de una muestra de suelo que es llevada a laboratorio. Allí, es sacada del tubo la muestra para realizar la caracterización del material, teniendo la muestra en este estado natural se realiza el ensayo dinámico de columna resonante para obtener respuestas del suelo natural; una vez finalizado el ensayo se seca la muestra en horno, se pulveriza y se disgrega hasta obtener partículas finas; luego se agrega agua y se mezcla en una batidora hasta que se homogenice la muestra, para formar un lodo que debe tener una humedad de 1,5 el límite líquido (Burland, 1990) y se deposita en un cilindro con una carga axial superficial pequeña; después se va



aumentando la carga a medida que la muestra se va sedimentando y va drenando agua, como mencionan, Mašín et al. (2001).

**Figura 4** Modelo preliminar de un consolidómetro

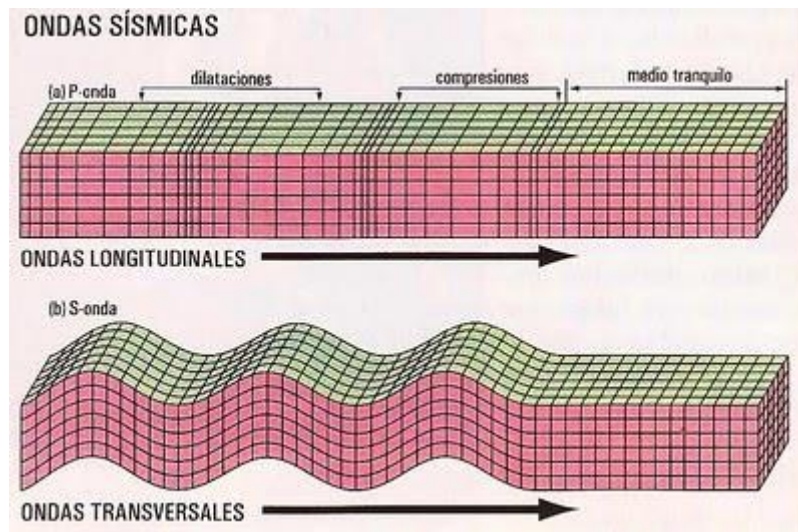


En el ensayo de columna resonante, se determinarán diferentes frecuencias, en las cuales se define la amplitud y la frecuencia de la carga; al ajustar la frecuencia se forzaría a la muestra a entrar en resonancia y como resultado se obtendrán las propiedades dinámicas que tenga el suelo.

Existen dos tipos de ondas sísmicas: las longitudinales ( $p$ ) y las transversales ( $s$ ), ver Figura 7. Las ondas longitudinales son las que oscilan en la misma dirección de la propagación onda; las transversales presentan un movimiento transversal a la dirección de propagación de la onda, como lo menciona Hewitt, 2007.



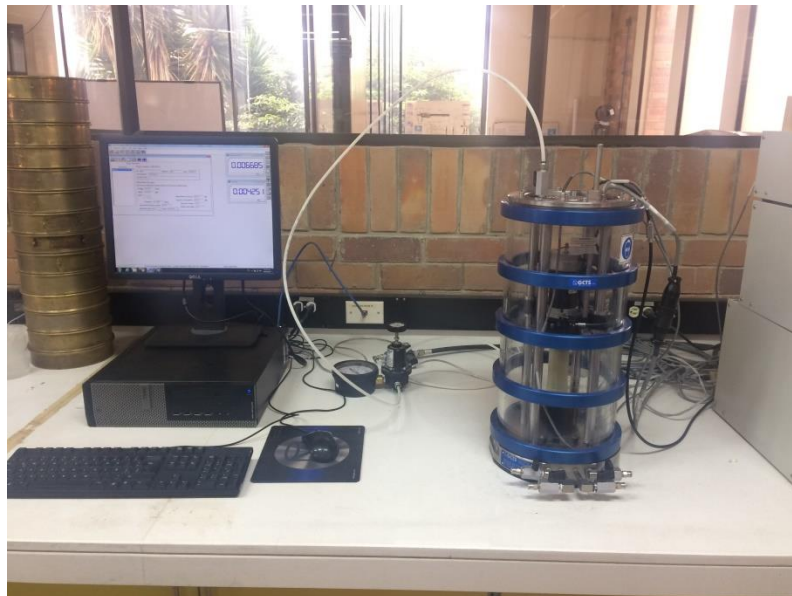
**Figura 5 Ondas sísmicas**



Fuente. Guerrero, 2011.

El ensayo de columna resonante es una prueba que se realiza con el fin de obtener la variación de la rigidez con el nivel de deformación (Figura 9), con parámetros de medición como el amortiguamiento (*Damping*,  $\zeta$ ) y el módulo de corte ( $G$ ), las propiedades dinámicas generadas se obtienen a partir de la frecuencia vibratoria a la que se fuerza la muestra cilíndrica siguiendo la norma D4015-15 de la Sociedad Americana de ensayos (ASTM, *American Society for Testing and Materials*).

**Figura 6 Columna Resonante**



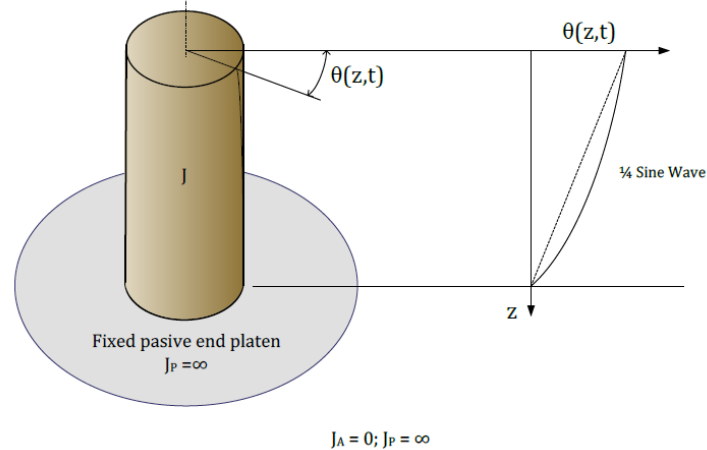
➤ **Columna resonante tipo fijo-libre (RC)**

Un sistema fijo-libre para columna resonante (Figura 8), se realiza cuando la muestra es sometida a una torsión, a razón, que uno de los



extremos de la muestra se encuentra fija sobre el pedestal mientras que el otro extremo permanece libre; teniendo en cuenta estas consideraciones en el extremo libre, se generará un esfuerzo torsional que será accionado por un mecanismo que producirá la rotación, así como lo menciona Camacho (2011).

**Figura 7** Montaje fijo-libre de columna resonante



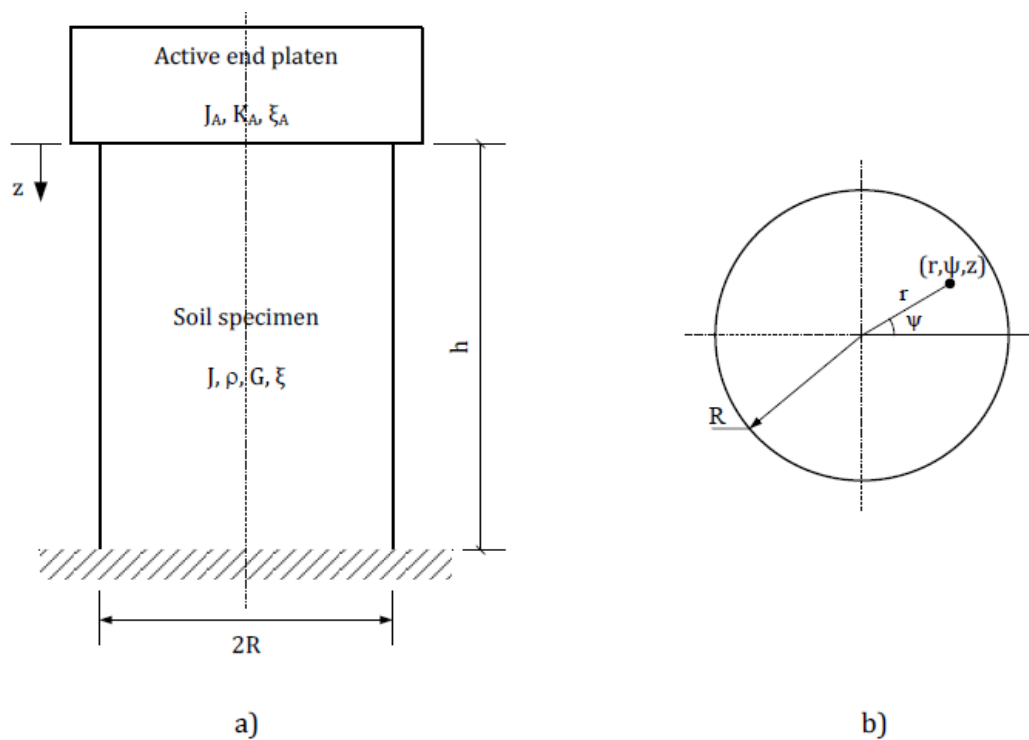
Fuente: Murcia & Perdomo (2012).

Cuando un sistema elástico pueda tener por medio de una fuerza ejercida por vibraciones externas al sistema, la frecuencia con la que se excita es una frecuencia natural, por otro lado, la frecuencia de resonancia es producida cuando la frecuencia de excitación sea igual a la frecuencia natural del sistema, como lo expone Camacho, Reyes & Jiménez (2013), Murcia & Perdomo (2012) y Prakash (1981).

La Figura 10a, muestra las variables que se utilizan las cuales son: densidad de masa ( $\rho$ ), momento de inercia de masa ( $J$ ), módulo de corte ( $G$ ) y relación de amortiguamiento ( $\xi$ ); en la parte superior móvil, se conocen las propiedades dinámicas: momento de inercia rotacional de la masa superior ( $J_A$ ), constante del resorte ( $K_A$ ) y amortiguamiento ( $\xi_A$ ). Además, el tener la muestra en una figura cilíndrica, permite el uso de un sistema de coordenadas que se especifica por tres (3) componentes independientes: radio ( $r$ ), posición angular ( $\psi$ ) y altura ( $z$ ), los cuales se pueden observar en la Figura 10b, como lo muestra Camacho (2011).



**Figura 8** Muestra cilíndrica de un ensayo de columna resonante: a) vista de la muestra en perfil; b) vista en planta.



Fuente: Camacho (2011).

Como la respuesta dinámica del suelo es generada por una excitación en el sistema, un LVDT, hará la lectura de las variaciones de altura en relación con los cambios de volumen, mientras que un *proximeter*, medirá la amplitud de onda que posteriormente, medirá el movimiento relativo de la placa a torsión. Como resultado, la frecuencia que se encarga de aumentar los movimientos de la parte libre de la muestra, va generando la resonancia.

Es importante, que el proceso se repita en varias ocasiones, con la finalidad de aumentar constantemente la amplitud del esfuerzo para obtener el módulo de corte y la relación de amortiguamiento generado por las cargas y sus respectivas deformaciones, (ASTM D4015-2015).

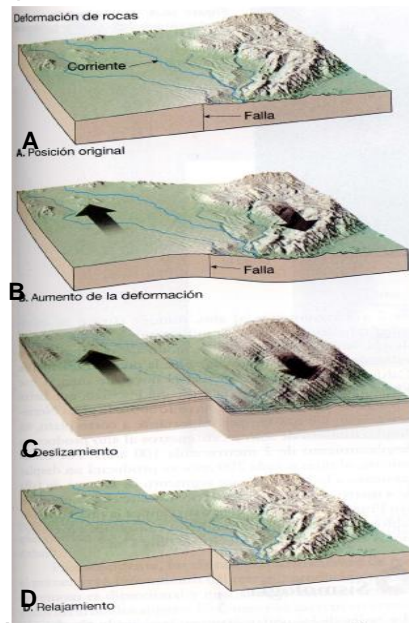
## 5. ANTECEDENTES

El fenómeno natural que más infringe daños directos e indirectos sobre una ciudad son los sismos, algunas ciudades del mundo se encuentran en zonas de mayor susceptibilidad que otras, siendo uno de los fenómenos naturales más destructivos que el hombre ha intentado comprender.

El sismo es un movimiento repentino que se forma por cambios bruscos de energía elástica acumulada por la deformación de la litosfera, como resultado de dislocaciones de la corteza que forman ondas elásticas dirigidas en todas las direcciones, llegando a la superficie de la tierra con magnitudes y daños catastróficos, como lo muestra Vidal, (1994) y Tarbuck and Lutgens (2005).



**Figura 9** Esquema de desencadenamiento de un sismo



Fuente. Tarbuck and Lutgens (2005).

La Figura 11, es un esquema del movimiento que se presenta cuando hay acumulación de energía en las placas.

En la posición A, se puede ver como se encuentra la zona antes del desplazamiento, además presenta una falla; en la posición B, se muestra una deformación por las fuerzas tectónicas de la zona de falla con acumulación de energía; en la posición C, se supera la resistencia de la falla, liberando energía acumulada gracias a rebotes elásticos debido a las rocas; en la posición D, se vuelven a reacomodar las partículas de la roca gracias a la previa liberación de energía.

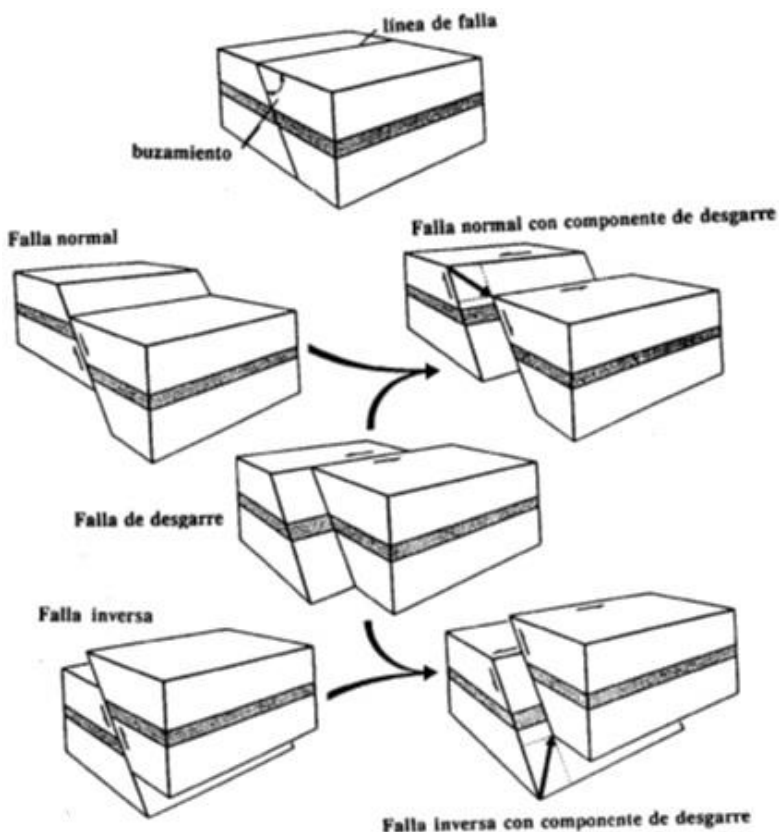
No obstante, las fallas se pueden presentar de diversos tipos como lo muestra la Figura 11. Hay tres tipos de fallas:

- La falla normal, en la que el desplazamiento se da por el bloque superior con dirección del plano de falla.
- La falla inversa, en la cual el desplazamiento del bloque superior es ascendente sobre la dirección del plano de falla.
- La falla de desgarre, en este los bloques tienen un desplazamiento que se realiza de forma lateral sobre la dirección del plano de falla.



Además, se pueden presentar fallas combinadas, en estas, las fallas se combinan (con cualquiera de las fallas ya mencionadas) y generan daños de mayor envergadura, como lo muestra Vidal (1994).

**Figura 10** Tipos de fallas

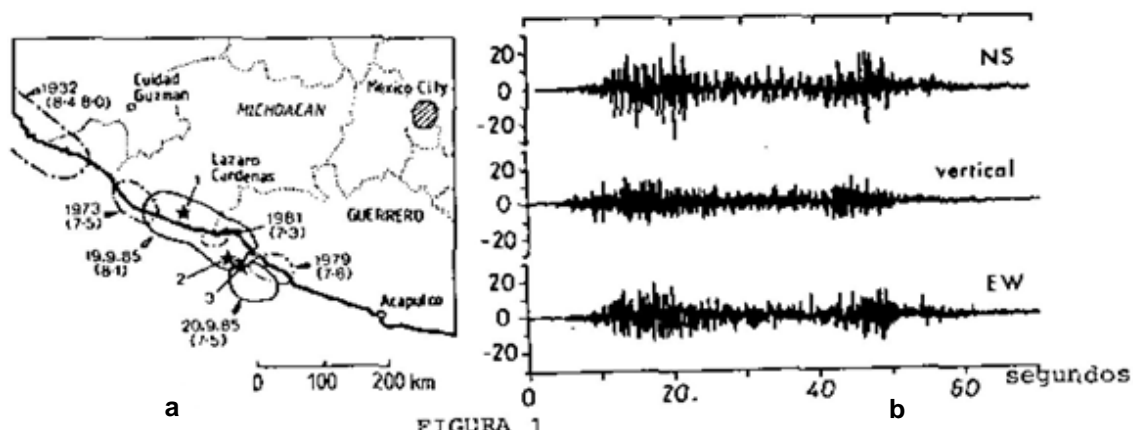


Fuente. Vidal (1994).

El sismo de septiembre de 1985, en México, dejó claro que los sismos producen varios resultados en estructuras con asentamientos diferentes y sobre diversos tipos de suelos y roca. En la Figura 13b (representando por la aceleración contra el tiempo en segundos), se puede apreciar el movimiento que se tuvo por medio de un acelerómetro, las lecturas son del observatorio de Zacatula, cerca de Lázaro Cárdenas (Figura 13a). Las lecturas se registraron sobre 3 ejes, norte-sur (NS), este-oeste (EW) y de forma vertical a un plano como lo muestra Alarcón, (1989).



**Figura 11** Lectura de movimiento por acelerómetro del terremoto de México, en septiembre de 1985.



- FIGURA 1
- \* 1 Epicentro de la primera sacudida (19.9.85)
  - \* 2 Epicentro de la segunda sacudida (26 segundos después)
  - \* 3 Epicentro de la réplica más importante (20.8.85)

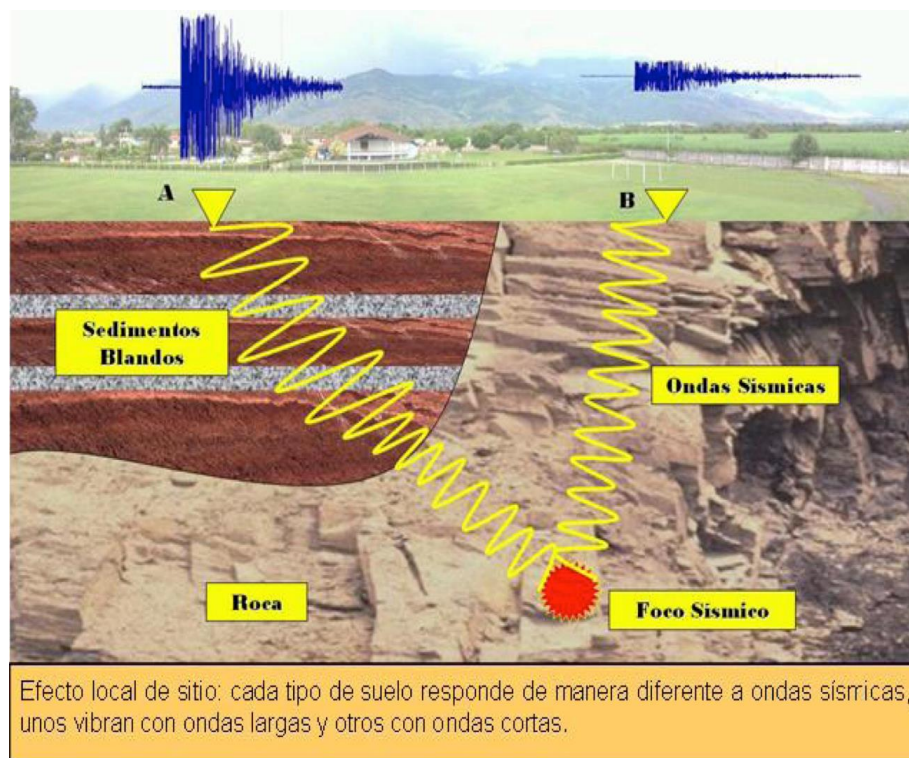
Fuente: Alarcón (1989)

Con lo dicho por Alarcón, (1989), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ratifica que en suelos blandos se presenta una amplificación de las onda, mientras que en roca las ondas no se amplifican; gracias a los registros tomados por la UNAM y posteriormente comparados con los registros de Zacatula, la información puede concluir que algunas de las estructuras colapsaron por fallos estructurales, debido a que el suelo no se colapsó, por el contrario, amplificó las ondas recibidas.

La ciudad de Puerto Armuelles, Panamá, se encuentra sobre una zona de alta sismicidad; desde el año 1933, se han registrado 11 sismos que superan los 6,0 grados de magnitud en escala de Richter. En los años 1934, 1949, 2002 y 2003, se presentaron los sismos con mayores daños significativos para la ciudad, estos sismos generaron una mayor contribución de información que ayuda a concluir que las formaciones geológicas más antiguas se encuentran más compactas que las formaciones recientes, esta razón confirma lo dicho por Alarcón (1989) sobre la diferencia de recepción de onda entre suelos blandos y roca. (Echeverría, Tapia y Camacho, 2014).



**Figura 12** Demostración de propagación de ondas en suelos blandos y suelos rocosos.



Fuente: Astwood (2013)

Como se muestra en la Figura 14, los suelos blandos amplifican las ondas sísmicas mientras que, en rocas la propagación de onda permanece constante. En la ciudad de Puerto Armuelles, los estudios de suelo arrojaron que, en algunos lugares específicos de la ciudad, se presentan estas circunstancias, por consiguiente, las zonas con suelos blandos, son las locaciones más propensas y con mayores porcentajes para que se genere un desastre.

Bogotá, Colombia, está localizado en una zona sísmica intermedia, y por sus suelos de origen lacustre presenta una diversidad de suelos blandos, esto implica un riesgo para las estructuras y la población. De acuerdo con los análisis y registros tomados por el antiguo Ingeominas (1993) y Chicangana *et al.* (2015), los suelos blandos saturados de la Sabana de Bogotá varían entre 130 y 250 m, lo cual implica, que los efectos de un sismo superior a 7,0 grados en escala de Richter pueden causar daños severos en los alrededores de la ciudad, como se muestra en la Figura 14.

Sobre la vía que comunica a la vereda de Siberia del municipio de Cota, Cundinamarca, con el municipio de Tenjo, Cundinamarca, el comportamiento del suelo es un factor de estudio relevante, ya que a lo largo de la historia, muchos autores han determinado que en Bogotá y en la Sabana de Bogotá los suelos son arcillosos expansivos, que generan diversidad de deformaciones y producen fallos sobre las capas asfálticas y pavimentos. Beltrán (1991), es uno



de los principales puntos de referencia, quien sustenta que las arcillas de la ciudad de Bogotá y sus alrededores tienen comportamientos de hinchamiento y expansión, causando daños sobre las obras de ingeniería.

En el 2012 se realizaron trabajos de reparación sobre la vía, mejorando su rendimiento de 40 minutos a solo 25 minutos a velocidades prudenciales, sin embargo, para el 2016, la vía presenta hundimientos y agrietamientos provenientes del suelo, debido a que se encuentra en medio de dos fallas: la falla Mosquera y la falla El Porvenir, como lo muestran Velandia y De Bermoudes (2002). Estas fallas, sumadas al cambio de temperatura y al tipo de suelo que tiene la vía, se presentan una serie de inconvenientes para mantener estable el suelo luego de colocar la estructura de pavimento (subrasante, subbase, base y capa asfáltica),

Como lo menciona Pineda et al (2015), las deformaciones en el suelo pueden ser causadas por la vegetación, que influyen directamente en las zonas que se están estudiando; las plantas que se encuentran en las zonas de estudio suelen no ser de origen nativo, sino que, por lo contrario, puede ser vegetación traída de otras partes del mundo o de otras zonas del país; con plantas de diversas características y su comportamiento natural por la búsqueda de agua infringen un daño por causa de las raíces, que producen desestabilización en los suelos, en consecuencia, los daños a vías son más comunes y por lo tanto más frecuentes.

Burland et al. (1996), demuestran que las muestras de suelos arcillosos naturales tienen una mejor configuración a nivel de microestructura con respecto a muestras reconstituidas, teniendo como resultado mayores resistencias a la compresión. Si se aplicara a la vía de estudio, un supuesto sería que reconstituir material para estabilizar el terreno y luego colocar la estructura de pavimento, no sería una mejora para la vía.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 MATERIALES

- Muestras de arcilla extraídas del occidente de la Sabana de Bogotá, más precisamente de la vía Siberia Tenjo.
- Laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás.
- Columna Resonante (máquina)
- Consolidómetro de lodos (Universidad Nacional de Colombia)



## 6.2 METODOLOGÍA

Este trabajo tendrá como desarrollo inicial, tomar muestras de la vía Siberia-Tenjo, previamente extraídas por sondeo, caracterizarlas y reconstituirlas en el laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás. Como la mayor parte de este proyecto se llevará a cabo en laboratorio, se prevé realizar el ensayo de papel filtro con el cual se obtendrá la succión matricial y realizar el ensayo de columna resonante para determinar las deformaciones que demuestran el comportamiento dinámico que tiene el suelo.

Durante la preparación de las muestras, se debe caracterizar el material natural para luego secarlo en horno y posteriormente disgregarlo hasta que queden partículas finas, luego para reconstituir la muestra se agrega agua para convertirla en un lodo con humedad 1.5 veces el límite líquido, aunque se prefiere 1.25 y secado en horno, como lo describe Burland (1990); esta será la parte más delicada del proceso, ya que, se van obteniendo varios cilindros con diferentes humedades cambiando la saturación (principal modificación a realizar), a lo cual, se pretende obtener la mayor semejanza física en contexto con las naturales.

Para realizar el ensayo de columna resonante se requiere de la humedad de la muestra y el volumen como datos base, los cilindros deberán tener una medida aproximada de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura; el ensayo será de tipo fijo-libre, a través del cual, se aplicará una excitación sinusoidal constante para hallar la frecuencia de resonancia. Los datos se obtendrán con un LVDT, en donde se medirá la diferencia de altura y un *proximeter*, que medirá el movimiento torsional.

Se inicia con el ensayo al dejar un extremo de la muestra fija y someter el extremo superior a una excitación torsional generada por un motor eléctrico; con la velocidad de transmisión y la geometría de la probeta se puede determinar la frecuencia de resonancia, fijando la altura de la probeta, la frecuencia de resonancia dependerá del módulo de corte; es decir, se establece una relación entre la frecuencia de resonancia y el módulo de corte.

Finalmente, con la recopilación de todos los datos se obtendrán gráficas que determinarán la relación de las propiedades dinámicas del suelo con muestras naturales y reconstituidas con diferentes presiones de confinamiento.



## 7. DESARROLLO

### 7.1. OBTENCIÓN DE MUESTRAS

#### 7.1.1. LABORES DE RECONOCIMIENTO DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta primera parte, se realizó un reconocimiento el día 1 de octubre de 2016 en la zona de estudio de la vía Siberia-Tenjo en el km 2,1 como se puede observar en la Figura 16 y 17.

**Figura 136.** Tramo de la vía en el kilómetro 2,1 en dirección Siberia-Tenjo.



**Figura 17.** Tramo de la vía en el kilómetro 9,75 en dirección Tenjo-Siberia.



En la zona mostrada anteriormente se llevó a cabo la extracción de las muestras. En esta zona, se encontraron suelos arcillosos y vegetación en ambos costados de la vía; en la Figura 1, el costado izquierdo contiene pinos y es la zona en la cual se extrajeron las muestras, mientras que en el costado derecho, se puede observar pastizales y postes con claves de energía (como lo menciona Rojas y Rivera, 2014). Una vez extraídas las muestras se llevaron al laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás con el fin de caracterizar el material.

## 8. ENSAYOS DE SACRIFICIO

El ensayo de columna resonante determina la frecuencia de resonancia, en el cual se varían presiones de aire para obtener varias frecuencias en un rango establecido; al ajustar estos parámetros se forzaría a la muestra a entrar en resonancia y como resultado se obtendrán las propiedades dinámicas que tenga el suelo.



Para comprender el manejo y funcionamiento de la columna resonante es esencial realizar ensayos con muestras de sacrificio. La finalidad de realizar el montaje en la columna con estas muestras es obtener y analizar los resultados que proporcione el aparato con el propósito de no usar las muestras de la zona de estudio para no dañarlas, adquirir la destreza para manejar el aparato de forma apropiada y colocar los datos esenciales para la obtención de los resultados.

A continuación, se presentan los resultados de una muestra de sacrificio de arcilla reconstituida, de material extraído entre 4,5 - 5 m de profundidad realizado en el mes de septiembre de 2016. En la Tabla 1 se presentan las características y dimensiones de la muestra.

### 8.1. ENSAYO DE SACRIFICIO 1

**Tabla 1.** Especificaciones de muestra, septiembre de 2016.

<b>Diámetro</b>	38 mm
<b>Altura</b>	76 mm
<b>Masa</b>	140 g
<b>Tipo de suelo</b>	Arcilla
<b>Contenido de agua inicial</b>	33,63 %
<b>Grado de saturación</b>	70 %
<b>Gravedad específica</b>	2,78

El desarrollo de este ensayo se realizó bajo 5 presiones de confinamiento en un rango entre 0 y 400 kPa. Las frecuencias de resonancia obtenidas con diferentes torques se presentan en la Figura 18. Cuando el torque es inferior 1 pfs (*Percent Full Scale*, 1pfs=0.023 N m, unidades de torque), las frecuencias de resonancia son menores a 0,015 (Hz) y cuando son mayores las frecuencias son superiores a 0,016%.



Figura 18. Frecuencia de resonancia en diferentes pfs

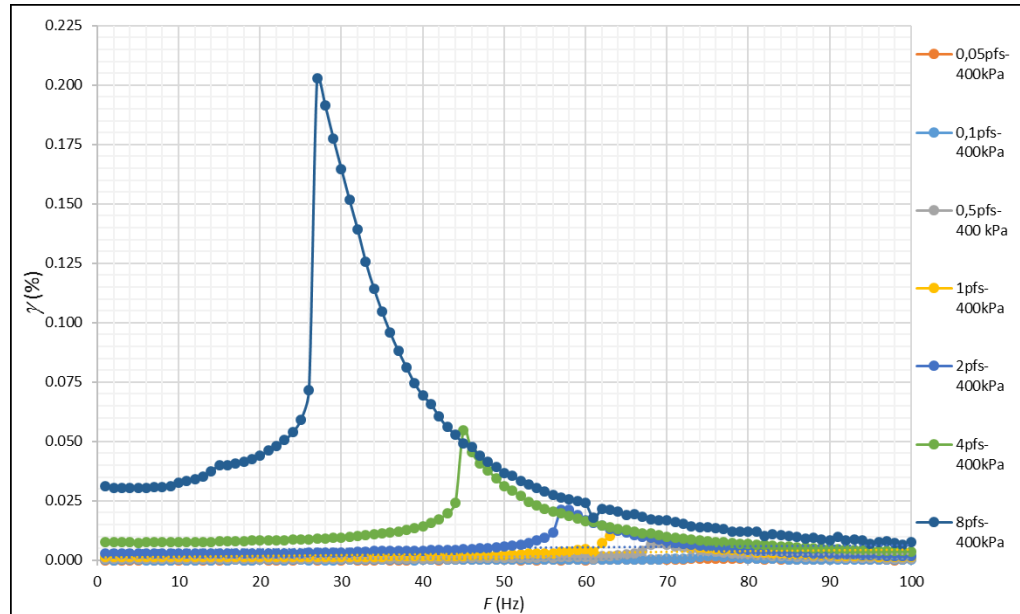
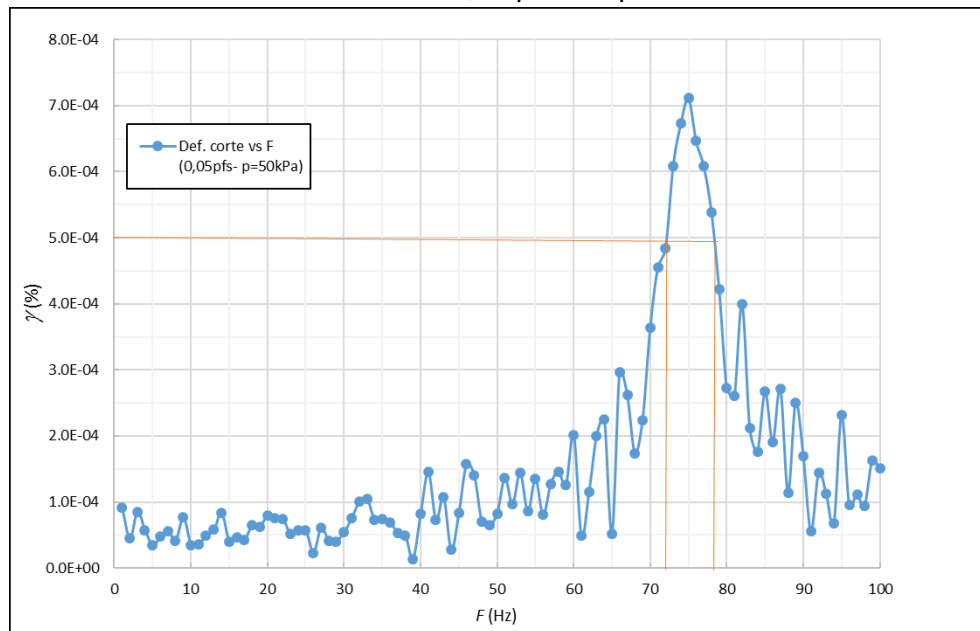


Figura 19. Frecuencia de resonancia a 0,05 pfs con presión de confinamiento de 50 kPa



Por otro lado, en la Figura 19 el *proximeter* (sensor de proximidad que detecta las señales que rodean o se encuentran cerca del sensor) realizó varias capturas de datos en las cuales se vieron reflejadas en una clara perturbación en los resultados, mostrando una serie de picos irregulares que se presentaron por la



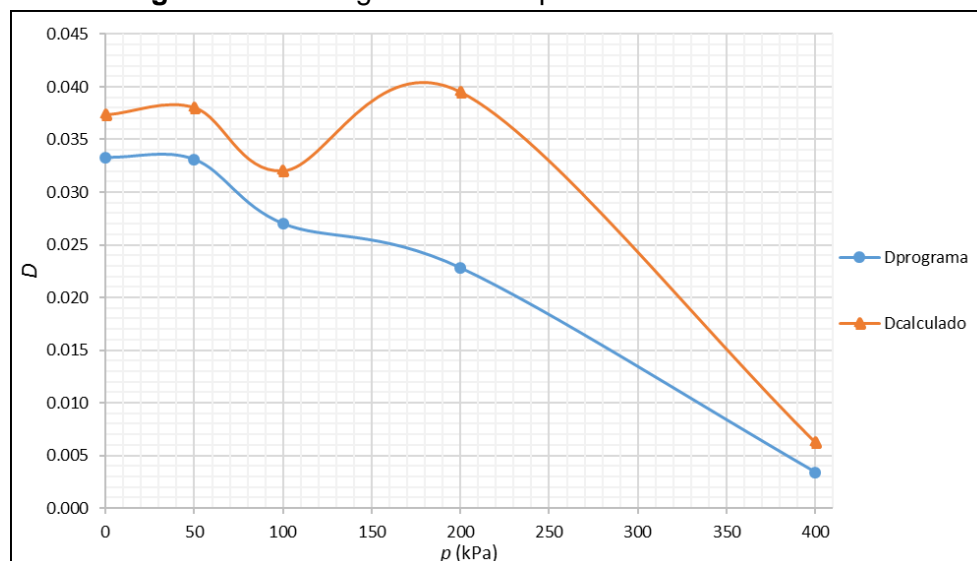
alteración en el medio donde se encuentra situado el aparato y que el mismo sensor tomo como parte de la información.

En este punto es preciso mencionar que la columna resonante no se encuentra en un lugar fuera de alteraciones que puedan afectar la lectura del sensor, es por esto que donde se apoya el aparato es difícil aislarlo de perturbaciones; estas perturbaciones son generadas por alteraciones de movimiento que producen ondas; debido a una fuente generadora de la perturbación la emisión de onda es reproducida a través de la mesa en la que se apoya el aparato y el sensor toma la lectura, dando como resultado picos altos y bajos de grandes diferencias en la Figura 19.

Las ondas que más afectan el aparato son de tipo volumétricas o de cuerpo, también conocidas como ondas  $P$ , estas ondas se pueden propagar por medios sólidos, líquidos o gaseosos y a diferencia de las ondas  $S$ , estas tienen mayor velocidad siendo así las que primero llegan para ser registradas; el movimiento vibratorio de las partículas se encuentra en paralelo a la dirección de propagación teniendo como resultado una mayor velocidad, como lo menciona Kayal, 2000.

En las gráficas del amortiguamiento presentadas en la Figura 3, se hicieron las comparaciones con los resultados del aparato y el amortiguamiento calculado por el método de *Half Power Bandwidth (HPB)*.

**Figura 20.** Amortiguamiento vs presión de confinamiento.

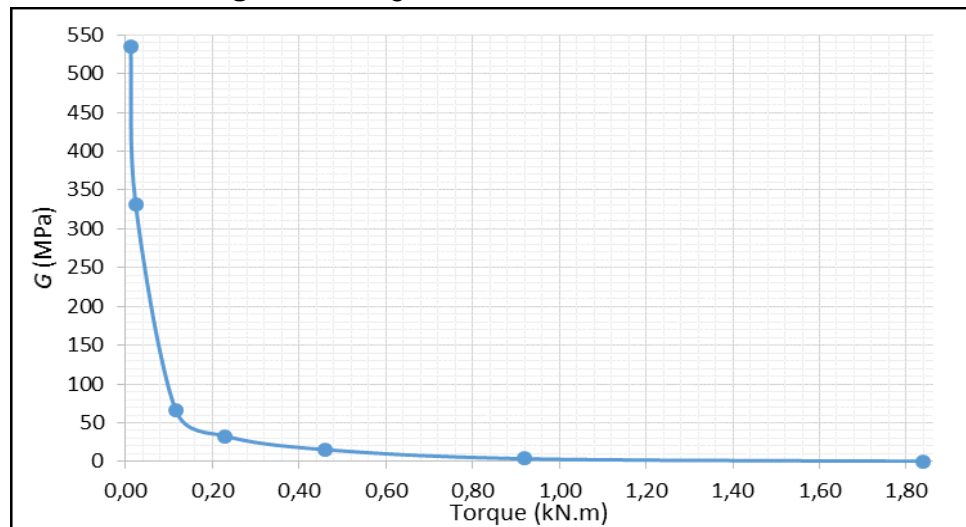




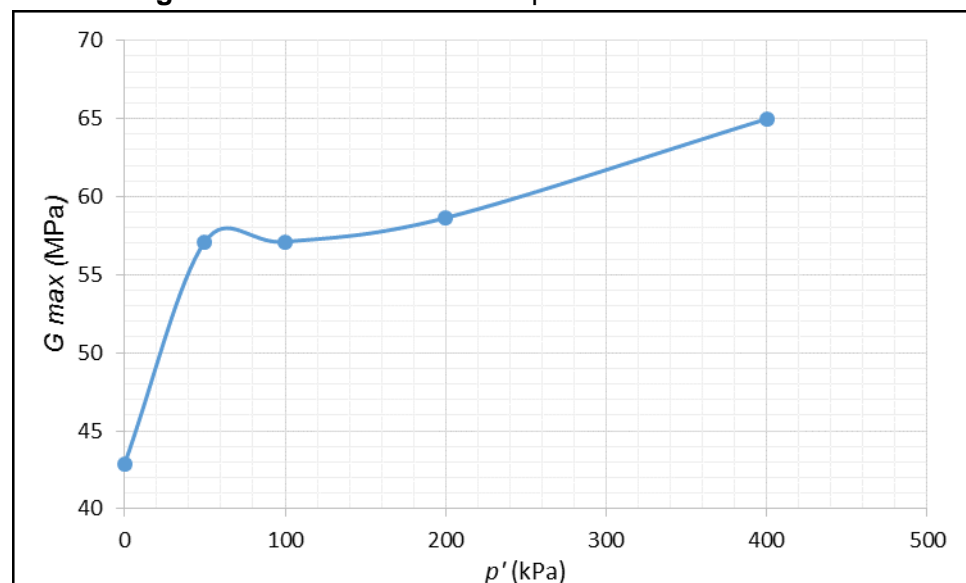
En la Figura 20 se presentan los gráficos del amortiguamiento, donde se ve una clara diferencia al calcularlo por el método *HPB*, esto es debido a la forma en que se fueron tomando los resultados, al tomar menor cantidad de decimales para realizar el cálculo, se presentan variaciones en los resultados que influyen directamente en los gráficos.

En la Figura 21 se tiene una degradación de módulo de corte con el aumento del torque en donde se ve un cambio pronunciado antes de 0,1 kN.m; con los torques mayores (a 0,1 kN.m) se presentan cambios leves de degradación en el módulo llegando a tener un comportamiento asintótico.

**Figura 21.** Degradación del módulo de corte



**Figura 22.** Módulo de corte vs presión de confinamiento





La variación que presenta el módulo de corte en función de la presión de confinamiento se puede apreciar en presiones inferiores a 100 kPa donde el módulo aumenta mientras que con presiones mayores a 100 kPa la tendencia es no presentar variaciones, como se muestra en la Figura 22.

Los resultados obtenidos de esta muestra no son suficientes y es necesario realizar otros ensayos para comprobar si con menor grado de saturación la muestra puede llegar a tener menores degradaciones en el módulo de corte y cuando se generen las presiones de confinamiento se mantenga constante.

## 8.2. ENSAYO DE SACRIFICIO 2

La siguiente muestra de sacrificio es de arcilla extraída entre 4 – 4,5 m de profundidad, el ensayo se realizó el 1 de junio de 2017, en la Tabla 2 se puede observar las características y dimensiones de la muestra.

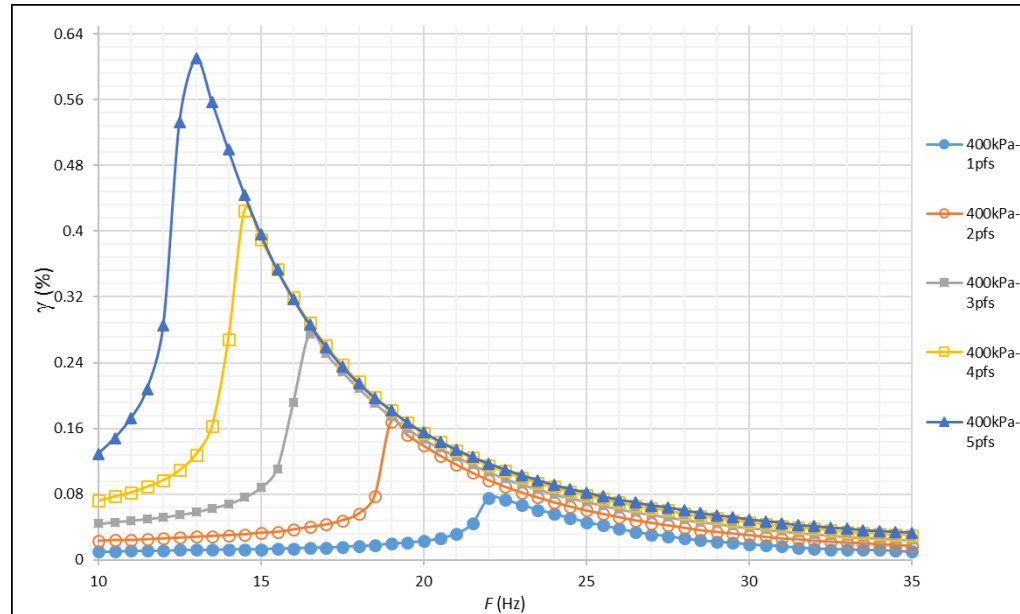
**Tabla 2.** Especificaciones de muestra ensayada el 1 de junio de 2017.

<b>Diámetro</b>	38,36 mm
<b>Altura</b>	78,89 mm
<b>Masa</b>	128,3 g
<b>Tipo de suelo</b>	Arcilla
<b>Contenido de agua inicial</b>	102,7 %
<b>Grado de saturación</b>	100,95 %
<b>Gravedad específica</b>	2,7

Este ensayo se realizó bajo 9 presiones de confinamiento en un rango entre 0 y 400 kPa. Las frecuencias de resonancia obtenidas con diferentes torques son las gráficas presentadas en la Figura 23. Los resultados de esta muestra presentan diferentes resonancias que aumentan al incrementar el pfs. Al comparar con la muestra de sacrificio 1 (Figura 1), se encuentran diferencias debido a la utilización de diferentes rangos de incremento en los pfs.

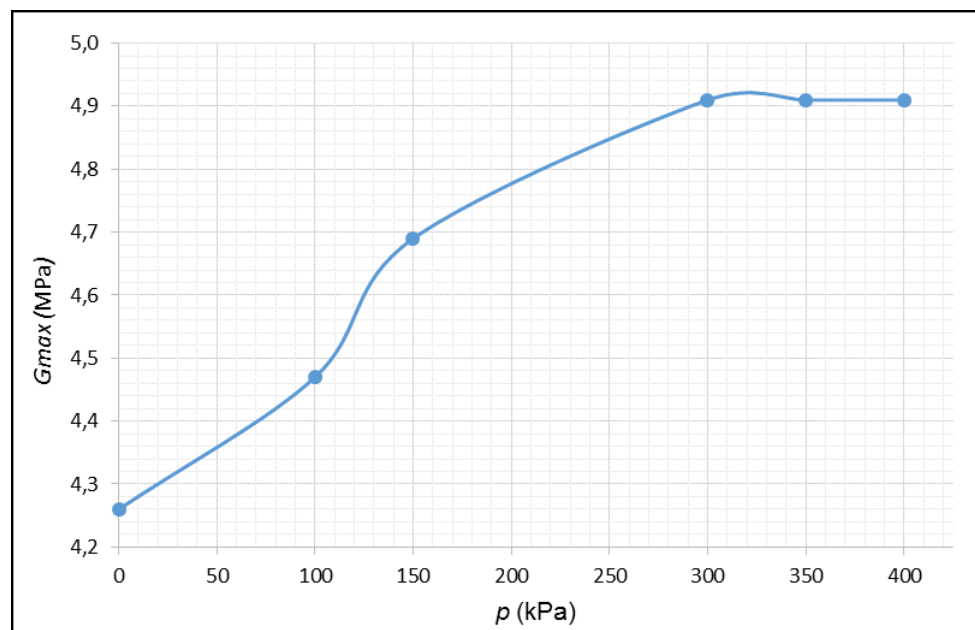


**Figura 23.** Frecuencia de resonancia en diferentes pfs



La Figura 24 presenta la variación de módulo de corte máximo con confinamiento de suelo arcilloso que se asemeja al punto de confinamiento isotrópico, la diferencia está en el confinamiento y en los módulos de corte que están por encima de los expuestos, esto gracias al trabajo realizado por Pineda et al. (2014).

**Figura 24.** Confinamiento vs módulo de corte máximo





### 8.3. ENSAYO DE SACRIFICIO 3

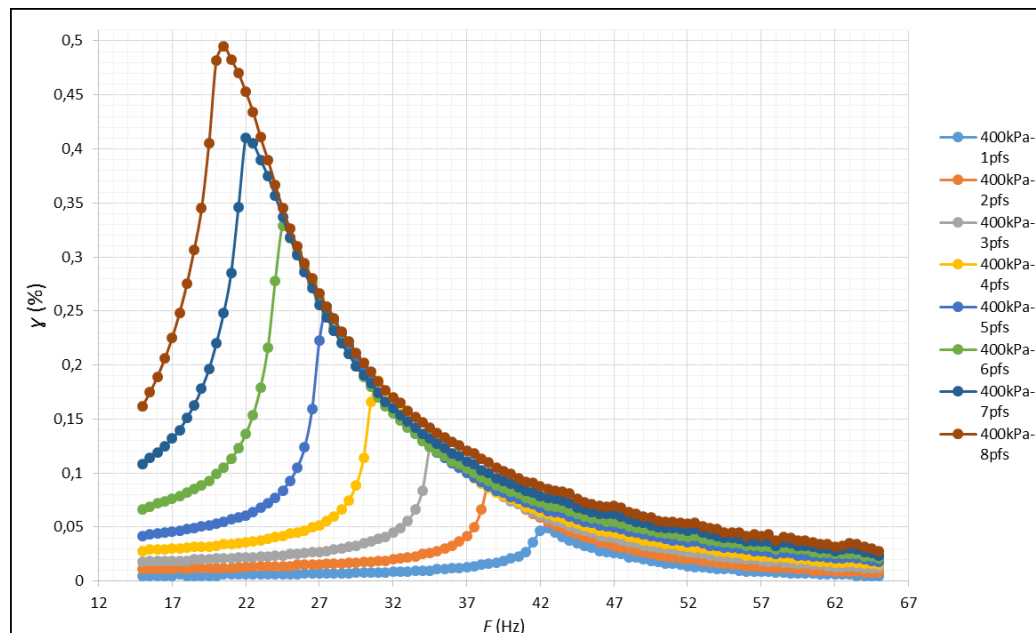
La siguiente muestra de sacrificio es de arcilla extraída entre 4 – 5 m de profundidad, el ensayo se realizó el 16 de agosto de 2017; en la Tabla 3 se puede observar las características y dimensiones de la muestra.

**Tabla 3.** Especificaciones de muestra ensayada el 1 de junio de 2017.

<b>Diámetro</b>	37,87 mm
<b>Altura</b>	78,23 mm
<b>Masa</b>	137,87 g
<b>Tipo de suelo</b>	Arcilla
<b>Contenido de agua inicial</b>	34,30 %
<b>Grado de saturación</b>	79,81 %
<b>Gravedad específica</b>	2,72

Este ensayo se realizó bajo 9 presiones de confinamiento en un rango entre 0 y 400 kPa; las frecuencias de resonancia obtenidas con diferentes torques son las gráficas presentadas en la Figura 25.

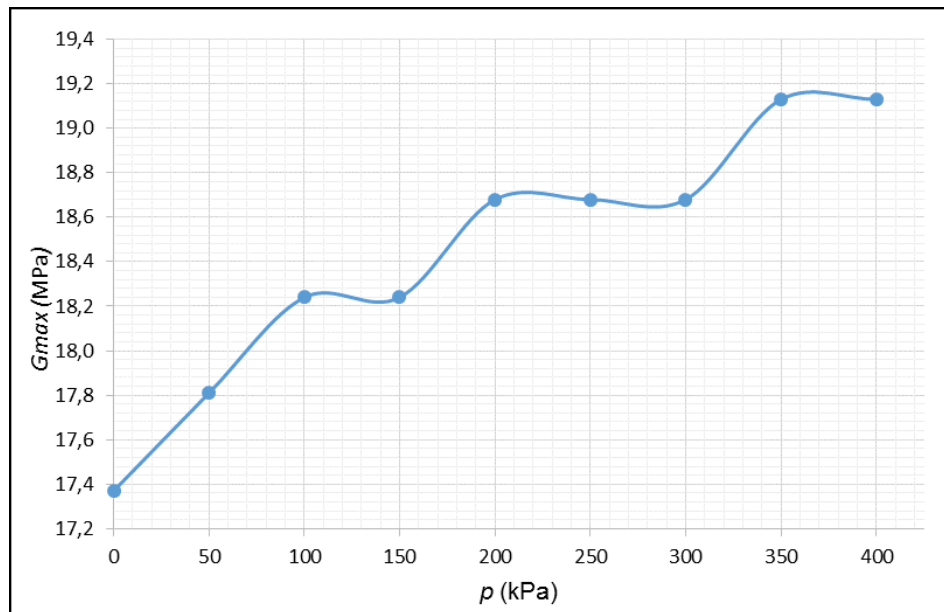
**Figura 25.** Frecuencia de resonancia en diferentes pfs





Con los resultados obtenidos en la Figura 25 se podría decir que los resultados fueron los esperados, sin embargo al revisar la Figura 26, las curvas que se presentan tienen un rango de módulo pequeño entre 17 y 19 MPa, dando como resultado una variación en escalera y comportamiento elástico.

**Figura 26.** Confinamiento vs módulo de corte máximo



## 9. PROPIEDADES INTRÍNSECAS

Algunas de las arcillas presentan una forma “estructurada” cuando se encuentran *in situ*; la composición y conformación de esta estructura ha sido descrita como la disposición de material en donde ocurren impactos mecánicos, químicos y biológicos. Dentro de esta misma definición se clarifica que la estructura *in situ* es totalmente diferente del estado reconstituido; cambiando su composición y sus propiedades debido al remoldeo de la muestra, (Chandler, 2000).

La línea de compresión intrínseca marca una referencia para conocer y evaluar el comportamiento de una muestra bajo compresión; es necesario definir un esfuerzo al cual será sometida. El término intrínseco se usa para definir propiedades de arcillas que han sido reconstituidas bajo un proceso de secar el material en horno para luego añadir un contenido de agua que este entre 1 y 1,5 veces el límite líquido con preferencia a 1,25 veces, finalmente pasa a ser consolidada. (Burland, 1990).



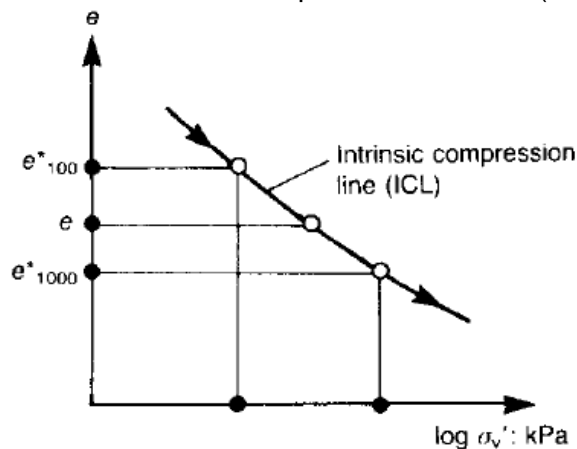
## 9.1. ÍNDICE DE VACÍOS

El índice de vacío ( $I_v$ ) es el resultado final al que se desea llegar mediante las propiedades intrínsecas, puede considerarse como una medida de la densidad intrínseca de un sedimento, es decir que “una vez se efectúe la compactación del suelo la densidad relativa varía en función directa del trabajo de compactación referido al peso del suelo y al área del molde, además de la humedad de compactación”, Giuliani y Suarez (1964) ; la Ecuación 1, define el índice mediante la relación de vacíos inicial y una relación de vacíos aumentada 100 y a 1000 kPa:

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (\text{Ec. 1})$$

La Figura 27 define la curva de compresión intrínseca (*ICL*, *Intrinsic compression line*).

**Figura 27.** Se presenta la curva de compresión intrínseca (*ICL*), Burland, 1990.



### Relación de vacíos ( $e$ )

Este parámetro, se obtiene del volumen de sólidos y el volumen de vacíos, así:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

### Relación de vacíos a 100 kPa ( $e_{100}^*$ )

Es la relación de vacíos para un esfuerzo de 100 kPa bajo la realización de la reconstitución. Es un valor que se obtiene mediante un consolidómetro de lodos, en donde se aumenta el esfuerzo poco a poco, debido a que no se puede aplicar el esfuerzo a 100 kPa directamente porque la muestra se saldría del aparato.



### Relación de vacíos a 1000 kPa ( $e_{1000}^*$ )

Es la relación de vacíos para un esfuerzo de 1000 kPa bajo la realización de la reconstitución. Es un valor que se obtiene mediante un consolidómetro de lodos, en donde se aumenta el esfuerzo poco a poco, debido a que no se puede aplicar el esfuerzo a 1000 kPa directamente porque la muestra se saldría del aparato.

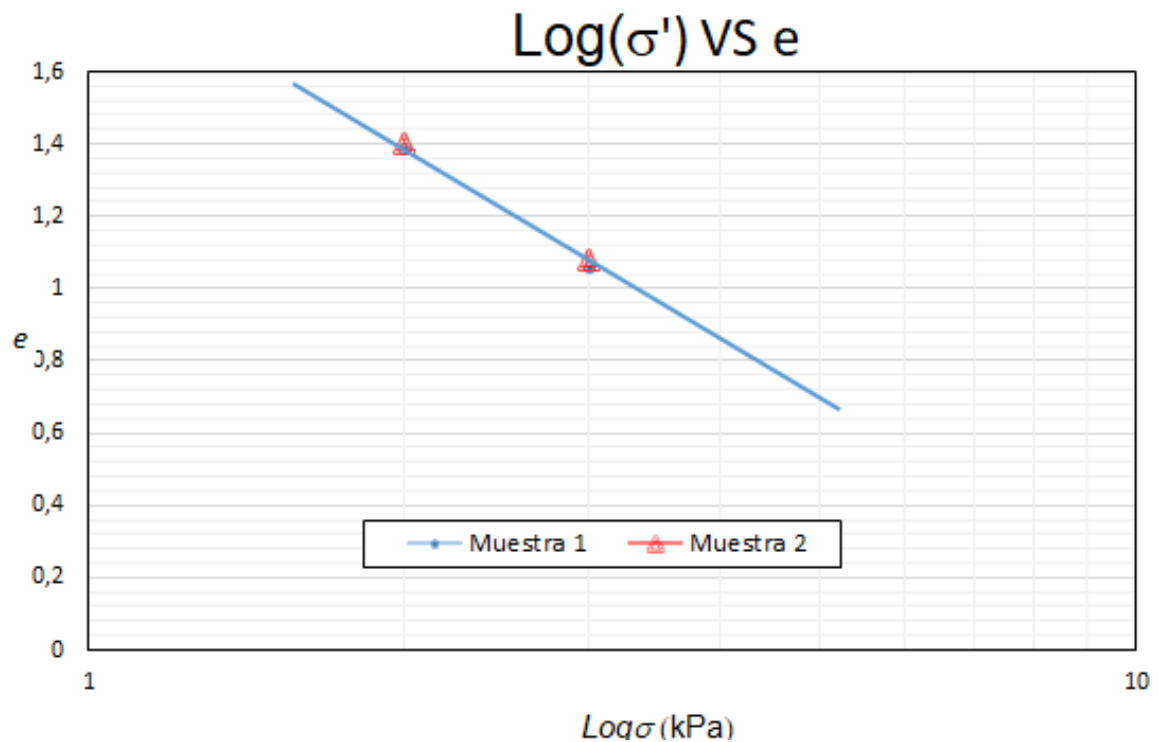
### Línea de compresión intrínseca

$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde  $x = \log \sigma'_v$  dada en kPa.

Resultados de la curva de compresión intrínseca.

Muestra 1	$e_0$	$e_{100}$	$e_{1000}$
	1,45	1,39	1,06
Muestra 2	$e_0$	$e_{100}$	$e_{1000}$
	1,43	1,40	1,08





## 10. MUESTRA RECONSTITUIDA

En colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, se realizó la reconstitución de la muestra bajo un esfuerzo constante de 50 kPa. El ingeniero de soporte técnico Alexis Valero Portilla, fue quien contribuyó con el desarrollo de la reconstitución. Guiado por la tesis de Betancourt (1996) se siguieron los pasos presentados a continuación:

- I. Se realizó un muestreo (extracción de un material).
- II. Se tomó la humedad natural inicial y se realizaron límites de Atterberg.
- III. Para obtener el contenido de agua específico se calculó la humedad inicial del lodo con respecto al límite líquido; luego se seca en horno y se realizan los cálculos pertinentes para llevarlo a 1,25 el límite líquido.
- IV. Se calculó la proporción de suelo y agua deionizada para la preparación del lodo.
- V. Se requiere de airear el agua deionizada, luego mezclar el agua con el suelo en una batea y posteriormente se deja reposar por 24 horas para que la mezcla se uniformice.
- VI. De la mezcla de lodo que se tiene, se divide en varias partes iguales para batir individualmente en batidora eléctrica buscando la homogenización de la muestra; una vez concluido el proceso de batido se prosigue a de airear cada una de las partes.
- VII. Se prepara el consolidómetro de lodos (Figura 28), luego se va llenando la cámara del consolidómetro hasta alcanzar la altura requerida. El desarrollo de esta etapa se hace con el vertimiento de cada una de las porciones de mezcla previamente preparadas y utilizando un embudo se mantiene el control manual para evitar que se generen grumos en la mezcla.



**Figura 28.** Consolidómetro de lodos, Universidad Nacional de Colombia.



- VIII. Una vez la muestra se encuentra a la altura deseada, se preparan los medidores de deformaciones que se encuentran ligados a la lectura de drenaje y tiempo, después se aplica la carga deseada.
- IX. Con los medidores instalados se procede a realizar la consolidación, tomando lecturas de volumen y tiempo.
- X. Finalmente, cuando se complete la consolidación, se descarga y se extrae la arcilla reconstituida, se toman las humedades finales y posteriormente, la arcilla podría pasar a ser utilizada para otros ensayos.

Al final se debe obtener una muestra con un esfuerzo de consolidación de 50 kPa, que en realidad sería su primer esfuerzo después de haber pasado por la fase de reconstitución, Figura 29.

#### 10.1. RESULTADOS UNIVERSIDAD NACIONAL

Durante la etapa de desarrollo del proyecto se necesitaba llevar unas muestras (Imagen 1) para realizar reconstituciones del material extraído en el occidente de la Sabana de Bogotá; para este ensayo se concertó con la Universidad Nacional



de Colombia (*UNAL*) el apoyo para realizarlo a la luz del convenio, marco de cooperación existente entre la Universidad Santo Tomás (*USTA*) y ésta institución.

**Imagen 1.** Se presentan las muestras entregadas a la Universidad Nacional.



En el mes de agosto de 2017 se entregaron las muestras a la *UNAL* y una relación de las mismas como se observa en el anexo 1; se obtuvieron 2 muestras reconstituidas unidimensionalmente a 50 kPa y 100 kPa respectivamente.

El aparato para realizar las reconstituciones se basa en un cuerpo cilíndrico metálico, con una conexión en la parte superior de un tubo que se conecta a un “pistón” ejerciendo la presión y otro tubo en la parte inferior en donde drena toda el agua que se controla por medio del peso y el volumen como se puede ver en la Imagen 2.

**Imagen 2.** Se observa el aparato de Reconstitución.





**Imagen 3.**

Se presenta la probeta reconstituída a 50 kPa.



**Imagen 4.**

Se presenta la probeta reconstituída a 100 kPa.

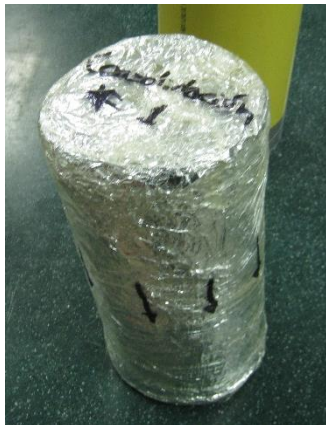


En el anexo 2 se pueden observar los resultados obtenidos de la reconstitución del material junto con la Imagen 2 y 3 (reconstitución a 50 y 100 kPa respectivamente), en donde se especifica la duración y la humedad para cada una de las muestras; la muestra 1 a 50 kPa tuvo una duración de 49 días (1176 horas) con una humedad del 53%, mientras que la muestra 2 a 100 kPa tuvo una duración de 44 días (1056 horas) con una humedad del 61%. Con esta información se evidencia que el cambio volumétrico es mayor sobre la muestra bajo 100 kPa y con menor tiempo que la muestra bajo 50 kPa.

Al finalizar los ensayos la UNAL entregó 2 cilindros de aproximadamente 30 y 45 cm de alto por un diámetro de 15 cm como se observa en la Imagen 5 y 6.

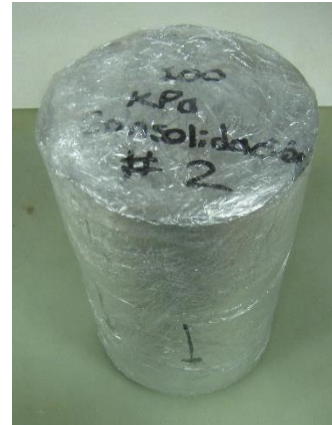
**Imagen 5.**

Se presenta la muestra a 50 kPa. después de reconstitución.



**Imagen 6.**

Se presenta la muestra a 100 kPa. después de reconstitución.





## 10.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA RECONSTITUIDA A 50 KPA.

### 10.2.1. HUMEDAD Y LÍMITES

Siguiendo la normativa de INVIAS (125-13), se realizó el ensayo por el método A con varios puntos, como se muestra en la Tabla 4. Realizando la curva de flujo, en la Figura 30, se pueden observar los 3 puntos y una línea que los intercede bajo la relación del número de golpes con el contenido de humedad.

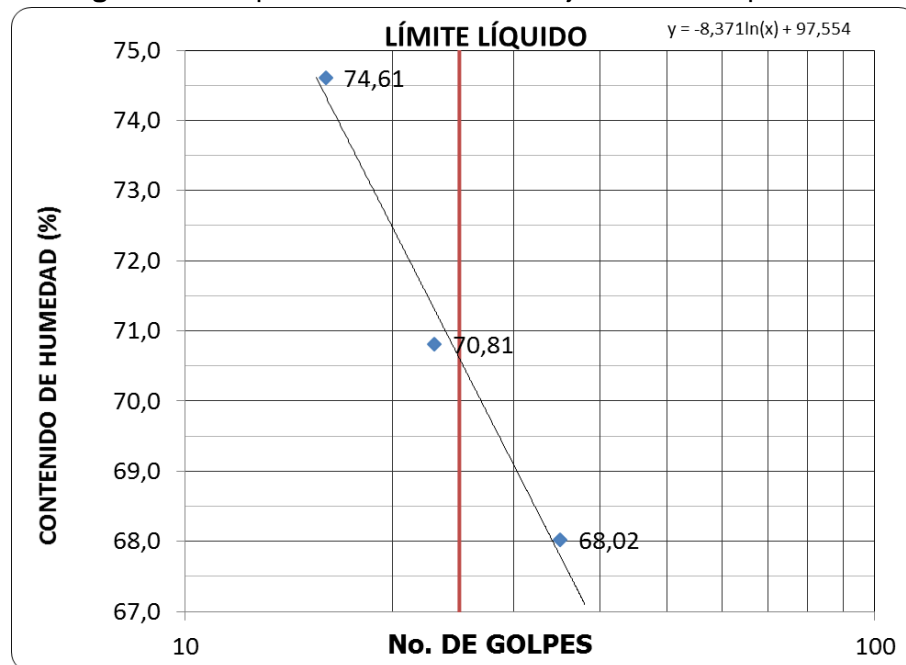
Usando la ecuación 3 se obtiene el contenido de humedad del suelo:

$$\omega = \left( \frac{(W_{muestra\ Hum.+ Rec.}) - (W_{muestra\ Seca + Rec.})}{(W_{muestra\ Seca + Rec.}) - (W_{recipiente})} \right) * 100 \quad (Ec\ 3.)$$

Tabla 4. Límite líquido.

<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>				
No. de Golpes		35	23	16
No. del Recipiente		144	118	145
W <sub>Muestra Hum. + Rec.</sub>	g	19,56	21,24	19,55
W <sub>Muestra Seca + Rec.</sub>	g	14,54	15,49	14,29
W <sub>Recipiente</sub>	g	7,16	7,37	7,24
Humedad	%	<b>68,02</b>	<b>70,81</b>	<b>74,61</b>

Figura 30. Se presenta la Curva de flujo del límite líquido.





Para determinar el límite plástico se siguió el procedimiento de la norma INVIAS (126-13), que pasan al horno y una vez son extraídos se determina la humedad (contenido de humedad Ec. 3), como se puede ver en la Tabla 5.

**Tabla 5. Límite plástico.**

LÍMITE PLÁSTICO			HUMEDAD INICIAL	
No. del Recipiente		131	146	115
$W_{\text{Muestra Hum. + Rec.}}$	g	12,17	12,85	231,69
$W_{\text{Muestra Seca + Rec.}}$	g	10,96	11,48	164,24
$W_{\text{Recipiente}}$	g	7,31	7,36	48,59
Humedad	%	<b>33,15</b>	<b>33,25</b>	<b>58,32</b>

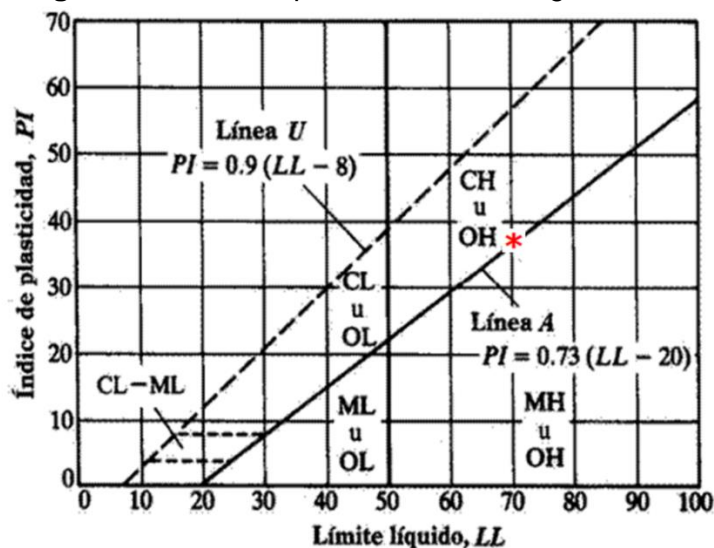
Para obtener el índice de plasticidad se requiere de los dos límites, el plástico y el líquido, y usando la ecuación 4 se determina este valor.

$$IP = LL - LP \text{ (Ec. 4)}$$

<b>RESULTADOS</b>	
<b>LÍMITE LÍQUIDO:</b>	<b>71,2</b>
<b>LÍMITE PLÁSTICO:</b>	<b>33,2</b>
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD:</b>	<b>37,9</b>

Ahora, para determinar el tipo de suelo al cual se le están realizando estas características, se utiliza la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 31), en la que arroja un resultado CH, indicando que es una arcilla.

**Figura 31. Carta de plasticidad de Casagrande.**

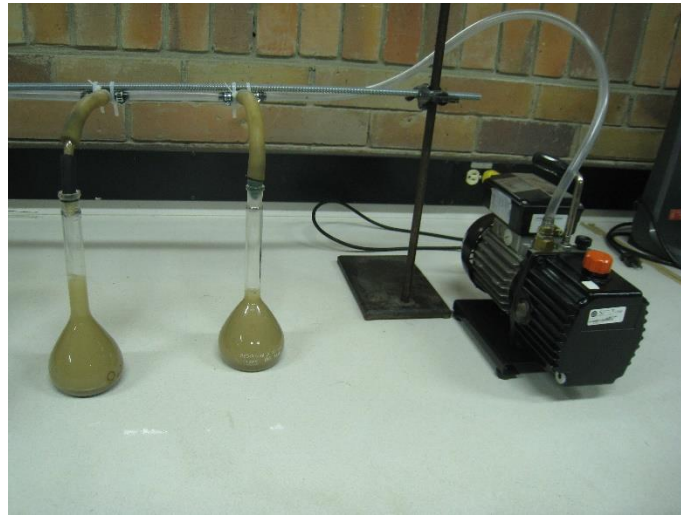




## 10.2.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA

El ensayo de gravedad específica se desarrolló bajo la norma INVIAS (128-13), como se observa en la Figura 32, se realizó con 3 muestras que arrojaron resultados muy similares, a lo cual, se realizó un promedio de los 3 resultados.

**Figura 32.** Ensayo de gravedad específica.



**Tabla 6.** Ensayo de gravedad específica muestra 1.

<b>PESO ESPECIFICO DEL SUELO MUESTRA 1</b>		
Temp. del ensayo ( <b>Tx</b> )	°C	20
$W_{\text{Pic.} + \text{agua temp Tx}}$ ( <b>Wa</b> )	g	333,17
$W_{\text{Pic} + \text{Muestra} + \text{agua}}$ ( <b>Wb</b> )	g	348,89
$W_{\text{Muestra Seca}}$ ( <b>Wo</b> )	g	26,13
Peso especifico suelo ( <b>Gs</b> )	$g/cm^3$	<b>2,51</b>

**Tabla 7.** Ensayo de gravedad específica muestra 2.

<b>PESO ESPECIFICO DEL SUELO MUESTRA 2</b>		
Temp. del ensayo ( <b>Tx</b> )	°C	20
$W_{\text{Pic.} + \text{agua temp Tx}}$ ( <b>Wa</b> )	g	351,16
$W_{\text{Pic} + \text{Muestra} + \text{agua}}$ ( <b>Wb</b> )	g	367,44
$W_{\text{Muestra Seca}}$ ( <b>Wo</b> )	g	26,89
Peso especifico suelo ( <b>Gs</b> )	$g/cm^3$	<b>2,53</b>



**Tabla 8.** Ensayo de gravedad específica muestra 3.

<b>PESO ESPECIFICO DEL SUELO MUESTRA 3</b>		
Temp. del ensayo ( <b>Tx</b> )	°C	20
$W_{\text{Pic.} + \text{agua temp Tx}}$ ( <b>Wa</b> )	g	351,12
$W_{\text{Pic} + \text{Muestra} + \text{agua}}$ ( <b>Wb</b> )	g	366,42
$W_{\text{Muestra Seca}}$ ( <b>Wo</b> )	g	25,45
Peso específico suelo ( <b>Gs</b> )	$g/cm^3$	<b>2,51</b>

Las Tablas 6, 7 y 8 se encuentran los resultados de los 3 ensayos realizados; promediados para obtener un resultado más preciso igual a 2,52.

### 10.2.3. CONSOLIDACIONES DE LA MUESTRA RECONSTITUIDA

La consolidación de un suelo produce un asentamiento en suelos compresibles y saturados tomando como referencia las deformaciones y cambios volumétricos a lo largo del tiempo; gracias al drenado del agua por las presiones transmitidas por una carga determinada y por la reducción que presentan los poros del suelo, Bardet, 1997.

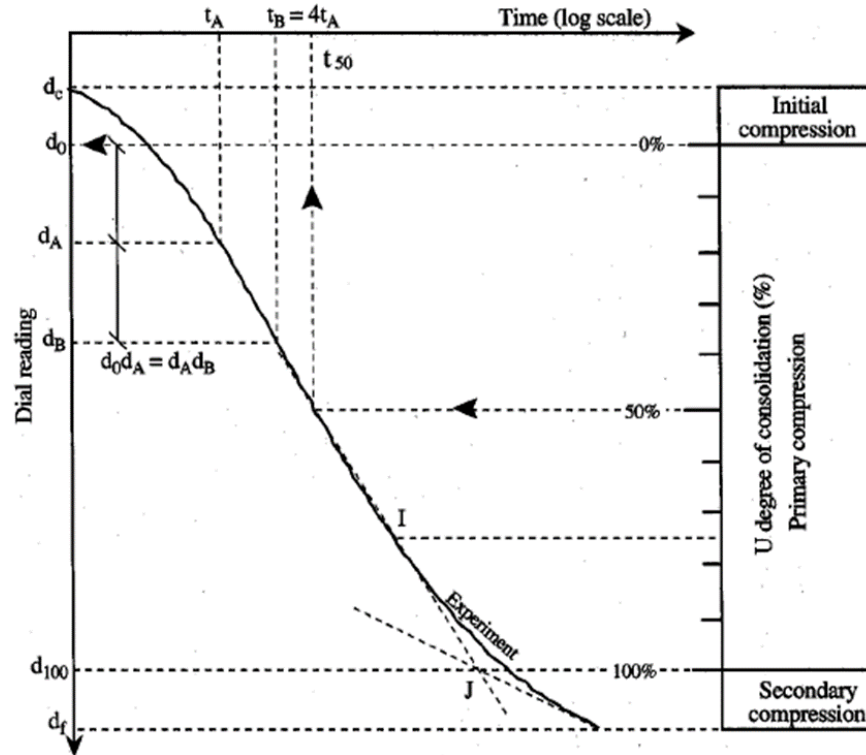
- Datos y cálculos

Para el desarrollo de las consolidaciones, se tomó en cuenta la consolidación rápida; esto, con el fin de generar unos resultados idóneos y previos a los resultados que entregaran de la Universidad Nacional.

Las Figuras 33 y 34 son los gráficos de Bardet, 1990, en donde se pueden plantear los coeficientes de consolidación para el 50%.



Figura 33. Determinación de  $C_v$  (50) con logaritmo del tiempo. Bardet, 1990



Para este ensayo se obtiene el coeficiente de consolidación al tomar la deformación y el logaritmo del tiempo al 90% por el método de Taylor; el cálculo del coeficiente de consolidación se obtiene de la ecuación 5.

$$C_v = \frac{0,848 \cdot d^2}{t_{90}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Finalmente, para obtener los resultados finales se requiere de la altura inicial ( $H$ ) de la muestra, de la altura del sólido ( $H_s$ ) y de la altura de vacíos ( $H_v$ ) con el fin de obtener la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), usando las ecuaciones 6, 7 y 8.

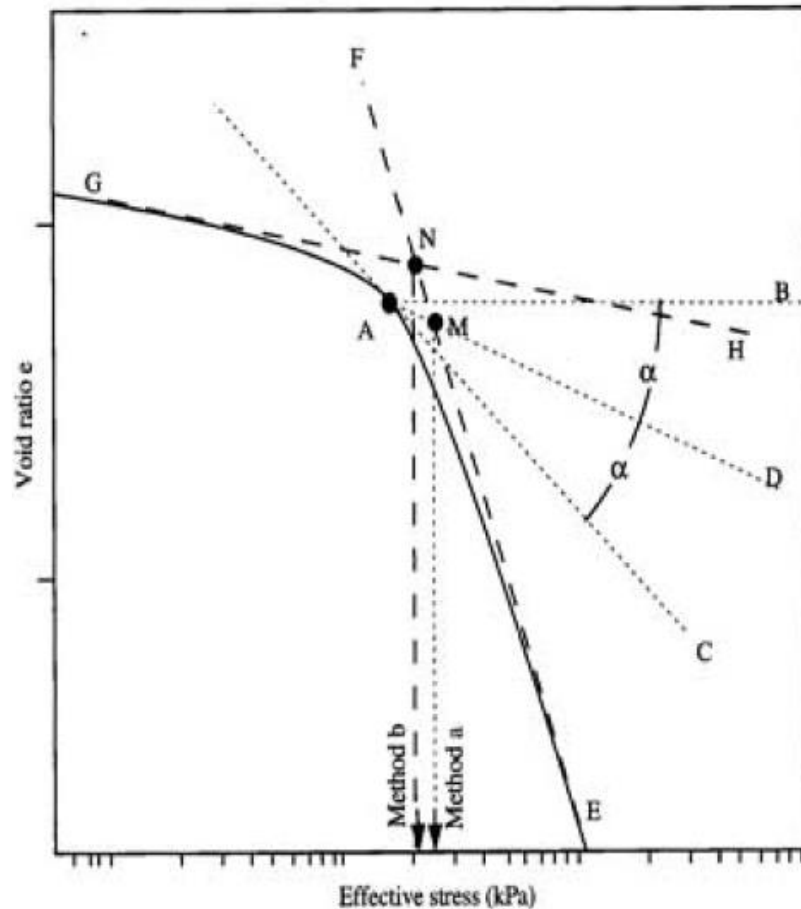
$$H_s = \frac{(W_{Anillo} + W_{muestra}) - (W_{Anillo})}{\frac{1+\omega}{A \cdot G_s}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$H_v = H - H_s \quad (\text{Ec. 7})$$

$$e_0 = \frac{H_v}{H_s} \quad (\text{Ec. 8})$$



**Figura 34.** Métodos a (Casagrande) y b para determinar presión de pre-consolidación, Bardet (1997).



La Figura 34 es una guía tomada de Bardet (1997), en la cual, el desarrollo de la presión de pre-consolidación en el punto medio entre la esquematización de los métodos a y b define el punto del esfuerzo de pre-consolidación de 100 kPa. Con los resultados de compresibilidad  $C_s$  (ecuación 10), el  $C_c$  (ecuación 11) obtenidos de Bowles, 1997 y  $C_r$  (ecuación 12), obtenido de Likos, 2014.

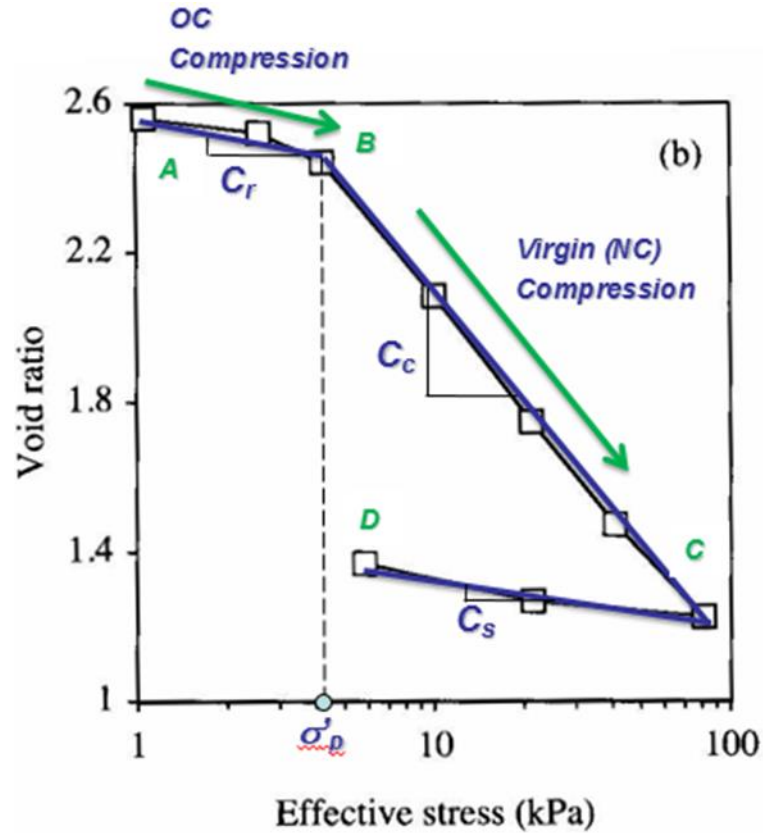
$$C_s = \left( \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma v} \right)_{A \rightarrow B} \quad \text{(Ec. 10)}$$

$$C_c = \left( \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma v} \right)_{B \rightarrow C} \quad \text{(Ec. 11)}$$

$$C_r = \left( \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma v} \right)_{C \rightarrow D} \quad \text{(Ec. 12)}$$



Figura 35. Tramos para determinar  $C_s$ ,  $C_c$  y  $C_r$ , Likos (2014).



- **Muestra 1**

La realización de este ensayo fue con el aparato de consolidación tradicional, en donde se colocan las cargas que se multiplican por la relación del brazo al peso, como se observa en la Figura 36.

Figura 36. Aparato de ensayo para consolidación.





**Tabla 9.** Dimensiones de la muestra 1.

DIMENSIONES DE LA MUESTRA	
Diámetro, D (cm)	6,372
Altura, H (cm)	2,546
$W_{\text{Anillo}}$ (g)	108,01
$W_{\text{Anillo + Muestra}}$ (g)	238,41
$W_{\text{Bloqué. + P.porosa}}$ (kg)	0,2743

Las dimensiones de la muestra se presentan en la tabla 9, además se puede ver el cambio de alturas (H) y la relación de vacíos seguida por los cálculos del índice de compresión ( $C_c$ ), el índice de recompresión ( $C_r$ ) y el índice de hinchamiento ( $C_s$ ).

H=	2,543
$H_s$ =	1,025
Hv=	1,518
eo=	1,481

Altura de Sólidos, $H_s$	(cm)	1,025
Altura de vacíos, $H_{v1}$	(cm)	1,52
Relación de Vacíos, $e_1$		1,484
Límite Líquido, LL	(LL)	71,15

Los resultados y cálculos realizados con la raíz del tiempo se encuentran en el anexo 3, esto con el fin de buscar la consolidación al 90%.

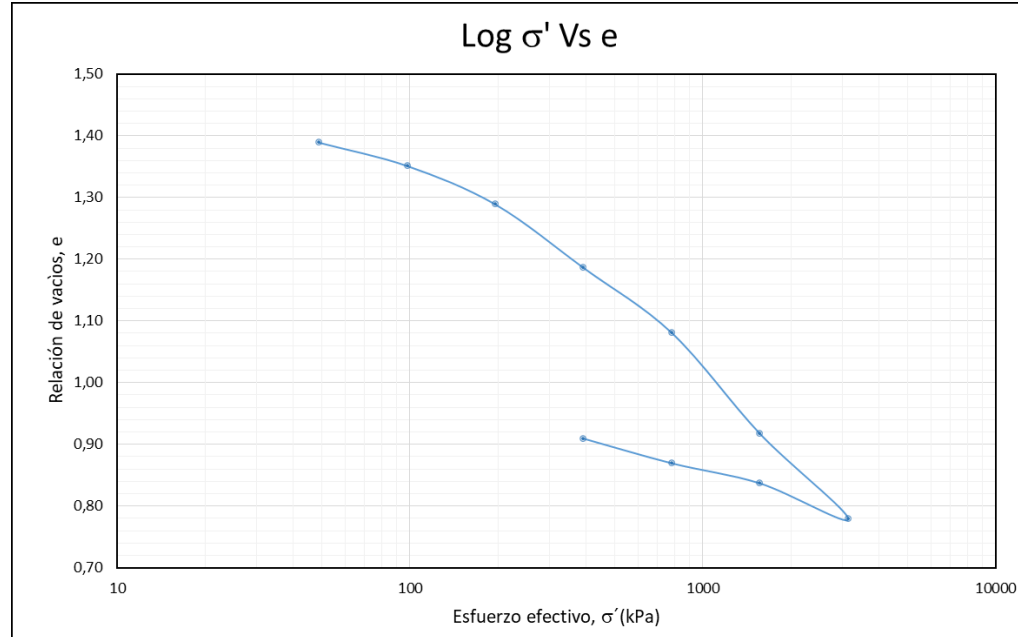
CÁLCULO $C_r$		
Punto	x	y
1	49,03	1,37
3	98,07	1,35
<b>Cr</b>		<b>0,050</b>

CÁLCULO $C_c$ (CARGA)		
Punto	x	y
4	196,13	1,29
7	3138,13	0,78
<b>Cc</b>		<b>0,147</b>

Con el desarrollo del ensayo se pudo calcular para esta muestra un esfuerzo de pre-consolidación de 240 kPa como se muestra en la Figura 37.



**Figura 37.** Método de Casagrande para determinar presión de pre-consolidación.



- **Muestra 2**

Con la muestra 2 se busca comprobar y analizar los resultados obtenidos con la muestra 1 teniendo como base las características y dimensiones de la Tabla 10.

**Tabla 10.** Dimensiones de la muestra 2.

DIMENSIONES DE LA MUESTRA	
Diámetro, D (cm)	6,338
Altura, H (cm)	2,55
$W_{\text{Anillo}}$ (g)	108,96
$W_{\text{Anillo + Muestra}}$ (g)	239,76
$W_{\text{Bloqué. + P.porosa}}$ (kg)	0,2685

Para este ensayo se va a obtener el coeficiente de consolidación al tomar la deformación para el 90%, se utilizó el método de Taylor. Finalmente, como se realizó con las ecuaciones 7, 8 y 9 se realiza el mismo procedimiento para obtener la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), esto se puede confirmar con los resultados del anexo 3.



H=	2,55
Hs =	1,0391
Hv=	1,5109
eo=	1,4540

Altura de Sólidos, $H_s$	(cm)	1,039
Altura de vacíos, $H_v$	(cm)	1,51
Relación de Vacíos, $e_1$		1,454
Límite Líquido, LL	(LL)	71,15

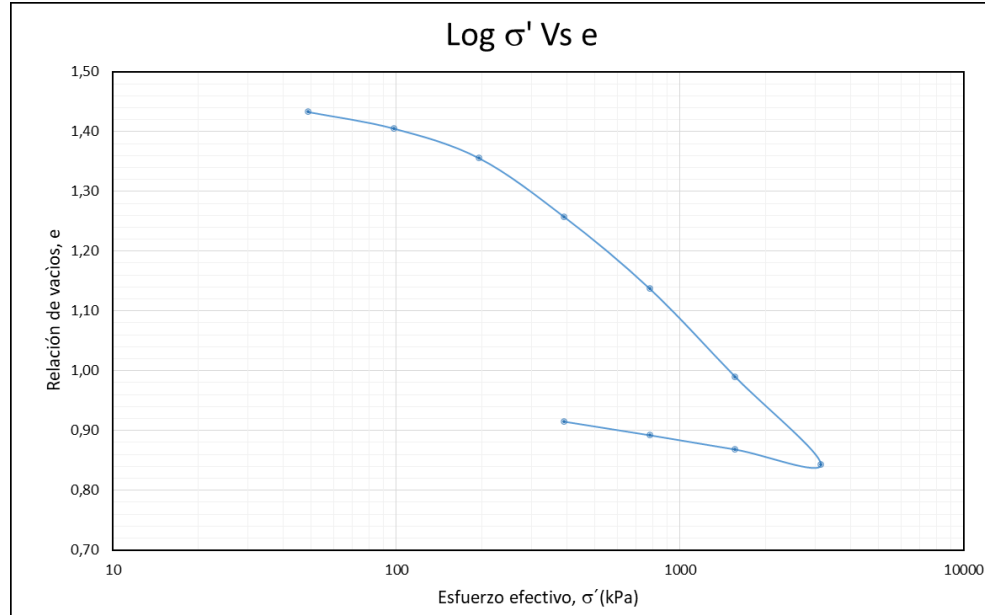
Para poder obtener los resultados  $C_c$ ,  $C_r$  y  $C_s$ , tomando como base la Figura 9, entre los puntos A-B, B-C y C-D se encuentran los datos para desarrollar las formulas planteadas por Bowles, 1997 y Likos, 2014, el esfuerzo de pre-consolidación que se calculó es de 280 kPa.

<b>CÁLCULO <math>C_r</math></b>		
Punto	x	y
1	49,03	1,43
3	196,13	1,36
<b>Cr</b>		<b>0,129</b>

<b>CÁLCULO <math>C_c</math> (CARGA)</b>		
Punto	x	y
4	196,13	1,36
7	3138,13	0,84
<b>Cc</b>		<b>0,148</b>



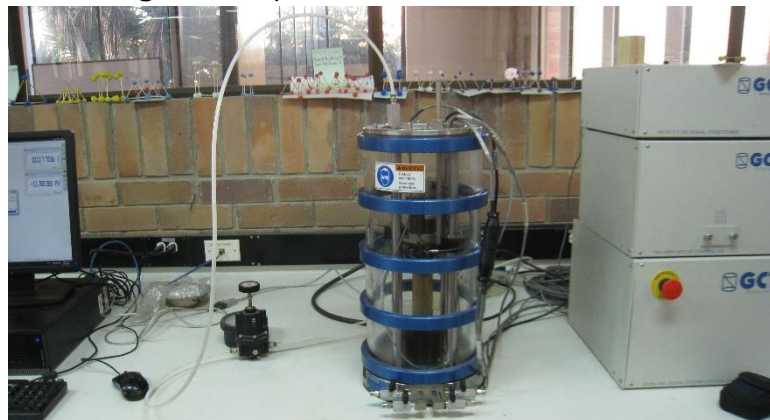
**Figura 38.** Método de Casagrande para determinar presión de pre-consolidación.



## 11. COLUMNA RESONANTE

El ensayo y objeto principal de este proyecto se basa en la realización de la columna resonante (Imagen 7) guiado por la Norma *ASTM D4015-15e1*; este es un ensayo realizado con un aparato *GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems)* como se muestra en la Imagen 4, es un ensayo en donde se obtienen parámetros que indican los cambios de amplitud de deformaciones de corte en un rango entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-4}$ . (Ishihara, 1966), estos parámetros son: frecuencia de resonancia, deformación de corte, módulo de corte y amortiguamiento (*Damping*).

**Imagen 7.** Se presenta la Columna Resonante.





La Universidad Santo Tomás tiene en sus laboratorios un aparato de Columna resonante que incluye un detector láser de deformación angular, que se encarga de realizar la medición del ángulo de giro de la parte superior de la muestra y que se encuentra en contacto con el motor (*Drive*) el cual aplica el torque, tiene un *LVDT* (*Linear Variable Differential Transformer*), este elemento es un sensor que permite realizar mediciones en un eje axial de la muestra con un rango de medida aproximado de 6 mm (en el anexo 4 se encuentran las partes de la columna con más detalle).

**Imagen 8.** Partes de la Columna Resonante.



Este ensayo tiene un software especializado *GCTS* que lo hace único; este permite que las propiedades y las dimensiones de la muestra a ensayar sean especificadas, además se puede variar el rango de frecuencias en las cuales se desarrollara el mismo y permitirá al final de este realizar una recopilación de datos que se transcribirán para poder ser analizados. Por otro lado, para realizar la lectura del torque se utiliza una unidad de medida llamado *pfs* (*Percent Full Scale*) que es equivalente a:  $1 \text{ pfs} = 0,023 \text{ N.m}$ .

Durante el proceso de reconstitución se pudieron realizar ensayos de prueba en el aparato de columna resonante con el fin de ir mecanizando el procedimiento y el manejo del equipo, a su vez, permitió dar un balance aproximado del desarrollo del ensayo, cuyo tiempo estimado para realizar de forma adecuada es de 3 horas y 30 minutos para una sola muestra.



### 10.3. RESULTADOS COLUMNA RESONANTE

Las muestras M1 y M2 son las muestras correspondientes a la reconstitución de 50 kPa como se muestra en la Tabla 11, sin embargo, solo estas muestras tuvieron que ser comprimidas durante un tiempo de 24 horas a 80 kPa con el fin de rigidizarlas, logrando así realizar el respectivo ensayo, esto debido a que las muestras reconstituidas por si solas no soportaban la carga del *Drive* y se aplastaban.

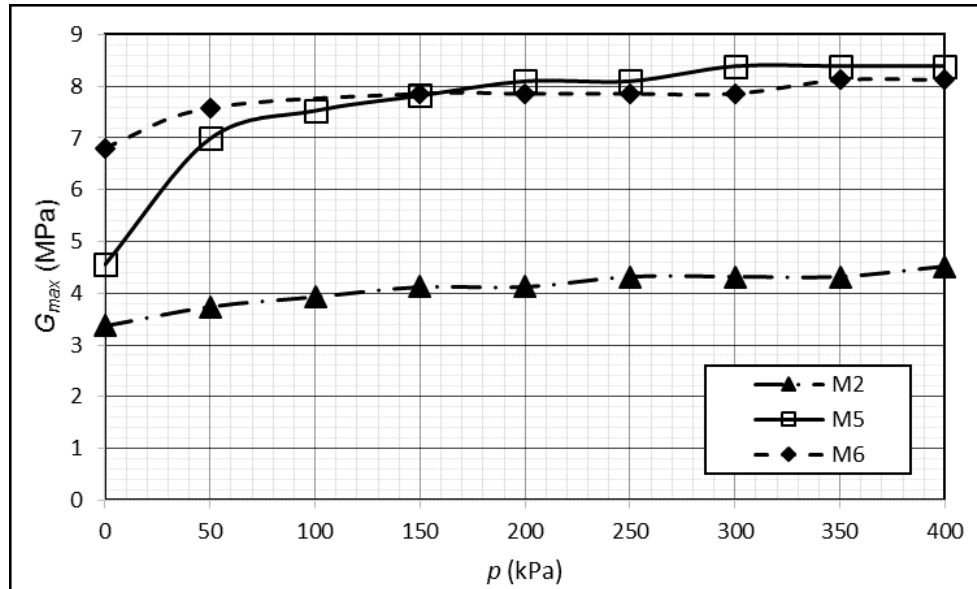
**Tabla 11.** Descripción de muestras reconstituidas.

Nomenclatura	Descripción	$\omega$ (%)	S (%)	$e_0$	Secado (horas)	USCS	Esfuerzo de confinamiento (kPa)
M1	Muestra consolidada edométricamente a 50 kPa. Precompresion de 80 kPa	53,32	62,01	1,40	-	CH	$p = 80$
							$0 < p < 400$
M2	Muestra consolidada edométricamente a 50 kPa. Precompresion de 80 kPa	53,32	65,15	1,32	-		$p = 80$
							$0 < p < 400$
M3	Muestra consolidada edométricamente a 50 kPa	40,56	70,75	1,09	24		$0 < p < 400$
M4	Muestra consolidada edométricamente a 50 kPa	31,90	75,42	0,91	48		$0 < p < 400$
M5	Muestra consolidada edométricamente a 100 kPa	59,30	58,91	1,48	-		$0 < p < 400$
M6	Muestra consolidada edométricamente a 100 kPa	59,30	61,27	1,47	-		$0 < p < 400$
M7	Muestra consolidada edométricamente a 100 kPa	48,17	67,33	1,21	24	$0 < p < 400$	
M8	Muestra consolidada edométricamente a 100 kPa	37,61	74,10	1,00	48	$0 < p < 400$	

La Figura 39 presenta los resultados de la variación del módulo de corte ( $G_{m\acute{a}x}$ ) con respecto a un cambio de presión de confinamiento ( $p$ ), allí se puede observar el aumento del módulo mientras la presión se incrementa; debido al aumento proporcional de ambas variables la resistencia a la deformación cortante y la rigidez se incrementan por el aumento del número de enlaces que presenta partícula-partícula, asociado al proceso de acomodamiento de partículas, como lo expone Mitchell y Soga, 2005.

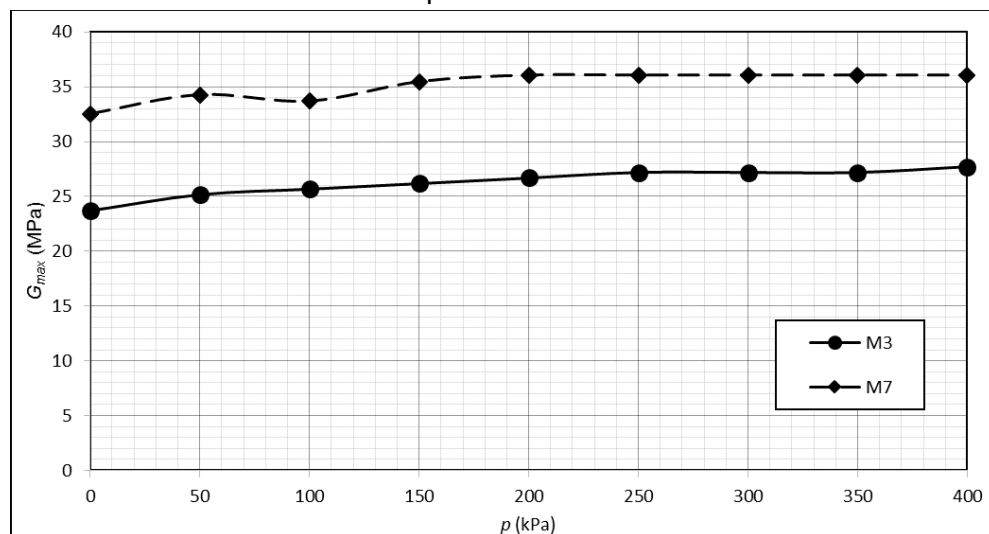


**Figura 39.** Variación del Módulo de Corte ( $G_{m\acute{a}x}$ ) con la presión de confinamiento ( $p$ ), después de reconstitución.



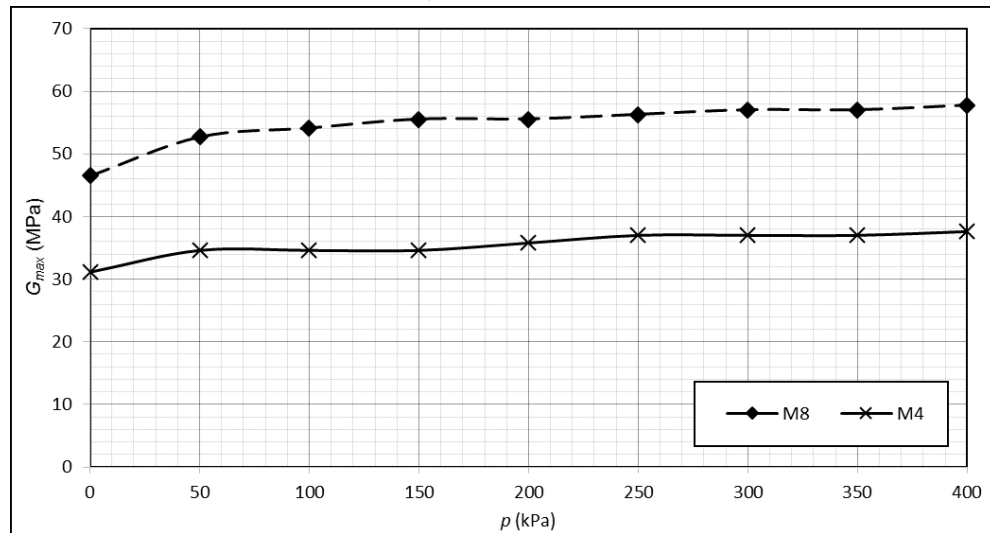
Las Figuras 40 y 41 presentan los resultados de los cambios de humedad de las muestras secas a 24 horas y 48 horas respectivamente; al observar los resultados el módulo de corte tiene un aumento con respecto al estado inicial de la muestra, esto expone que los cambios de humedad definen la rigidez dinámica del suelo.

**Figura 40.** Variación del Módulo de Corte ( $G_{m\acute{a}x}$ ) con la presión de confinamiento ( $p$ ), reconstituido después de 24 horas de secado.





**Figura 41.** Variación del Módulo de Corte ( $G_{m\acute{a}x}$ ) con la presión de confinamiento ( $p$ ), reconstituido después de 24 horas de secado.



**Tabla 12.** Peso unitario de muestras naturales, Pineda, Cruz y Ávila, 2017.

Muestras naturales	Densidad ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	$g$ ( $\text{cm}/\text{s}^2$ )	Peso unitario ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
M1	1445,72	981	14,18
M2	1411,919	981	13,85
M3	1414,8	981	13,88
		Promedio	13,97

Para generar una hipótesis de la profundidad de las muestras reconstituidas se tomaron en cuenta los datos de la Tabla 12 con el fin de obtener el peso unitario de las muestras naturales. Con el fin de obtener un aproximado teórico de la profundidad en la Tabla 13 se expresa el esfuerzo vertical por la profundidad dando como resultado que para un esfuerzo vertical de 50 kPa la profundidad es de 3,6 m y para 100 kPa la profundidad sería de 7,2 m.

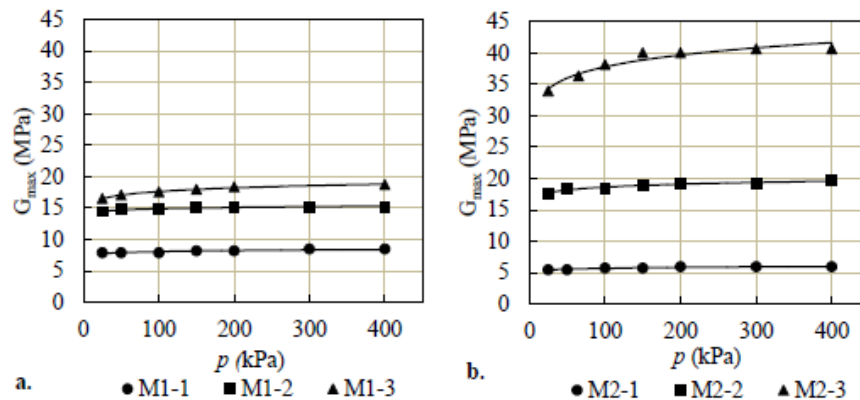


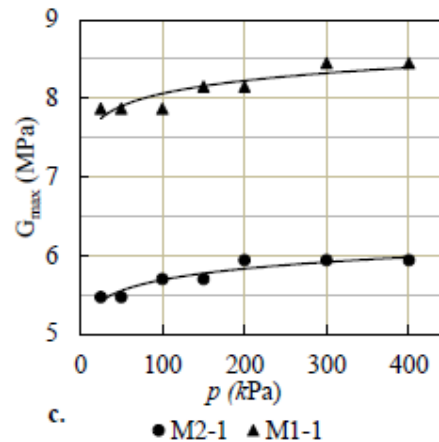
**Tabla 13.** Profundidad de muestras naturales y reconstituidas.

Profundidad (m)	$\sigma_v$ (kPa)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )
1	13,97	13,97
2	27,94	13,97
4	55,88	13,97
4	50	14
6	83,83	13,97
7	101	14
8	111,77	13,97
11	153,68	13,97
15	209,56	13,97

Siendo la humedad un factor importante en el incremento de la rigidez del suelo, la sola reconstitución del suelo no presenta cambios relevantes en comparación con los ensayos de las muestras naturales de la Figura 42, Pineda, Cruz y Ávila (2017) presentaron los resultados de las arcillas naturales del Occidente de la Sabana de Bogotá a los cuales se les realizó después la reconstitución que es el objeto de este trabajo, con estos resultados se comprueba que el material reconstituido solo aumento de módulo de corte después de secarse.

**Figura 42.** Variación del Módulo de Corte ( $G_{max}$ ) con la presión de confinamiento ( $p$ ), natural. (Pineda, Cruz y Ávila, 2017).





Por otra parte, la función de las curvas del módulo con aumento de esfuerzo isotrópico se expresa por:

$$G_{m\acute{a}x} = A * (\rho)^B$$

En donde  $\rho$  es el esfuerzo de confinamiento.

La Tabla 14 muestra los resultados en donde A y B son las mejores constantes de regresión de potencia que mejor se ajustan (Pineda, Colmenares, & Hoyos, 2014) para cada una de las muestras. En las muestras reconstituidas a 50 kPa se observa un cambio notable en A entre M3 y M4 debido a la diferencia de tiempo de secado, esto implica una mayor pérdida de humedad y un aumento proporcional de rigidez en M4 con respecto a M3.

Para las muestras reconstituidas a 100 kPa los cambios no se ven reflejados debido a su previo procedimiento de reconstitución, en donde un mayor esfuerzo implicó un menor volumen de agua al final del ensayo, por tanto los cambios de humedad no ejercerían un cambio sustancial en los resultados debido a su composición derivaba en más sólidos que vacíos.

**Tabla 14.** Función de las curvas  $G_{m\acute{a}x}$  VS  $\rho$ .

Nomenclatura	A	B	R <sup>2</sup>
M1	4,175	0,187	0,966
M3	20,847	0,047	0,965
M4	44,547	0,043	0,981
M6	6,333	0,040	0,664
M7	28,372	0,046	0,796
M8	29,848	0,033	0,725

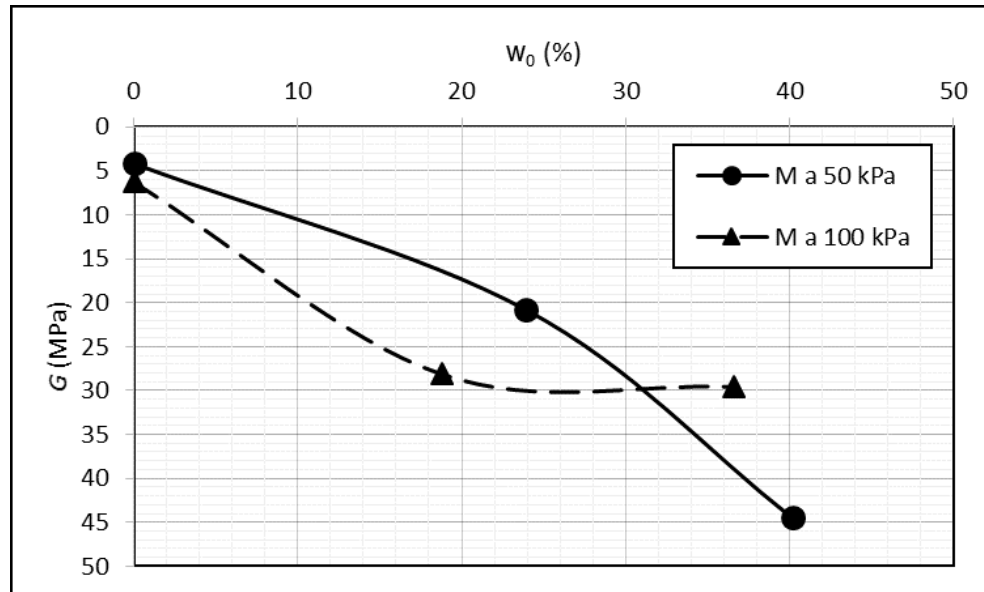


**Tabla 15.** Variación de humedad de las muestras reconstituidas.

$p = 0$	Nomenclatura	w (%)	Variación w (%)	G (Mpa)	Variación G
50 (kPa)	M1	53,32	0	4,148	
	M3	40,56	23,9	20,813	5,0
	M4	31,90	40,2	44,511	10,7
100 (kPa)	M6	59,30	0	6,230	
	M7	48,17	18,8	28,079	4,5
	M8	37,61	36,6	29,535	4,7

En la tabla 15 y en la Figura 43 se presentan las variaciones de la humedad junto con los cambios que presenta  $G$  en una presión de confinamiento igual a 0 kPa, en esta tabla se puede observar que para la muestra a 50 kPa la variación de humedad entre la inicial y las 48 horas de secado hay un cambio del 40,2% cuando se presenta un incremento de  $G$  del 53,2%; por otra parte no ocurrió lo mismo con la muestra a 100 kPa que tuvo una variación del 36,6% y un aumento del módulo del 72% en M7 y solo 4,9 en M8, esto indica que el cambio principal se generó durante las primeras 24 horas..

**Figura 43.** Variación de la humedad en las muestras reconstituidas con  $p=0$ .



### 10.3.1. DEGRADACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE

La Figura 44 muestra la degradación del módulo de corte normalizado ( $G/G_{máx}$ ) con respecto a la deformación de corte ( $\gamma$ ), en esta se puede observar que

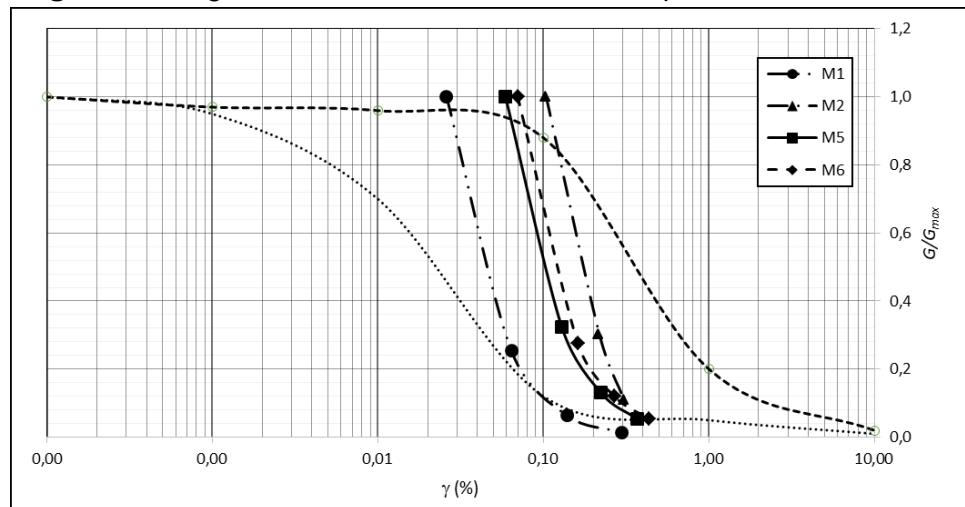


mediante aumenta la deformación de corte el modulo va disminuyendo, esto se debe a que la muestra va perdiendo rigidez.

Dado que las curvas de Vucetic and Dobry (1991) fueron realizadas para suelos sedimentados, el comportamiento de los suelos reconstituidos no presenta una similitud homogeneizada en comparación con las curvas previamente mencionadas, sin embargo, es probable que al realizar el ensayo *RC* lo que primero ocurriría sería la desintegración en forma de estructura de los sólidos que se encuentran bajo unidos por el esqueleto de la muestra.

A diferencia de las muestras naturales, el comportamiento de las reconstituidas es una degradación del módulo de corte con mayor rapidez, sumado al hecho, la humedad es un elemento determinante para tener cambios durante el desarrollo de los ensayos.

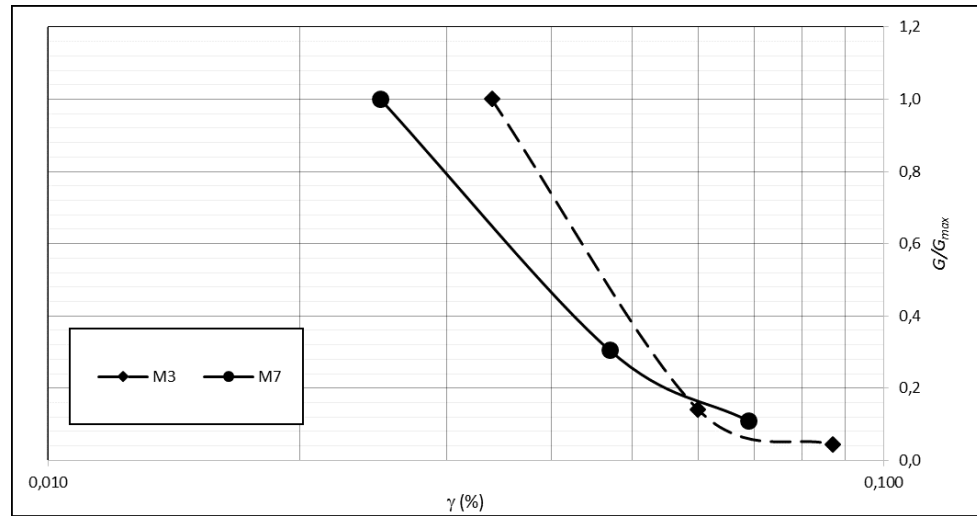
**Figura 44.** Degradación del Módulo de Corte después de reconstitución.



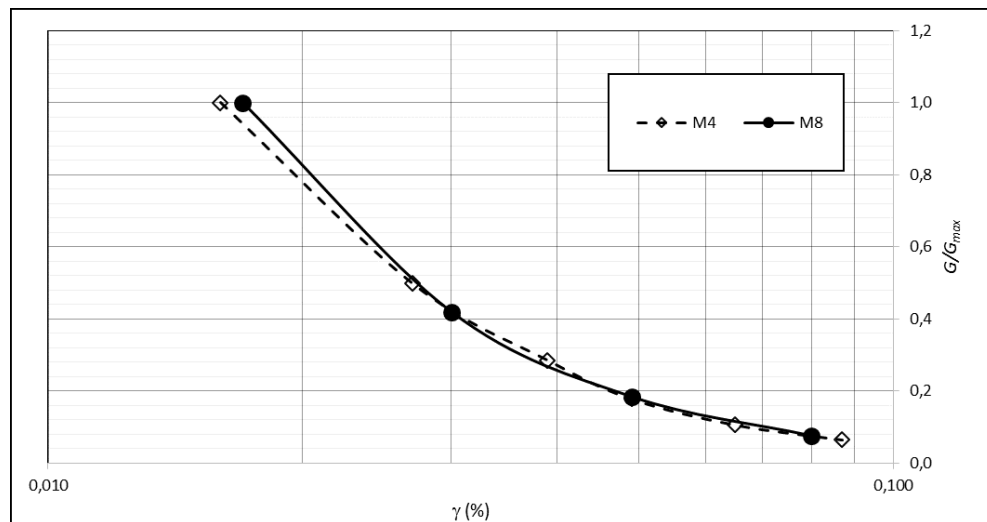
En la Figura 45 y 46 se muestran las degradaciones de las muestras secas a 24 horas y 48 horas respectivamente, donde se observa que entre mayor es la humedad más rápidamente se deforma, esto implica que a mayor rigidez y menor contenido agua más tiempo tarda en deformarse.



**Figura 45.** Degradación del Módulo de Corte, reconstituido después de 24 horas de secado.



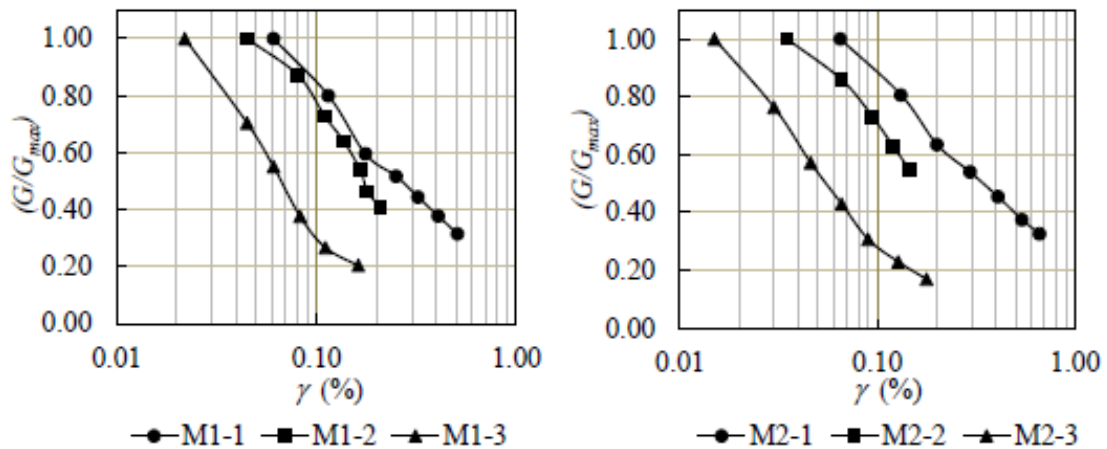
**Figura 46.** Degradación del Módulo de Corte, reconstituido después de 48 horas de secado.



Con los resultados de la Figura 44 se puede comparar que las muestras reconstituidas se deforman más rápido que las muestras naturales de la Figura 47 al deformarse más cerca de 0,1% mientras que las naturales lo hacen más cerca de 1%; las muestras M5 y M6 que fueron sometidas a esfuerzo de 100 kPa muestran un comportamiento muy similar al de las muestras naturales, en cambio las muestras M1 y M2 que fueron sometidas a 50 kPa no lograron tener un punto de similitud entre las mismas, además durante el ensayo fueron las que fallaron antes de concluir el ensayo de columna.

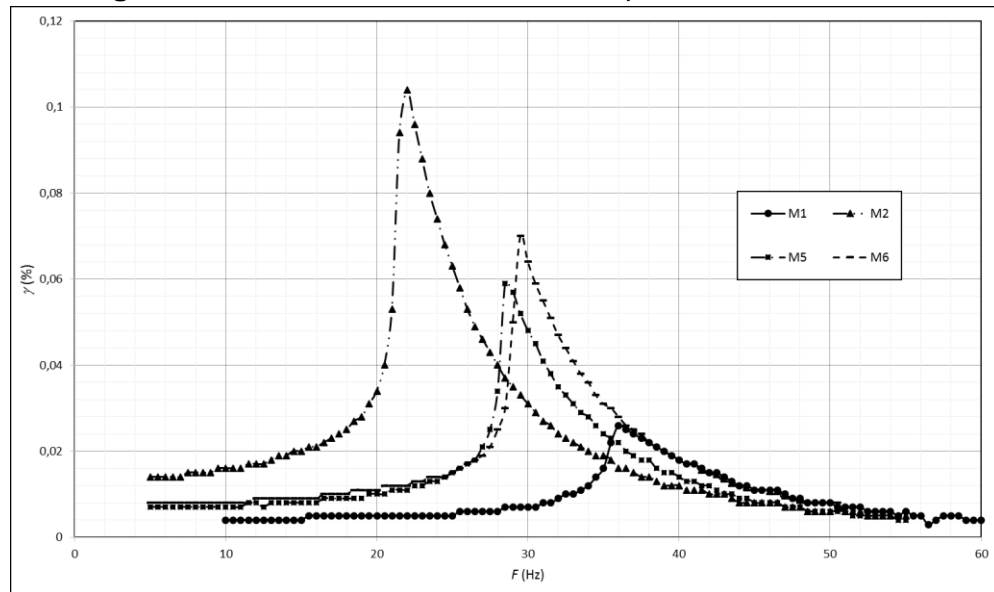


**Figura 47.** Degradación del Módulo de Corte de muestras naturales, (Pineda, Cruz y Ávila, 2017.).



En la Figura 48 se presentan las frecuencias de resonancia de las muestras reconstituidas sin secar; estos resultados tuvieron una variación importante en la muestra M1 y M2 debido a su poca resistencia se debieron someter a la cámara de la columna y se dejaron comprimidas para obtener una mayor resistencia.

**Figura 48.** Frecuencia de resonancia después de reconstitución.

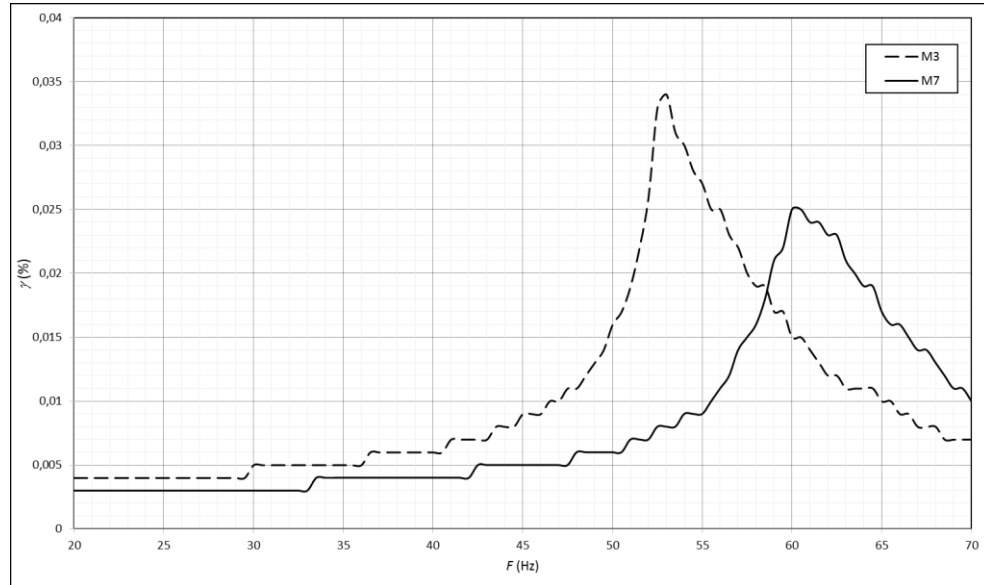


Las frecuencias de la Figura 48, 49 y 50 corresponden a un confinamiento de 400 kPa con una fuerza de torque ejercida a 1 pfs (0,023 N.m); las muestras reconstituidas a 50 kPa son las que presentan cambios en todos los estados de humedad viéndose reflejado en las frecuencias de resonancia, su contenido de



agua inicial y su posterior secado hacen variar las frecuencias; en la primera etapa de secado se presentó un cambio mayoritario de cómo se puede ver en la Figura 10, sin embargo, al dejarla a las 48 horas su comportamiento volvió a ser menor que la muestra a 100 kPa.

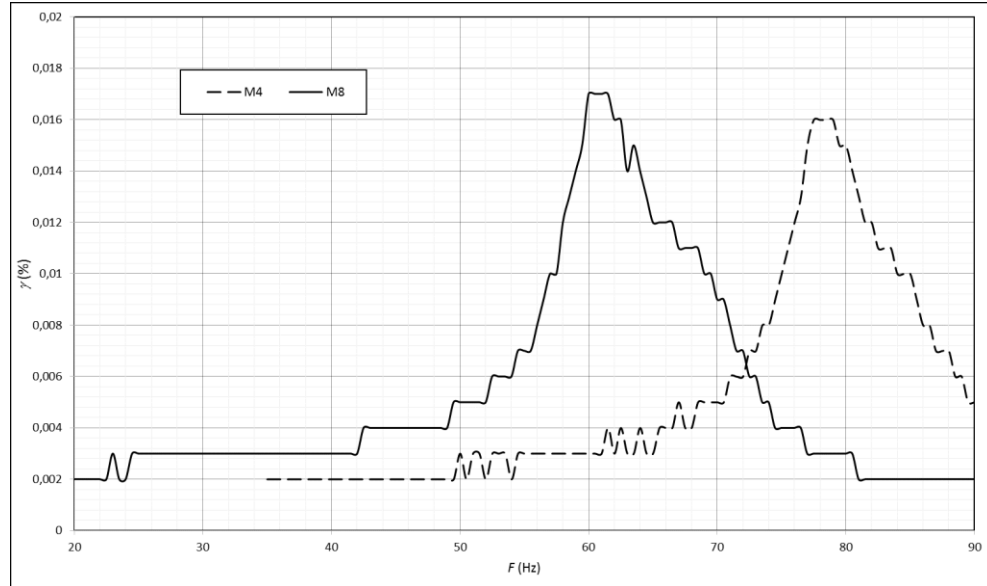
**Figura 49.** Frecuencia de resonancia, reconstituido después de 24 horas de secado.



Este comportamiento tan variado se debe también a la rigidez del material, al tener cambios de humedad la composición de la muestra se va endureciendo debido a que se disipan los vacíos y van quedando los sólidos.

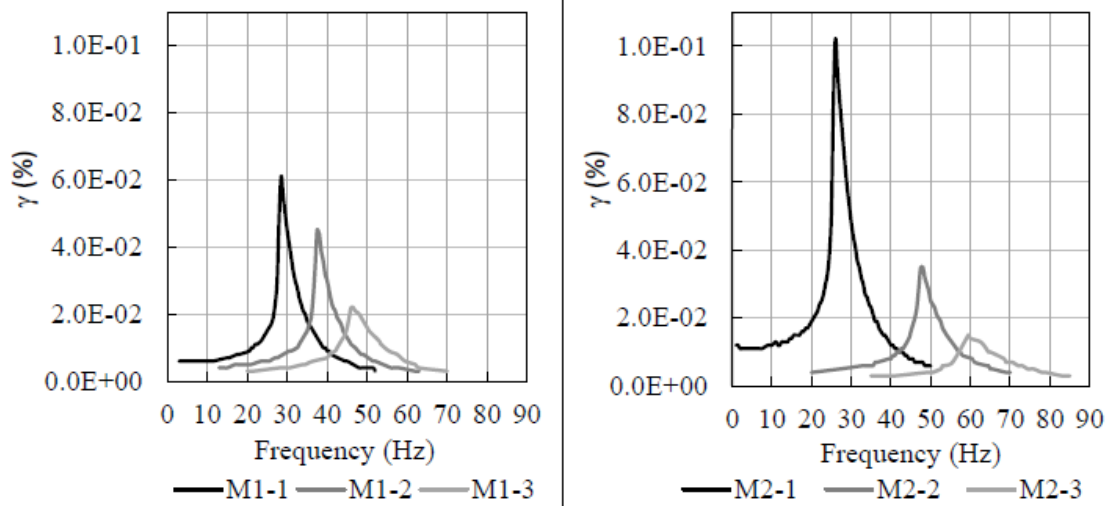


**Figura 50.** Frecuencia de resonancia, reconstituido después de 48 horas de secado.



Si bien, las muestras reconstituidas tienen patrones de cambio intensos con el cambio de humedad, las muestras naturales desvelan un cambio más exponencial y homogéneo puesto que al ir secándose las muestras presentan aumentos en las frecuencias, menores deformaciones y un incremento similar al cambio en la rigidez como se puede ver en la Figura 51.

**Figura 51.** Frecuencia de resonancia de muestras naturales, (Pineda, Cruz y Ávila, 2017.).





En la Figura 52 se presenta el amortiguamiento (*Damping*) con la presión de confinamiento en aumento hasta 400 kPa. Tomando como base el comportamiento opuesto al presentado en el módulo de corte de las Figuras 1, 2 y 3 el amortiguamiento tiende a disminuir mientras la presión aumenta; esta propiedad es un comportamiento dinámico que se refiere a la disipación de energía después de ejercer un movimiento sobre la muestra, es decir, que mientras el tiempo avanza su movimiento se ve reducido.

Figura 52. Amortiguamiento después de reconstitución.

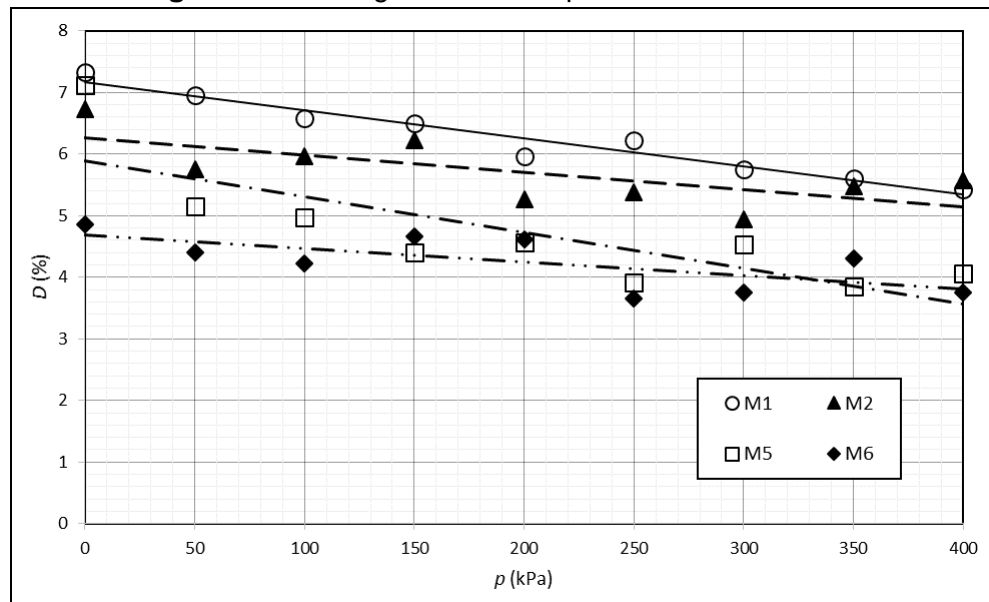
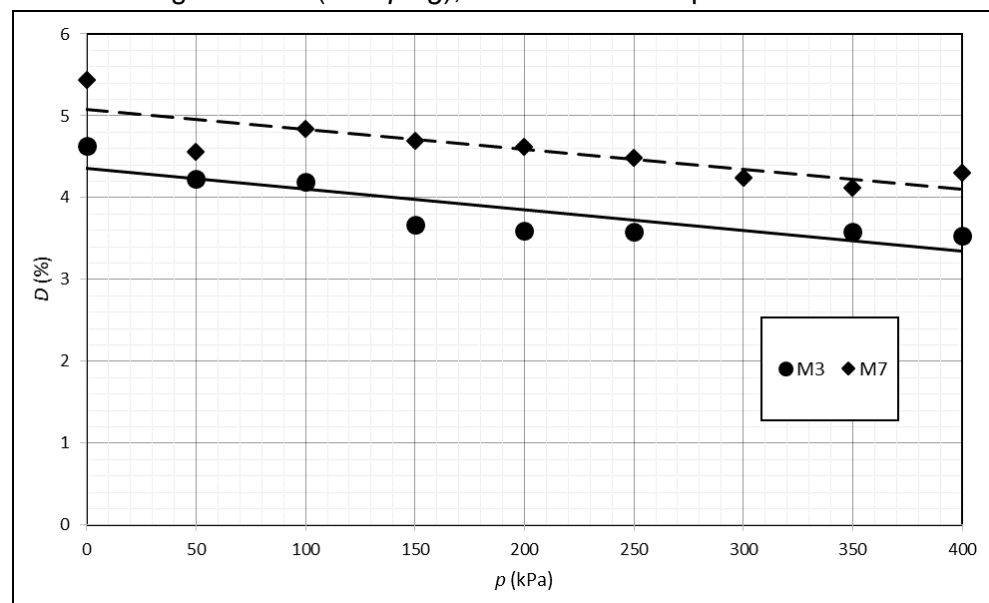


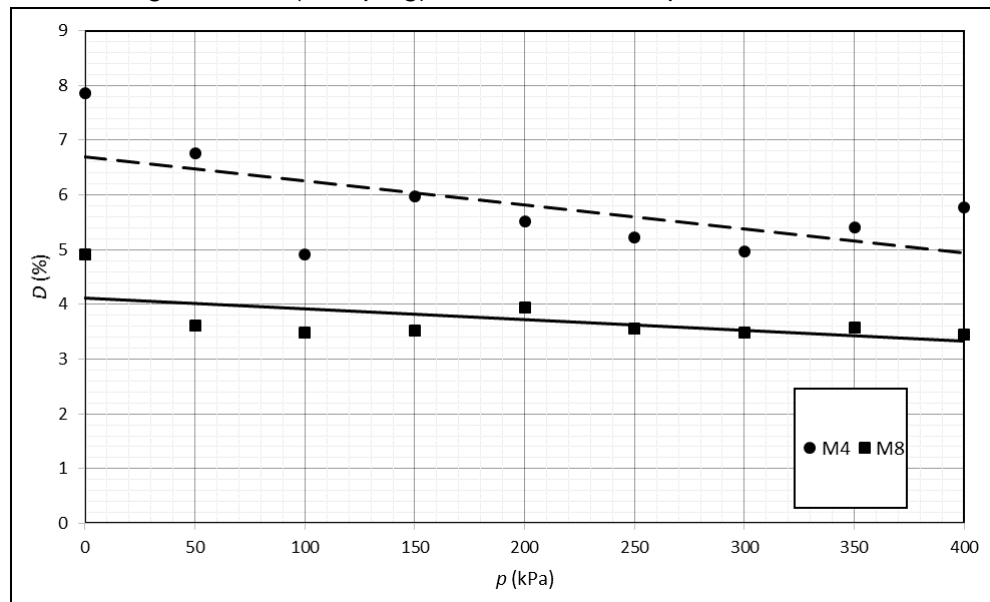
Figura 53. Amortiguamiento (*Damping*), reconstituido después de 24 horas de secado.





En las Figuras 52 y 53 donde los cambios de humedad se hacen presentes se puede observar una importante variación; en las muestras sometidas a 50 kPa se puede ver un aumento de amortiguamiento sin embargo, el amortiguamiento dado a las 48 horas presenta un cambio de aproximadamente un 2% mientras que a las 24 horas es de 1% esto se puede dar por el aumento en la resistencia y la reducción de la humedad que presenta a las 48 horas además es probable que la muestra pueda presentar microfisuras con mayor facilidad.

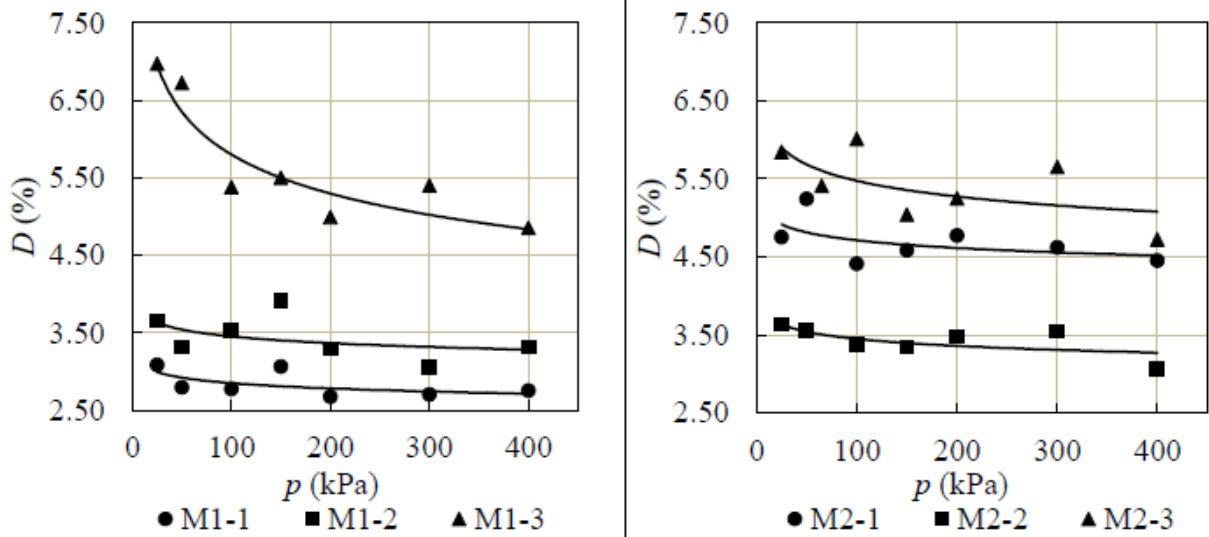
**Figura 54.** Amortiguamiento (*Damping*), reconstituido después de 48 horas de secado.



El material natural de la Figura 55 presenta unos resultados relevantes en comparación con la Figura 14, debido a la reconstitución del material se aumenta el porcentaje del amortiguamiento en las muestras, mientras que en el material natural se tiene un amortiguamiento promedio de 3% entre las 6 muestras que presentó Ávila, las muestras reconstituidas tienen un promedio de 6% entre 4 muestras, a lo cual, la reconstitución aportó una mayor resistencia a comportamientos dinámicos.



**Figura 55.** Amortiguamiento (*Damping*) de muestras naturales, (Pineda, Cruz y Ávila, 2017.).



## CONCLUSIONES

En esta investigación se continuó con un lineamiento de trabajo que presento Ávila (2017), usando las arcillas lacustres del Occidente de la Sabana de Bogotá se implementó un cambio importante sobre las muestras: la reconstitución o remoldeo del material. Realizando el mismo ensayo de columna resonante para obtener respuestas dinámicas se determinaron las propiedades por medio del módulo de corte y el amortiguamiento, además se realizaron diferentes cambios controlados del contenido de humedad y saturación, esto con el fin de dar una respuesta positiva sobre el tratamiento de los suelos reconstituidos y si es factible para su mejoramiento en obra.

La primera etapa se compone de la reconstitución de 2 muestras que fueron sometidas a 2 cargas diferentes: 50 kPa y 100 kPa. Al finalizar el ensayo se podía observar que la muestra a 50 kPa no tenía una resistencia a la compresión estable y su contenido de humedad lo afectaba, siendo la muestra que mayor tiempo permaneció bajo consolidación no cumplía con las propiedades para realizar el ensayo de columna resonante y debido a esto se tuvieron que someter algunas muestras a compresiones controladas para elevar su resistencia.

Por otra parte, la muestra que fue sometida a 100 kPa logro tener una mayor resistencia y un contenido de agua optimo, esto permitió realizar los ensayos dinámicos y obtener resultados positivos.



La segunda etapa se compuso de dos fases la primera era realizar los ensayos dinámicos y la segunda era variar el contenido de agua y la saturación en tiempos de 24 horas y 48 horas. Los resultados de las muestras reconstituidas sin variar el contenido de agua tenían un incremento positivo del 3% en las respuestas del amortiguamiento con respecto a las naturales, seguido a estas las muestras a 50 kPa mostraron un comportamiento mayor ante dicha respuesta mientras que las muestras a 100 kPa no tuvieron los mismos resultados y estuvieron por debajo de las muestras reconstituidas. A pesar de tener un comportamiento negativo en la respuesta dinámica debido a que se pueden presentar microfisuras con mayor facilidad; las muestras a 100 kPa no presentaron cambios al comportamiento natural en la degradación del módulo y para la variación del módulo de corte tuvieron un comportamiento que mejora las condiciones del estado natural, llegando a tener una resistencia mayor.

Los cambios de humedad que se presentaron en la muestra reconstituida a 50 kPa son mayores que en los de la muestra a 100 kPa, este dato se puede probar con el mismo esfuerzo del remoldeo, una mayor carga genera una consolidación mayor del material y por tanto se generan menores vacíos, a su vez, esto produce una menor capacidad para drenar el agua que permanezca dentro de la muestra mientras que los sólidos se reordenan y se acoplan generando una mayor resistencia.

Como una parte teórica se calculó la profundidad a la cual estarían las muestras reconstituidas, dando como resultado 36 m para 50 kPa y 72 m para 100 kPa, estas muestras estarían entre 2 y 4 veces la mayor profundidad en comparación con las muestras naturales.

Las muestras reconstituidas tienen una respuesta dinámica positiva en comparación con las muestras naturales, sin embargo, si se trabaja sobre muestras que tengan un esfuerzo de reconstitución menor a 50 kPa no se logra obtener una resistencia óptima, teniendo que realizar procesos de pre-compresión con el fin de elevar la resistividad del material.



## BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN, E. (1989). *Respuesta dinámica de los suelos*. Vol. 24. Pg. 309-310. *Física de la tierra*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

ASTM D4015-15e1, *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTWOOD ROJAS, HILTON LEE. (2013/03/28). *Capacitación e ingeniería. Efecto de los suelos blandos en el comportamiento estructural*. Recuperado de <https://capacitacioneingenieria.wordpress.com/2013/03/28/efecto-de-los-suelos-blandos-en-el-comportamiento-estructural/>

BARDET, J.P. (1997). *Experimental soil mechanics*. Prentice Hall, Inc. Chapter 6. Pg. 296-359.

BELTRÁN M. L. (1991). *Expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados primera parte*. Primer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y de Estructuras. Bogotá D.C, Colombia.

BETANCOURT, F. (1996). *Diagrama de estado para una arcilla típica de la Sabana de Bogotá*. Capítulo 4, pg. 117 – 135.

BOWLES, J. E. (1997). *Foundation analysis and design*. The McGraw-Hill Companies, Inc. Fifth edition. Chapter 2. Pg. 56-90.

BRAJA M. Das. (2008). *Advanced soil mechanics*. Taylor & Francis Editorial. Third edition. Pg. 317.

BURLNAD, J. B. (1990). *On the compressibility and shear strength of natural clays*. *Géotechnique*. Vol. 40, No. 3, 329-378.

BURLAND, J.B., RAMPELLO, S., GEORGIANNON, V. N. & CALABRESI, G. (1996). *A laboratory study of the strength of four stiff clays*. *Géotechnique*. Vol. 46, N° 3, 491-514.

CAMACHO TAUTA, Javier Fernando. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*. Tesis doctoral. Universidad Técnica de Lisboa Instituto Técnico Superior. Lisboa. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/264862188>



*Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*

CAMACHO TAUTA, J. F., REYES ORTIZ, O.J. & JIMÉNEZ ÁLVAREZ, J. D. (2013). *Comparison between resonant-column and bender element tests on three types of soils. DYNA, Vol. 80, N° 182, Pg. 5.*

CHANDLER R. J. (2000). *Clay sediments in depositional basin: the geotechnical cycle. The quarterly journal of engineering geology and hydrology, Vol. 33, No. 1, pg. 7-39.*

CHICANGANA, Germán, VARGAS JIMÉNEZ, Carlos Alberto, KAMMER, Andreas, CANEVA, Alexander, SALCEDO HURTADO, Elkin & GÓMEZ CAPERA, Augusto. (2015). *La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud  $M > 7.0$ , cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero. Cuadernos de geografía: Revista colombiana de geografía Vol. 24, N° 2.*

DAVISON GALVIS, Kevin y MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, Esteban. (2016). *Implementación del balance hídrico (climático, suelo y agrícola) generando el diagnóstico de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chicú. Tesis de pregrado. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C, Colombia.*

ECHVERRIA DURAN, Yadira, TAPIA, Arkin A. & CAMACHO ASTIRGARRABIA, Eduardo. (2014). *Amenaza sísmica y respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de puerto armuelles. Instituto de geociencias, Universidad de Panamá. Recuperado de [http://www.panamaigc-up.com/wp-content/uploads/2014/11/Puerto-Armuelles-Amenaza-Sismica-y-Respuesta-de-Sitio\\_final.pdf?x66093](http://www.panamaigc-up.com/wp-content/uploads/2014/11/Puerto-Armuelles-Amenaza-Sismica-y-Respuesta-de-Sitio_final.pdf?x66093)*

FATTAH, Mohammed Y., YAHYA, Asma Y., AL-HADIDI, Maysam Th. and AHMED, Balqees A. (2013/03). *Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils. European Scientific Journal. Vol.9, No.9.*

FREDLUND, D. G. & XING, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, N° 4. Pg. 521-532.*

GALLEGOS, G., LEAL, J. C., ROJAS, E., HORTA, J. A. & MARTÍNEZ, E. I. (2011/12). *Obtención de la curva de retención mediante el análisis*



*de imagen y el modelo probabilista. Revista de la Construcción, Vol. 10 N° 3, Pag. 75-85.*

*GCTS. Testing Systems. (Junio, 2014). TSH-100 and CATS-RC/TSH. Resonant Column/Torsional Shear Testing System and CATS Module.*

*GIULIANI, F. y SUAREZ, R. (1964). Límites de compactación y compacidad relativa de suelos. Materiales de construcción. Vol. 14, N° 114. Pag. 9-15.*

*GUERRERO, Faustto (2011/09/16). Origen del sismo. Ciencias de la tierra (geología-geografía). Recuperado en [http://csdelatierra2011proffaustto.blogspot.com.co/2011/09/actividades-sismicas-y-volcanicas-del\\_16.html](http://csdelatierra2011proffaustto.blogspot.com.co/2011/09/actividades-sismicas-y-volcanicas-del_16.html)*

*GUILLERMO LEÓN, Marín Serna (2001). Edafología 1. Primera edición. Pag. 27.*

*HEWITT, Paul (2007). Física Conceptual. México: Pearson, pág. 368.*

*HOYOS, L. R., SUESCÚN E. A., PINEDA J. A. & PUPPALA, A. J. (2011). Small-Strain stiffness of compacted silty sand using a proximator-based suction-controlled resonant column device. Unsaturated Soils. Vol. 1, Pg. 683-684.*

*INGEOMINAS. (1993). Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Convenio interadministrativo 01. Cap 2-3. Unidad de prevención y atención de emergencias de Santa Fe de Bogotá D. C.*

*I.N.V. E-125-13. Determinación de los límites líquidos de los suelos.*

*I.N.V. E-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.*

*I.N.V. E-128-13. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.*

*I.N.V. E-157. (2007). Determinación de la succión de un suelo con el método del papel de filtro. Pg. 1.*

*KAYAL, J. R. (2000). Seismic waves and earthquake location. Geological Survey of India, 27, J.L. Nehru Road Road, Kolkata.*

*LU, Ning & LIKOS, William J. (2004). Unsaturated soil mechanics. Hoboken, New Jersey: Wiley. Pg. 128 - 195.*



- MAŠÍN, D., STALLEBRASS, S. E. and ATKINSON, J.H. (2001). *Laboratory modelling of natural structured clays*. Geotechnical Engineering Research Centre, City University, London, UK. MEIJER, G.J. (2012/10/29). *Reconstitution of sensitive clays*. Delft University of Technology. M.Sc. Thesis. Geo-engineering section. Delft University of technology. Pg. 19-20.
- MITCHELL, J., & SOGA, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3a ed.).
- MURCIA LÓPEZ, Derly Andrea y PERDOMO CRUZ, Leidy Mayerly. (2012). *Implementación del ensayo de columna resonante*. Tesis de pregrado. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D.C., Colombia.
- NULLVALUE. (1992/08/27). *Por qué se hunde la sabana de Bogotá*. El Tiempo. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-187881>
- PARDO, J. M. and SALINAS, L. M. (2016/10/27). *Física, química y biología de suelos curva de retención de agua del suelo (SWRC): Análisis de estimaciones y ajustes*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Pineda, J. A., Colmenares, J. E. y Hoyos, L. R. (2014). *Effect of fabric and weathering intensity on dynamic properties of residual and saprolitic soils via resonant column testing*. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 37. N° 5.
- PINEDA, J. A., MURILLO FEO, C. A. & COLMENARES, J. E. (2015). *Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía del occidente de la sabana de Bogotá*. *Épsilon*, (25), 39-68.
- PINEDA, J. A., Cruz, J. A. y Ávila, P. Y. (2017). *Dynamic behavior of naturally desiccated clays via resonant column testing at constant water content*. Trabajo de grado.
- PRAKASH, S. (1981). *Soil Dynamics*. University of Missouri-Rolla, United States. Cap. 2, Pg.10-12.
- REDACCIÓN BOGOTÁ. (2012/10/26). *La vía Siberia-Tenjo salió de los huecos*. El Tiempo. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12335438>



ROJAS PERILLA, L. L. & RIVERA PARDO, S. A. (2014).

*Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá. Tesis de pregrado. Universidad Santo Tomás. Bogotá D. C., Colombia.*

RUEDA PINTO, M. H. & PINEDA JAIMES, J. A. (2011). *Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del Occidente de la Sabana de Bogotá. Bogotá, D. C., Colombia. 3p.*

TARBUCK, Edward J. and LUTGENS, Frederick K. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física. Vol. 8, Cap. 11. Pag, 307-340. Universidad Autónoma de Madrid. Pearson.*

VELANDIA PATIÑO, F.A. y DE BERMOUDES, O. (2002/01-06). *Fallas longitudinales y transversales en la sabana de Bogotá, Colombia. Boletín de geología. Vol. 24, No. 39.*

VIDAL SANCHÉZ, Francisco (1994). *Los terremotos y sus causas. Instituto Andaluz de Geofísica y prevención de desastres sísmicos. Pag. 17-38. Recuperado de <file:///C:/Users/Sebastian/Downloads/Dialnet-LosTerremotosYSusCausas-2767747.pdf>*

Vucetic, M. and Dobry, R. (1991), mencionado por: Pineda, J. A., Colmenares, J. E. y Hoyos, L. R. (2014). "Effects of soil plasticity on dynamic response," *J. Geotech. Geoenviron. Eng. Div.*, Vol. 117, No. 1, pp. 89–107.






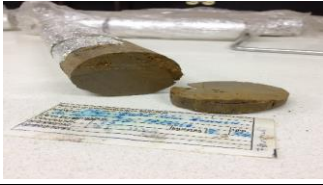


Yin J, Miao H. (2013). *Intrinsic compression behavior of remolded and reconstituted clays - Reappraisal. Zhenjiang, China. Open Journal Civil Engineering 3: 8-12.*



## ANEXOS










ANEXO 1

Arcillas										
Número	Perforación	Muestra	Profundidad	Color	Foto	$\omega$ (%)	Gs	LL	Cc	
1	24	3	1,5-2,0	Abano con oxidaciones		31,63	2,7	37,96	0,252	
2	26	4	3,0-3,5	Abano con oxidaciones; las oxidaciones se presentan en grandes porciones y vetas de café oscuro.		43,70	2,7	52,44	0,382	
3	23	3	3,0-3,5	Abano con vetas color café oscuro		48,78	2,7	58,53	0,437	
4	9	3	3,5-4,0	Abano con oxidaciones; las oxidaciones se presentan en grandes porciones y vetas de café oscuro.		74,46	2,7	93,07	0,748	
5	28	5	4,5-5,0	Abano con oxidaciones; las oxidaciones se presentan en grandes porciones y vetas de café oscuro.		57,47	2,7	71,84	0,557	
6	29	5	4,0-4,5	Abano con oxidación longitudinal		56,87	2,7	71,09	0,550	
7	17	4	4,0-4,5	Abano con fuerte oxidación transversal		57,83	2,7	69,40	0,535	
8	35	4	4,0-4,5	Abano con oxidaciones		53,72	2,7	64,47	0,490	



INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ARCILLAS NATURALES Y RECONSTITUIDAS A TRAVÉS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

9	24	7	4,5-5,0	Abano con puntos de oxidación		57,79	2,7	69,35	0,534
10	15	4	5,0-6,0	Abano		61,42	2,7	73,70	0,573
11	31	5	5,5-6,0	Abano con oxidaciones		61,64	2,7	73,97	0,576
12	39	5	6,0-6,5	Abano con oxidaciones		50,06	2,7	62,57	0,473
13	22	5	6,5-7,0	Abano con puntos verde oscuro y tonos de oxidación		66,19	2,7	79,43	0,625
14	11	5	6,5-7,0	Abano verdoso		58,81	2,7	73,52	0,572
15	34	6	7,5-8,0	Abano		68,91	2,7	89,58	0,716



## Anexo 2



## Anexo 3



## Anexo 4

### Bomba reguladora de presión de aire



### LVDT (para lecturas axiales)



### Drive (motor que ejerce torque)



### Cámara de contención



### Membrana y o-rings para sostener la muestra

