

**Caracterización dinámica de un suelo limoso compactado**

**Oswaldo Andrés Vides Bueno**

**Melissa Salazar Acevedo**

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Directora:**

**Hebenly Celis Leguizamo**

**Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial De Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2018**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	13
1.2 Objetivos Específicos .....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1 Propiedades y módulos dinámicos .....	14
2.2 Módulo de corte secante .....	15
2.3 El módulo de corte y el comportamiento del suelo a pequeñas deformaciones .....	16
3. Metodología .....	19
3.1 Obtención de la muestra .....	20
3.2 Caracterización de materiales .....	20
3.3 Ensayo de compactación .....	24
3.4 Triaxial dinámico .....	26
3.4.1 Aplicación de la carga cíclica .....	28
4. Resultados .....	30
5. Conclusiones .....	37
Referencias bibliográficas .....	39
Apéndices .....	41

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Curva de histéresis deformación de corte -tensión de corte, y definición del módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ), tangente ( $G_{tan}$ ) y secante ( $G_{sec}$ ). La tensión se expresa en kPa y la deformación es adimensional y se expresa en %. .....	15
<i>Figura 2.</i> Módulo de corte secante .....	16
<i>Figura 3.</i> Reducción del Módulo de Corte con el incremento de las deformaciones de corte. ....	19
<i>Figura 4.</i> Extracción del suelo.....	20
<i>Figura 5.</i> Curva granulométrica .....	21
<i>Figura 6.</i> Cazuela de Casagrande .....	22
<i>Figura 7.</i> Ensayo limite plástico.....	22
<i>Figura 8.</i> Clasificación USCS. Adaptado de INGEASSAS .....	23
<i>Figura 9.</i> Carta de plasticidad. Adaptado de INGEASSAS .....	24
<i>Figura 10.</i> Curva de compactación.....	25
<i>Figura 11.</i> Nuevo sistema de compactación.....	26
<i>Figura 12.</i> Martillo compactador.....	27
<i>Figura 13.</i> Probeta, fabricación de la muestra .....	27
<i>Figura 14.</i> Equipo triaxial dinámico.....	29
<i>Figura 15.</i> Curva de amplitud, humedad óptima (0,035 mm) .....	32
<i>Figura 16.</i> Curva de histéresis, humedad óptima (Amplitud 0,035 mm) .....	32

<i>Figura 17.</i> Curva de control, humedad óptima.....	35
<i>Figura 18.</i> Curva de control comparativa.....	35
<i>Figura 19.</i> Curva de control vs ciclos, humedad óptima.....	36
<i>Figura 20.</i> Curva de control vs ciclos, lado húmedo.....	36
<i>Figura 21.</i> Curva de control vs ciclos, lado seco.....	37

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Grava, Arena, Finos (%)</i> .....	21
Tabla 2. <i>Límite plástico y líquido</i> .....	23
Tabla 3. <i>Humedades, realización de las probetas</i> .....	25
Tabla 4. <i>Modificación de variables</i> .....	28
Tabla 5. <i>Frecuencias</i> .....	29
Tabla 6. <i>Amplitudes a ingresar</i> .....	30
Tabla 7. <i>Ciclo 5, humedad óptima (Amplitud 0,035 mm)</i> .....	31
Tabla 8. <i>Módulo de corte secante, humedad óptima (Amplitud 0,035mm)</i> .....	33
Tabla 9. <i>Módulo de corte secante, humedad óptima</i> .....	34

Lista de apéndices

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Granulometría .....	41
Apéndice B. Límites de consistencia .....	43
Apéndice C. Ensayo proctor .....	46
Apéndice D. Montaje de la muestra en la maquina triaxial .....	52
Apéndice E. Resultados .....	58

## Resumen

**Título:** Caracterización dinámica de un suelo limoso compactado\*

**Autor:** Oswaldo Andrés Vides Bueno\*\*  
Melissa Salazar Acevedo

**Palabras claves:** triaxial cíclico, esfuerzos dinámicos, humedad, suelo limoso compactado, módulo de corte secante, rellenos.

### Descripción

El uso de los suelos para rellenos en la construcción es un elemento muy importante hoy día, debido a que tenemos espacios limitados y en algunos casos suelos con baja capacidad de carga, para el estudio de estos es importante conocer sus propiedades físicas y su comportamiento sometido a esfuerzos dinámicos. Las cargas dinámicas que actúan sobre el suelo pueden originarse debido a terremotos, explosiones de bombas, operaciones de maquinarias y martillos, operación de construcción (tales como hincado de pilotes), explosiones en canteras, entre otros. La naturaleza de cada una de estas cargas es bastante diferente de las otras, sin embargo, son los terremotos, la fuente más importante de cargas dinámicas.

En este artículo se estudió el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo limoso compactado bajo cargas cíclicas mediante el ensayo triaxial dinámico. Mediante el análisis de: el efecto del número de ciclos de carga, la influencia del nivel de deformación y el comportamiento del módulo de corte secante variando el contenido de humedad del material con respecto al obtenido por el ensayo del proctor modificado este parámetro se obtuvo para un suelo limoso utilizado en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. En los resultados se presenta la variación del módulo de corte secante y la deformación del suelo para diferentes humedades.

Finalmente se concluye que el contenido de humedad de la compactación del suelo afecta el módulo de corte secante debido a que para humedades más bajas y altas que la humedad óptima los valores del módulo obtenidos fueron un 20-30 más bajos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo, Ingeniería Civil

### Abstract

**Title:** Dynamic characterization of a compacted silty soil\*

**Author:** Oswaldo Andrés Vides Bueno\*\*  
Melissa Salazar Acevedo

**Keywords:** cyclic triaxial, dynamic efforts, humidity, compacted silty soil, cutting module, fillers.

### Description

The use of the ground for landfills in construction is a very important element today, because we have limited spaces and in some cases grounds with low load capacity, for the study of these cases it is important to know their physical properties and their behavior submitted to dynamic efforts. The dynamic loads that act on the ground may be originated due to earthquakes, explosions of bombs, operations of machinery and hammers, operation of construction (such as driving of poles), explosions in quarries, among others. The nature of each of these charges is quite different from the others, however earthquakes are the most important source of dynamic loads.

In this article, the stress-deformation behavior of a silty soil compacted under cyclic loads was studied by dynamic triaxial test. By analyzing: the effect of the number of load cycles, the influence of the deformation level and the behavior of the cutting module by varying the moisture content of the material with respect to the obtained by the modified proctor test, this parameter was obtained for a silty soil used in the city of Cúcuta, Norte de Santander. In the results the variation of the secant modulus and the deformation of the soil for different humidities are presented.

Finally, it is concluded that the moisture content of the soil compaction affects the drying module because for lower and higher humidities than optimum humidity, the module values obtained were 20-30% lower.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Civil Engineering

## Introducción

De acuerdo con Krammer (1995) La naturaleza y la distribución del daño sísmico están muy influenciadas por la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas. Dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades del suelo. Por ejemplo, la susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte,  $G$ , y el amortiguamiento,  $\epsilon$ , los principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo. La compactación que debe obtenerse en los rellenos se especifica como un porcentaje mínimo del peso volumétrico máximo con humedad óptima que se determina en pruebas de laboratorio. Es decir, para un suelo y un esfuerzo de compactación dado, existe un contenido óptimo de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso del suelo seco, que permite el máximo grado de compactación, por ello se hace necesario verificar el comportamiento del suelo variando el contenido de humedad. El uso de suelos para rellenos en la construcción es un elemento muy importante ya que en algunos casos los suelos tienen muy baja capacidad de carga por ello es importante conocer sus propiedades físicas y su comportamiento sometido a esfuerzos dinámicos para esto se verifico el comportamiento del suelo variando el contenido de humedad y así poder observar el cambio de módulo de corte secante en los estos 3 casos a estudiar (lado húmedo, lado óptimo y lado seco).

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

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

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Establecer curva compactación.
- Estudiar el efecto de la humedad compactada en la deformación del módulo de corte secante, “G”.
- Estudiar el efecto del número de ciclos de carga en “G”.
- Estudiar la influencia del nivel de deformación en el módulo de corte secante, G.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Propiedades y módulos dinámicos

La sacudida provocada por un terremoto es una carga cíclica rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el descrito por en la figura, que corresponde a la curva de histéresis deformación de corte tensión de corte. Las propiedades dinámicas más importantes son el módulo de corte secante  $G$ . El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la figura y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión-deformación y en función de dónde se evalúa está pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente ( $G_{tan}$ ), secante ( $G_{sec}$ ) o máximo ( $G_{max}$ ).

En la Figura 1 se ilustran dichos módulos: el módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ), calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente ( $G_{tan}$ ) que es el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante ( $G_{sec}$ ) que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva. El módulo de corte secante  $G$  está relacionado con el coeficiente de Poisson y el módulo de Young  $E$  según:

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Esta fórmula es válida para materiales que tienen un comportamiento isótropo. El coeficiente de Poisson también es un parámetro dinámico, pero se considera que tiene una influencia menor.

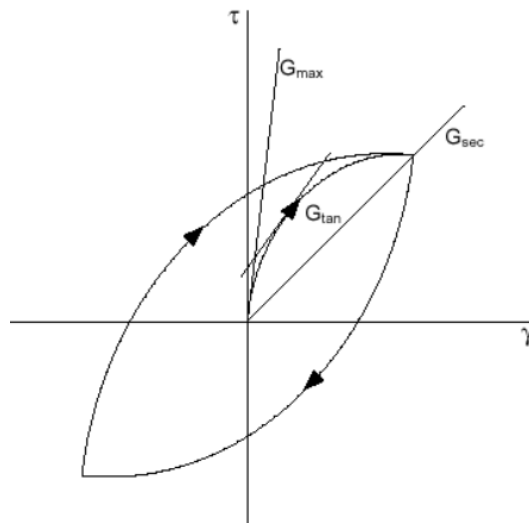


Figura 1. Curva de histéresis deformación de corte -tensión de corte, y definición del módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ), tangente ( $G_{tan}$ ) y secante ( $G_{sec}$ ). La tensión se expresa en kPa y la deformación es adimensional y se expresa en %. Adaptado de Krammer, 1995

## 2.2 Módulo de corte secante

La determinación del Módulo de Corte secante en los suelos, es siempre de mucha utilidad en todos los problemas de ingeniería donde intervienen cargas cíclicas. (Merchán Jaimes, 2015)

Como sabemos los suelos y las rocas son materiales particulares cuya estructura está conformada por partículas sólidas que forman el esqueleto de la masa, agua y gases que completan los vacíos que deja esta estructura sólida del material. (Merchán Jaimes, 2015)

Por otra parte, la estructura del material, puede experimentar cambios importantes, debidos a la amplitud de las tensiones aplicadas (tensiones efectivas) o a su permanencia en el tiempo. (Merchán Jaimes, 2015)

Por lo tanto, es de suma importancia analizar la respuesta de los suelos a las cargas cíclicas que lo solicitan ya que las mismas se trasladan en trenes de ondas que viajan por la estructura sólida y que provocan deformaciones angulares que, de acuerdo a su magnitud y a su permanencia pueden llevar al colapso o la falla de la estructura. (Merchán Jaimes, 2015)

El Módulo de Corte secante “G” queda definido por el cociente entre la tensión de corte y la deformación angular que la misma provoca. Ver Figura 2. (Merchán Jaimes, 2015)

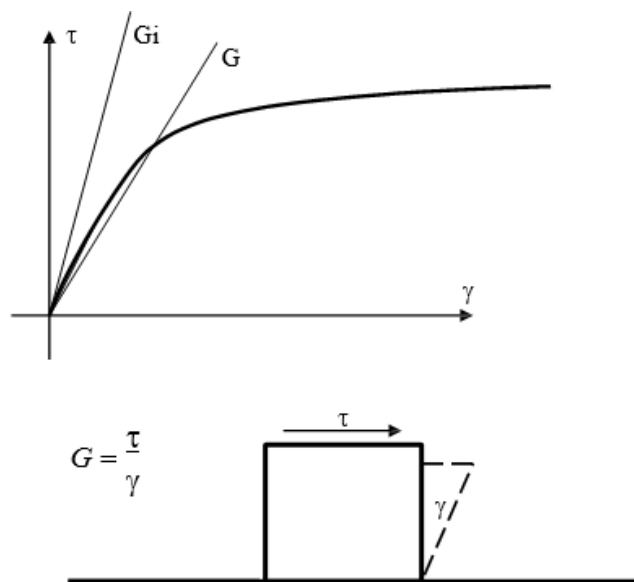


Figura 2. Módulo de corte secante. Adaptado de Leoni, Augusto José. (2006). Parametrización de Suelos, Facultad de Ingeniería U.N.L.P

### 2.3 El módulo de corte y el comportamiento del suelo a pequeñas deformaciones

El comportamiento mecánico del suelo está determinado básicamente por dos variables: esfuerzo y deformación. Donde la deformación corresponde a la variable independiente, y mientras que el esfuerzo a la variable dependiente. De esta manera, quien determina las características mecánicas

del suelo, es el nivel de deformación al que es sometido, sin embargo, el problema no es tan sencillo, debido a que los niveles de deformación alcanzados por la masa de suelo, se deben a los valores de esfuerzo aplicados, lo que lleva a una 'dependencia reciproca' o en dos direcciones. No obstante, por mera conveniencia y convención general, el problema se analiza en una sola dirección esfuerzo y deformación. (Almagor, Marzo 2015)

De acuerdo a la magnitud de la deformación alcanzada, el comportamiento del suelo, suele dividirse en tres etapas o fases: pequeñas, medias y grandes deformaciones. En la literatura también aparece una clasificación como: muy pequeña, pequeña, y grandes deformaciones, la cual es totalmente equivalente. En cada rango de deformación, las características mecánicas del suelo son particulares, con respecto al otro. Los valores absolutos correspondientes a cada nivel de deformación es complicado definir, la razón más importante es debido a la complejidad del suelo, además de las condiciones propias de cada caso.

Es de todos conocido que en el rango de pequeñas deformaciones, el suelo se comporta de forma elástica, es decir es totalmente recuperable, cumpliéndose a cabalidad la clásica Ley de Hooke ( $F = K\Delta x$ ). Debido a esta característica, usualmente en la teoría clásica del diseño de fundaciones los parámetros mecánicos del suelo, correspondientes a este rango de deformación son ignorados, y se usa, en la mayoría de los casos, la resistencia última del suelo, como parámetro base de diseño. A como se mencionó anteriormente, el valor exacto que define cada rango es ampliamente debatible, y cuando se trata del nivel al cual el suelo deja de comportarse de forma elástica, es aún más discutible, sin embargo, se ha aceptado que, en la mayoría de los casos, el suelo se comporta de forma lineal hasta un valor de 0.005% de deformación. A valores de deformación tan pequeños, es difícil medirlos apropiadamente, debido a que el error de algunos dispositivos de medición en el laboratorio sobrepasa el valor mismo que se quiere medir, por lo

que el valor obtenido es realmente insignificante. Esta es otra de las razones por las que, el estudio del suelo a pequeñas deformaciones no es de común uso en la práctica del diseño en geotecnia. (Almagor, Marzo 2015)

En general, el parámetro más importante que caracteriza el comportamiento mecánico del suelo a pequeñas deformaciones, es el Módulo de Corte Máximo:  $G_{max}$ , o también conocido como Módulo de Corte Inicial  $G_0$ . Este valor es importante para una variedad de diseños en geotecnia, por ejemplo:

- 1) Análisis dinámico del suelo sometido a vibraciones que causan pequeñas deformaciones, tales como: Predecir el comportamiento del suelo y la interacción del sistema suelo-estructura durante sacudidas sísmicas, explosiones o vibración provocada por el tránsito o maquinas industriales.
- 2) Situaciones de carga cíclica: tales como aquellas causadas por viento o el movimiento del oleaje continuo.
- 3) Situaciones de carga estática: debido a la degradación que provocan en el suelo de fundación, lo cual altera el valor de rigidez del suelo en el tiempo.

En todos los casos mencionados, el problema de estudio es 'evaluar como el módulo de corte secante se reduce a medida que aumenta la deformación de corte del suelo', y de ahí la curva característica, módulo de corte secante & deformación de corte. Ver Figura 3.

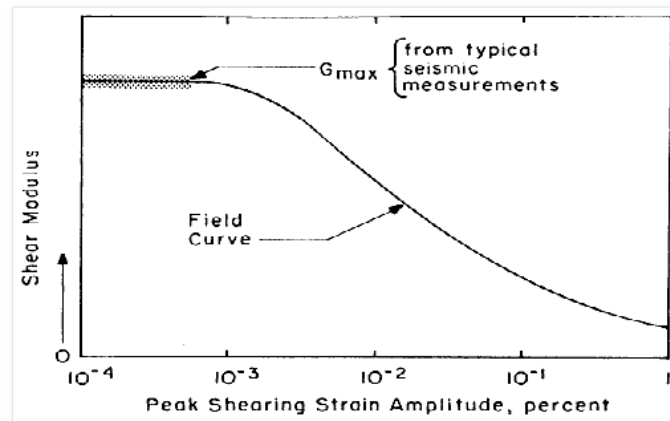


Figura 3. Reducción del Módulo de Corte con el incremento de las deformaciones de corte.

Adaptado de Ali Zomorodian, 2003

Ahora la idea es como utilizar de una mejor forma los parámetros del suelo obtenidos en el rango de pequeñas deformaciones en la práctica del diseño de fundaciones, de tal manera que sea práctico y efectivo. (Almagor, Marzo 2015)

### 3. Metodología

Se recogió una muestra de la ciudad de Cúcuta, con el propósito de conocer las propiedades del material empleado, se prepararon 3 probetas variando la humedad en cada una.

Para elaborar las probetas que se usaran en el ensayo triaxial cíclico, se desarrolló primero la curva de compactación, obteniendo los valores de humedad óptima, y así mismo la de otros dos puntos, uno en el lado seco de la muestra, y otro en el lado húmedo, que se hallaron mediante el

ensayo Proctor Estándar. Se manejaron probetas cilíndricas con dimensiones de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, que fueron compactadas y ensayadas en el equipo triaxial dinámico.

### **3.1 Obtención de la muestra**

El material se obtuvo el 28 de septiembre de 2017 de un proyecto de gestión de riesgos ubicado en la ciudad de Cúcuta, norte de Santander. Ver Figura 4.



*Figura 4.* Extracción del suelo.

### **3.2 Caracterización de materiales**

Se lavó la muestra sobre el tamiz No.200 y se secó al horno a una temperatura de 110°C constante, dicha muestra se pasó por los respectivos tamices.

Al realizar la curva granulométrica obtuvimos (Ver Figura 5):

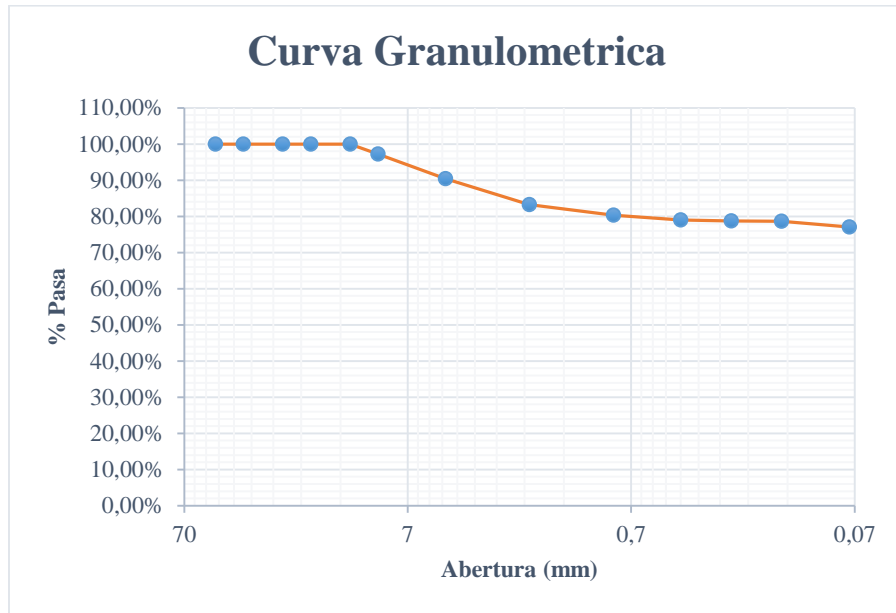


Figura 5. Curva granulométrica

Tabla 1.

Grava, Arena, Finos (%)

<b>Grava</b>	(%)	9,63
<b>Arena</b>	(%)	13,32
<b>Finos</b>	(%)	77,05

Los límites líquidos y plásticos fueron realizados bajo las normativas INV E 125-13 e INV E 126-13.

Para el hallar el límite líquido se tomaron aproximadamente 100 gr. de material seco al aire que pase por el tamiz No. 40, luego se mezcló el suelo con agua hasta que adquirió una consistencia suave y uniforme, la muestra fue colocada en la Cazuela de Casagrande (Ver Figura 7) teniendo en cuenta que ocupara 1 cm de espesor en la copa.



*Figura 6.* Cazuela de Casagrande



*Figura 7.* Ensayo limite plástico

Por otra parte, para hallar el límite plástico se tomaron aproximadamente 30gr de material que pasaran por el tamiz No.40 y se agregó agua hasta que tuviera una consistencia similar a la obtenida del límite líquido. Se hicieron rollos con un diámetro aproximado de 3 mm hasta que visualmente se agrietara la muestra.

Tabla 2

*Límite plástico y líquido*

<b>Límite líquido (%):</b>	33,25
<b>Límite plástico (%):</b>	24,92
<b>Índice de plasticidad:</b>	8,33

Con los valores obtenidos en la granulometría y los límites podemos clasificar el suelo por el medio del método de USCS (Ver Figuras 8,9):

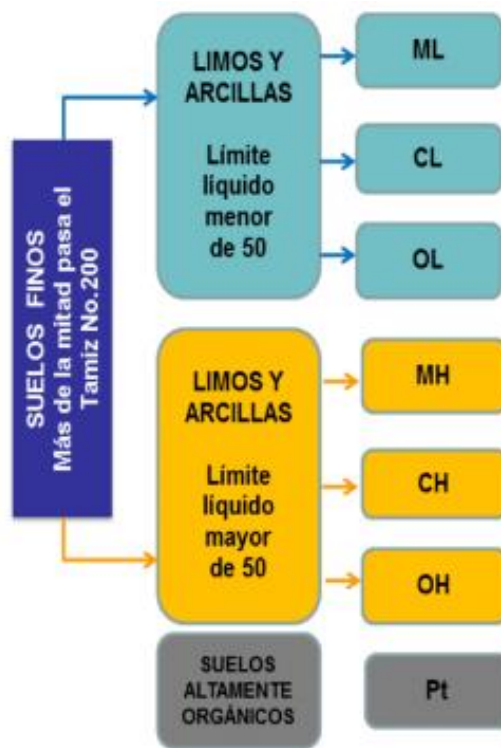


Figura 8. Clasificación USCS. Adaptado de INGEASSAS

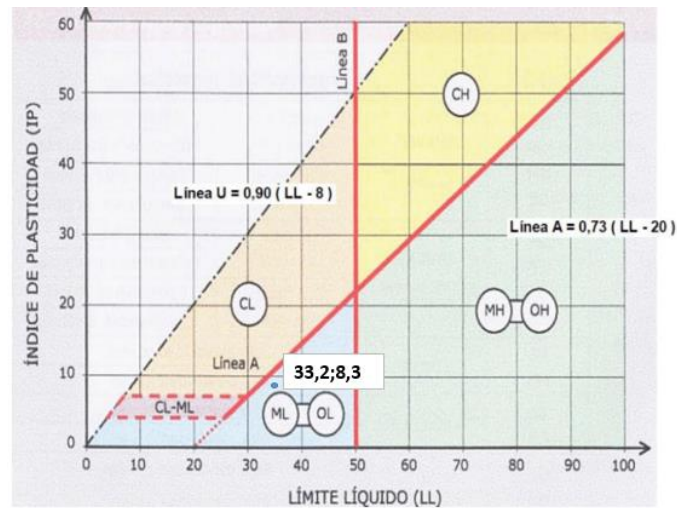


Figura 9. Carta de plasticidad. Adaptado de INGEASSAS

Por lo cual podemos decir que es un **ML (Limos orgánicos)**.

### 3.3 Ensayo de compactación.

Para fabricar las probetas el material fue compactado dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones 10,16 cm de diámetro y 11,6 cm de altura. Se tamizó una cantidad adecuada de suelo representativo sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).

Se escogió una muestra representativa del suelo preparado, con una masa aproximada 2500 gr. Se mezcló perfectamente la muestra escogida con agua suficiente para humedecerla, aproximadamente, hasta un 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad. Se preparó un espécimen compactando el suelo humedecido en el molde en 3 capas iguales. Se compacto cada capa mediante 25 golpes uniformemente distribuidos con el martillo. Después de la compactación, se removió el collar de extensión, se recortó cuidadosamente el suelo compactado que sobresale en la parte superior del molde usando la regla metálica. Se pesó el molde con el suelo húmedo.

La Figura 10 muestra la curva de compactación.

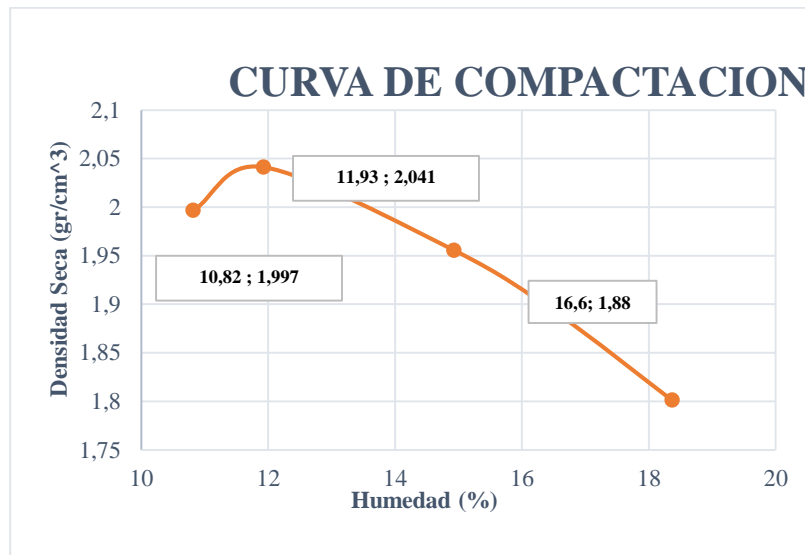


Figura 10. Curva de compactación

Se escogieron las siguientes humedades para realizar las probetas (Ver Tabla 3).

Tabla 3.

*Humedades, realización de las probetas*

Probeta	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad (%)
1	1,997	10,82
2	2,041	11,93
3	1,88	16,6

### 3.4 Triaxial dinámico

Antes de realizar las probetas para en el ensayo de triaxial dinámico, se debe implementar un nuevo sistema de compactación de manera que se conserve la energía obtenida (Ver Tabla 3) en los ensayos anteriores del proctor, esto se tiene modificando las variables n número de capas, N número de golpes, W del martillo, H caída del martillo, y se elaboró dicho sistema de una manera práctica. Ver Figura 11.



*Figura 11.* Nuevo sistema de compactación.



*Figura 12.* Martillo compactador



*Figura 13.* Probeta, fabricación de la muestra

Tabla 4

*Modificación de variables*

Datos	Proctor	Nuevo sistema
n	3	3
N	25	28
P (Kg)	6	1,13
H (cm)	70	70
V (cm <sup>3</sup> )	944	196
Energía (J)	33,36	33,83

**3.4.1 Aplicación de la carga cíclica.** Esta etapa se realiza con el objetivo de observar, analizar y comprender el comportamiento del suelo ante cargas dinámicas con formas sinusoidales de una sola frecuencia. Según la normal ASTM 3999 el ensayo debe realizarse para frecuencias de 0,5 Hz a 1 Hz, mientras que la normal ASTM 5311 para frecuencias de 0,1 Hz a 2 Hz preferiblemente 1 Hz.



Figura 14. Equipo triaxial dinámico

Tabla 5.

Frecuencias.

Tipo de carga	Típica frecuencia
Acción de las olas	0,1 Hz
Acción del viento	0,1-1 Hz
Terremoto	1 Hz
Transito ferroviario	>1 Hz
Maquinaria vibrante	=<20 Hz

Esta etapa se puede realizar por carga o deformación constante.

- Por deformación:

Se debe ingresar los valores de amplitud (Ver Tabla 6) a la que se someterá la muestra, y la frecuencia (Ver Tabla 5). Se tomó un valor de frecuencia de 1 Hz para todas las muestras de manera constante.

Tabla 6

*Amplitudes a ingresar*

Amplitud (mm)	No. Ciclos
0,035	10
0,05	10
0,08	10
0,13	10
0,24	10
0,4	10
0,6	10
1	10
2	10

#### 4. Resultados

Se expone a continuación los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del suelo y determinación de los módulos dinámicos para un suelo limoso de la ciudad de Cúcuta, norte de Santander. Se exportaron los resultados del software GDSLAB de los ensayos realizados al software Microsoft Excel para facilitar su procesamiento. De estos datos se eliminaron datos innecesarios para la interpretación de los resultados para llevar a cabalidad nuestro proyecto (Ver Tabla 7).

Por ejemplo, en la probeta de humedad óptima con una deformación aplicada de 0,035 mm:

Tabla 7

*Ciclo 5, humedad óptima (Amplitud 0,035 mm)*

Ciclo	Tiempo (s)	Def. Vertical (mm)	Deformación (%)	Max. Esfuerzo cortante (kPa)
5	4	0,0001	0,0001	15,339
5	4,05	0,0109	0,0109	19,2473
5	4,1	0,0207	0,0207	22,681
5	4,15	0,0284	0,0284	24,8512
5	4,2	0,0334	0,0333	26,0451
5	4,25	0,0352	0,0352	25,8144
5	4,3	0,0334	0,0333	24,7613
5	4,35	0,0286	0,0285	21,6049
5	4,4	0,0199	0,0199	17,253
5	4,45	0,0112	0,0112	12,8239
5	4,5	-0,0002	-0,0001	8,4055
5	4,55	-0,0109	-0,0109	4,8172
5	4,6	-0,0207	-0,0207	1,5591
5	4,65	-0,0285	-0,0285	-0,5787
5	4,7	-0,0335	-0,0335	-1,6217
5	4,75	-0,0351	-0,0351	-1,4269
5	4,8	-0,0336	-0,0336	-0,3057
5	4,85	-0,0282	-0,0281	2,92
5	4,9	-0,0204	-0,0204	6,7914
5	4,95	-0,0106	-0,0105	11,1042
5	5	0,0001	0,0001	15,3037

Nota. Maquina GDS, triaxial.

Para cada secuencia se aplicó una deformación vertical sinusoidal (Ver Figura 15), con un número determinado de 10 ciclos.

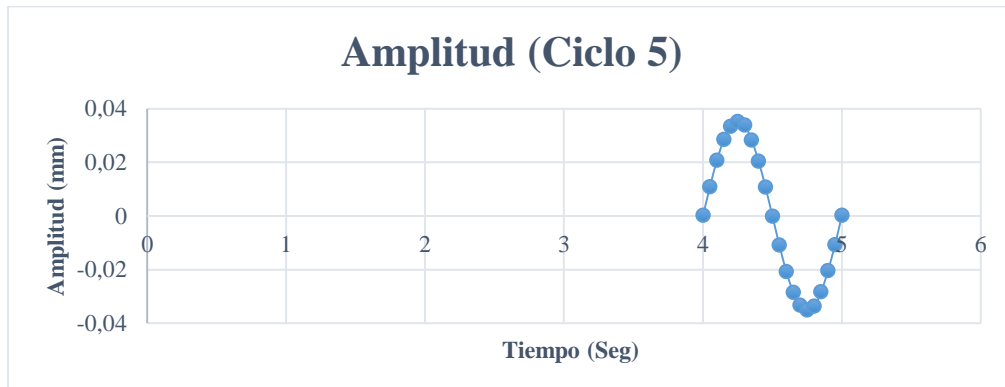


Figura 15. Curva de amplitud, humedad óptima (0,035 mm)

A cada probeta se le aplicó una serie de amplitudes generando una curva de histéresis por cada ciclo (Ver Figura 16).

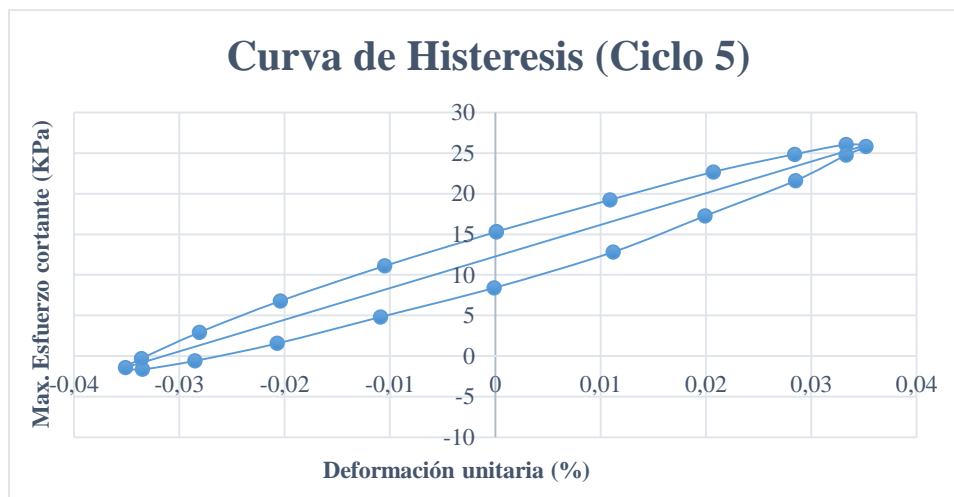


Figura 16. Curva de histéresis, humedad óptima (Amplitud 0,035 mm)

Luego allí se tomaron dos puntos que se obtuvieron sacando el valor máximo y mínimo de los máximos esfuerzos cortantes con su respectivo valor de deformación unitaria, con esos puntos pasamos a hallar la pendiente, este resultado corresponde al módulo de corte secante (Ver Tabla 7).

Tabla 8

*Módulo de corte secante, humedad óptima (Amplitud 0,035mm)*

	$\gamma$ (%)	$\tau$ (kPa)
<b>Max</b>	0,0333	26,0451
<b>Min</b>	-0,0335	-1,6217
<b>Secante (kPa)</b>	41417,36	<b>kPa</b>

El procedimiento se repite por cada ciclo, por ende, saldrán 10 datos de módulo de corte secante por cada deformación aplicada el cual se promedia (Ver Tabla 9) para obtener un resultado con el que graficaremos la curva de control (Ver Figura 17). El resultado mostrado es el correspondiente a la humedad óptima.

Tabla 9

*Módulo de corte secante, humedad óptima*

Módulo de corte secante											
Ciclo											Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Deformación (mm)											
<b>0,035</b>	44346,25	42550,30	42047,90	41531,44	41417,37	41250,30	41351,65	41151,35	40907,49	40571,77	41712,58
<b>0,05</b>	36908,60	35979,52	35904,30	35466,63	34229,75	35103,04	34082,29	34969,36	35066,46	34836,58	35254,65
<b>0,08</b>	30158,58	28920,41	28010,70	29441,01	28761,90	27978,75	27588,17	27310,20	27209,21	26999,22	28237,81
<b>0,13</b>	27295,72	24359,68	23306,77	27370,08	26146,85	21948,89	22329,18	21860,01	21001,49	25341,59	24096,03
<b>0,24</b>	22684,72	13538,90	13272,43	13024,90	12883,70	12456,70	12286,81	12249,54	12181,27	12081,65	13666,06
<b>0,4</b>	10974,71	10344,59	10045,24	9846,15	9711,66	9382,14	9292,36	9247,81	9146,50	9130,52	9712,17
<b>0,6</b>	8651,88	8180,89	7935,04	7768,13	7633,49	7552,42	7288,41	7389,25	7182,22	7115,92	7669,76
<b>1</b>	6455,44	5954,37	5695,63	5517,78	5379,22	5278,84	5153,14	5103,16	5020,44	4959,27	5451,73
<b>2</b>	4201,30	3615,34	3372,75	3196,16	3075,75	2911,17	2835,80	2838,13	2723,56	2738,84	3150,88

A continuación, se presenta el efecto de la humedad de compactación en el módulo de corte secante (Ver Figura 17).

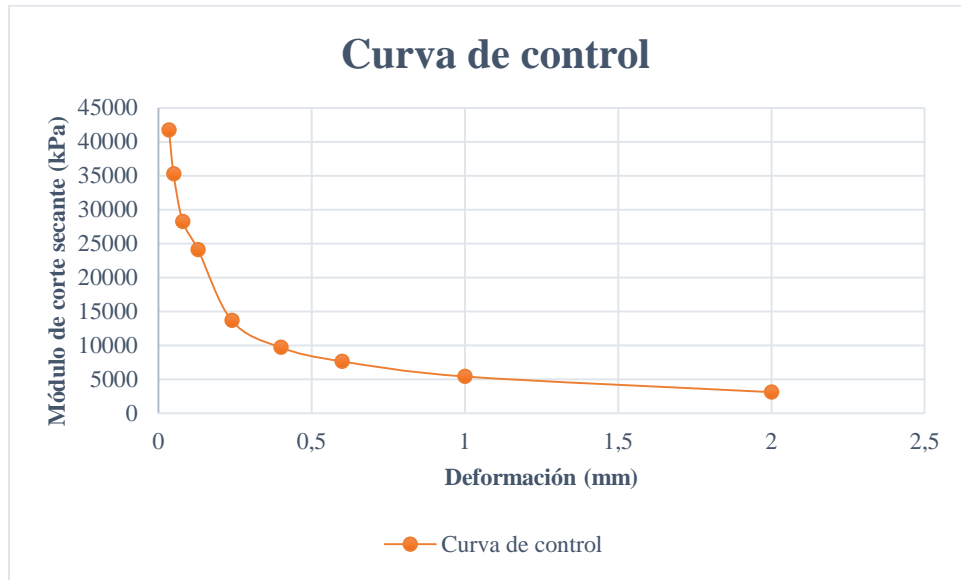


Figura 17. Curva de control, humedad óptima

Este mismo procedimiento se realizó para el lado seco y el lado húmedo de la curva de compactación obteniendo resultados de la Figura 18. (Ver anexo E)

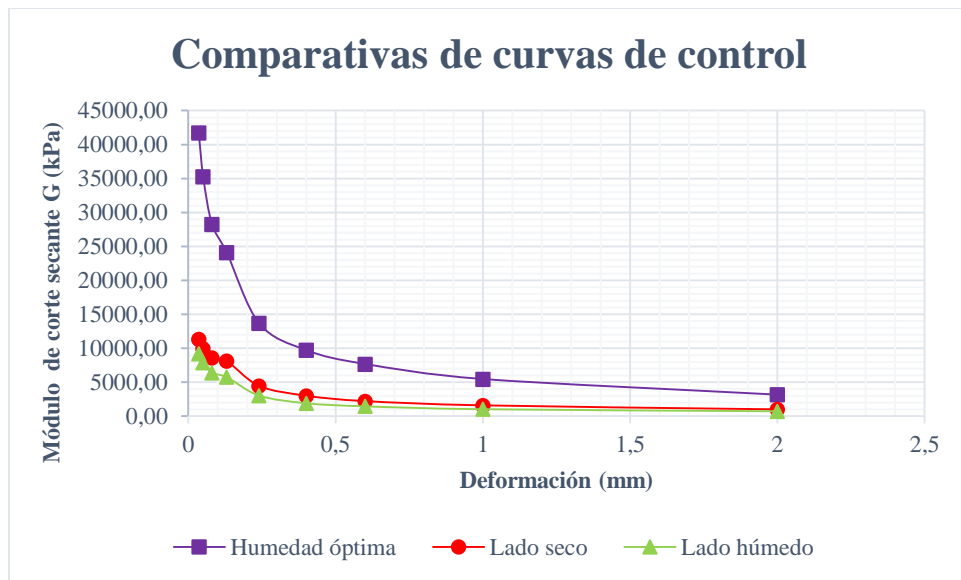


Figura 18. Curva de control comparativa

A continuación, se grafica el módulo de corte secante vs la deformación para analizar el nivel de degradación del suelo mediante la aplicación de los ciclos de carga; este procedimiento se realiza para las 3 muestras (Ver figura 19, 20, 21).

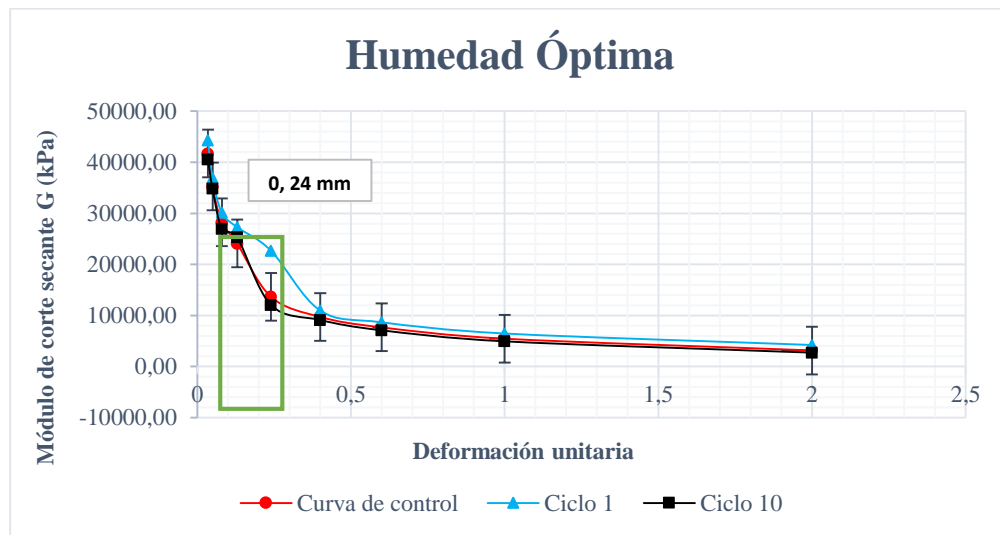


Figura 19. Curva de control vs ciclos, humedad óptima

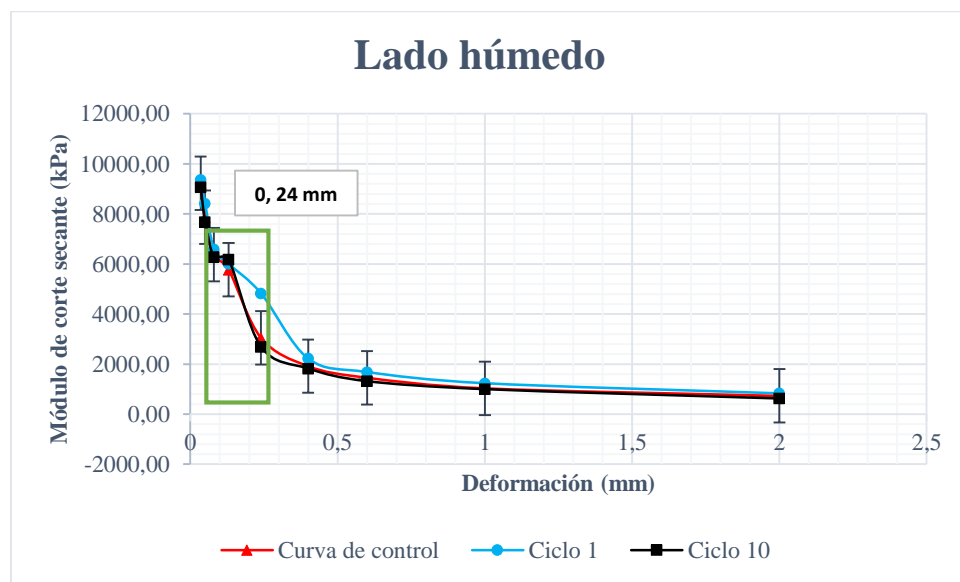


Figura 20. Curva de control vs ciclos, lado húmedo

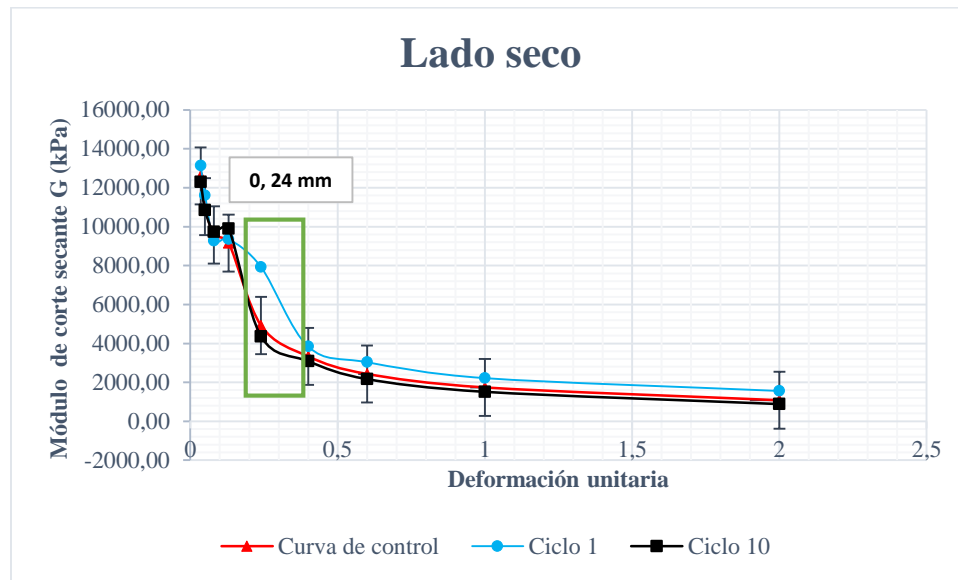


Figura 21. Curva de control vs ciclos, lado seco

### 5. Conclusiones

- La densidad en el lado seco fue de  $\rho=1,997 \text{ gr/cm}^3$  con humedad  $w (\%)=10,82$  y la densidad en el lado húmedo fue de  $\rho=1,888 \text{ gr/cm}^3$  con humedad  $w (\%)=16,6$  teniendo un grado de densificación del 98% y 92% respectivamente esto con relación a la densidad seca en el lado óptimo que fue de  $\rho=2,041 \text{ gr/cm}^3$  con humedad  $w (\%)=11,93$ .
- Para la compactación de rellenos con el material ensayado deberá tenerse en cuenta que con una variación del 2% en la densidad seca de la humedad óptima, el módulo de corte secante en la parte de la rama seca disminuye en promedio un 70% con relación al lado óptimo, y en la parte de la rama húmeda con una variación del 8% en la densidad seca de la humedad óptima, el módulo de corte secante disminuye en promedio un 80% con relación al lado óptimo, esto puede ser

atribuido al proceso que siguió el material que inicialmente se ensayó en una condición más seca y húmeda a partir de la humedad óptima modificando su contenido de humedad natural para llevarlas a dicho punto.

- El efecto de los 10 de ciclos aplicados en las muestras y con frecuencia constante de 1 Hz, se hace notar en la curva de control que a medida que se van efectuando los ciclos de deformación, el módulo de corte secante va disminuyendo consecuentemente a la deformación vertical aplicada, tanto para la muestra con humedad óptima, como para las otras dos (lado seco y húmedo). El nivel de degradación que presentan las muestras del suelo, se ven afectadas en primera instancia por el nivel de deformación que se les aplicaron a las probetas, notándose que, de bajas a altas deformaciones, el módulo de corte secante comienza a disminuir y luego mantener un valor más constante, ya que al comenzar a aplicar a las muestras una deformación de 0,035mm hasta deformaciones cercanas de 0,24mm, el módulo de corte secante decae en un 25% de una manera muy abrupta, es allí donde el material ensayado presenta cambios significativos en el módulo de corte secante, esto revela que, a partir de ese rango de deformaciones el nivel de degradación tendrá valor en el material ensayado, disminuyendo considerablemente en la curva de control. Esto tiene un significado en la realidad cuando un sismo actúa sobre un suelo, a medida que la magnitud de este aumenta, el suelo se verá propenso a degradarse de una manera demostrativa.

- El comportamiento dinámico del material estudiado se ve afectado directamente por factores como la deformación aplicada y la densidad seca, en donde podemos observar que si el suelo no se compacta de manera adecuada el módulo de corte secante disminuye considerablemente afectando las propiedades dinámicas del suelo.

### Referencias bibliográficas

Almagor, Earth. (Marzo 2015). Quake and soil,

Bowles J, (1982). Physical and geotechnical properties of soil.

Campos Sigüenza, Antonio, Vásquez Huamaní, Oscar. (sf). Seminario taller de mecánica de suelos y exploración geotécnica. Centro peruano japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres. Universidad nacional de ingeniería.

Empresa Soluciones Especiales, Relleno y compactación.

Ensayo triaxial. (sf). Universidad pontificia católica Valparaíso

Gómez, Evelyn. (sf). Efecto de las condiciones iniciales de compactación dinámica en la presión de pre consolidación de un suelo. Barcelona,

Instituto Nacional de Vías. (2007). Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial. I.N.V.E – 153 – 07. Bogotá D.C. 28 p.

Instituto Nacional de Vías. (sf). Análisis granulométrico de suelos por tamizado. Bogotá: INVIAS, 6 h. (I.N.V.E-123-07).

Instituto Nacional de Vías. (sf). Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación). Bogotá: INVIAS, 12 h. (I.N.V.E-142-07).

Kramer, S.L (1996). Geotechnical Earthquake Engineering.

Leoni, Augusto José. (2006). Parametrización de Suelos, Facultad de Ingeniería U.N.L.P

Merchán Jaimes, Vladimir. (2015). Maestría en geotecnia, Ensayo triaxial, INV E 153-13 Ensayo de compresión triaxial sobre suelos cohesivos, ASTM 5311 Triaxial cíclico y ASTM D3999 Módulo y amortiguación.

Rodríguez Segurado, Montse. (2005). Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos.

Aplicación a la ciudad de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Valerio, Oscar. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. Revista Métodos y Materiales. vol. 1, p. 14-

24.

## Apéndices

### Apéndice A. Granulometría

Se analizó la clasificación del material sustraído ciudad de Cúcuta, mediante la implementación del ensayo para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos descrito por la norma I.N.V. E – 123

#### Ensayo para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos

##### I.N.V. E – 123

Para el análisis de los tamaños de las partículas del material después de lavada y secada la muestra al horno se sometió al procedimiento de tamizado manual, mediante tamices de abertura cuadrada con los respectivos tamaños de lo cual obtuvimos:

Tabla 1

*Peso inicial, Peso después de secado*

<b>Peso Inicial</b>	609,7	gr
<b>Peso Seco</b>	162,2	gr

Tabla 2.

Granulometría

Tamiz	Abertura	Retenido (gr)	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% Pasa
2"	50,8	0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	38 1/9	0	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,4	0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	0	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,52	17,2	2,82%	2,82%	97,18%
#4	4,75	41,5	6,81%	9,63%	90,37%
#10	2	43,3	7,10%	16,73%	83,27%
#20	0,84	18,1	2,97%	19,70%	80,30%
#40	0,42	8,2	1,34%	21,04%	78,96%
#60	0,25	1,2	0,20%	21,24%	78,76%
#100	0,149	0,7	0,11%	21,35%	78,65%
#200	0,074	9,7	1,59%	22,95%	77,05%
Pasa 200	-	469,8	77,05%	100,00%	-
	-	609,7	100,00%	-	-

**Apéndice B. Límites de consistencia**

Tabla 1

*Información material de estudio*

<b>Nombre del proyecto:</b>	Caracterización Dinámica De Un Suelo Limoso Compactado
<b>Ubicación:</b>	Cúcuta
<b>Fecha:</b>	28/09/2017
<b>N° de muestra:</b>	1
<b>Profundidad de la muestra (m):</b>	1,5
<b>Descripción del suelo:</b>	Arcilla Limosa

Tabla 2

*Límite líquido*

<i>Límite líquido</i>				
<b>N° de lata</b>	<b>30</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>2</b>
<b>Peso de suelo húmedo + Lata (gr.):</b>	33,500	33,300	32,500	34,300
<b>Peso de suelo seco + Lata (gr.):</b>	29,300	29,000	28,300	29,500
<b>Peso de lata (gr.):</b>	16,100	15,800	15,800	15,800
<b>Peso de suelo seco (gr.):</b>	13,200	13,200	12,500	13,700
<b>Peso de agua (gr.):</b>	4,200	4,300	4,200	4,800
<b>Contenido de humedad (%):</b>	31,818	32,576	33,600	35,036
<b>N° de golpes:</b>	<b>47</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>19</b>

Tabla 3.

*Límite plástico*

<i>Límite plástico</i>		
N° de lata	13	9
Peso de suelo húmedo + Lata (gr.):	12,700	11,200
Peso de suelo seco + Lata (gr.):	11,100	10,200
Peso de lata (gr.):	5,500	5,500
Peso de suelo seco (gr.):	5,600	4,700
Peso de agua (gr.):	1,600	1,000
Contenido de humedad (%):	28,571	21,277
Límite plástico (%):	<b>24,924</b>	

De acuerdo a los datos obtenidos en los ensayos para hallar el peso del agua, peso de suelo seco y contenido de humedad se utilizaron las siguientes ecuaciones:

*Ecuación 1 Peso del agua*

**PESO DE AGUA**

$$= ((\text{PESO DE SUELO HUM.} + \text{LATA}) - (\text{PESO DE SUELO SECO} + \text{LATA}))$$

*Ecuación 2 Peso de suelo seco*

$$\text{PESO DE SUELO SECO} = ((\text{PESO DE SUELO SECO} + \text{LATA}) - \text{PESO DE LATA})$$

*Ecuación 3 Contenido de humedad*

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

$$= \left( \frac{(PESO SUELO SECO) - PESO SUELO HUMEDO}{PESO SUELO SECO} \right) * 100$$

Por último, se hace un promedio del contenido de humedad para hallar el límite líquido y el límite plástico y una resta entre estos 2 valores para el cálculo del índice de plasticidad.

Tabla 4

*Resultados límites*

<b>Límite líquido (%):</b>	33,258
<b>Límite plástico (%):</b>	24,924
<b>Índice de plasticidad:</b>	8,334

**Apéndice C. Ensayo Proctor**

Se aplicó lo descrito por la norma I.N.V. E – 142 para las relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo proctor estándar) y así obtener el valor de humedad óptima, lado seco y lado húmedo así mismo la curva de compactación; en este estudio se compacto en un molde de 10.16 cm de diámetro, 11.6 cm de altura, con un martillo de 6 kg que cae libremente desde una altura de 70 cm), produciendo una energía de compactación aproximada de 33,36 Julios.

La norma presenta las siguientes alternativas para la ejecución del ensayo:

Tabla 1

*Métodos*

Método	A	B	C
<b>Diámetro del molde</b>	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
<b>Material</b>	Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4)	Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4")
<b>Capas</b>	3	3	3
<b>Golpes/Capa</b>	25	25	56
<b>Uso</b>	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método A	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8"). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método B,	Si 30 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4)

Tabla 1. *Continuación*

Método	A	B	C
<b>Uso</b>	pero se requerirá la corrección por sobre tamaños (Ver numeral 1.4) y, en este caso, el uso del Método A no reportará ninguna ventaja	pero se requerirá la corrección por sobre tamaños (Ver numeral 1.4). En este caso, la única ventaja de usar el Método B en lugar del Método C, es que se necesita menos cantidad de muestra y el molde pequeño es más fácil de usar	
<b>Otro uso</b>	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se deben usar los Métodos B o C	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	

Nota: I.N.V. E – 142



*Figura 1.* Ensayo proctor estándar

Con la información suministrada se procede a elegir el método para el ensayo, para este caso se realiza por la alternativa del método A, el cual para cada molde compactado se deben realizar 3 capas y a cada se aplica un total de 25 golpes bien distribuidos en el área transversal del material en un molde de 101.6 mm (4") de diámetro y el resultado de la realización del ensayo:

**Determinación de contenido de humedad**

Tabla 2

*Proctor estándar*

Muestra N°	1		2		3		4		5	
Peso del tarro (gr)	15,80	16,10	15,80	15,80	8,40	5,70	5,50	8,40	5,50	6,10
Peso del Tarro+Muestra húmeda	42,80	41,30	57,70	41,70	48,00	48,50	63,80	80,90	57,70	53,70
Peso del tarro+ Muestra Seca (gr)	40,10	38,90	53,30	38,90	42,80	43,00	55,50	70,70	49,60	46,20
Peso del agua (gr)	2,70	2,40	4,40	2,80	5,20	5,50	8,30	10,20	8,10	7,50
Peso del material seco (gr)	24,3	22,8	37,5	23,1	34,4	37,3	50,0	62,3	44,1	40,1
Contenido de humedad (gr)	11,11	10,53	11,73	12,12	15,12	14,75	16,60	16,37	18,37	18,70
<b>% Promedio</b>	<b>10,82</b>		<b>11,93</b>		<b>14,93</b>		<b>16,60</b>		<b>18,37</b>	

**Determinación de la densidad**

Tabla 3.

*Proctor estándar*

Contenido de humedad %	10,82	11,93	14,93	16,60	18,37
Peso del suelo+Molde (gr)	6251	6319	6284	6241	6175
Peso del molde (gr)	4163	4163	4163	4163	4163
Peso del suelo (gr)	2088	2156	2121	2078	2012
Densidad húmeda (gr/cm3)	2,213	2,285	2,248	2,202	2,132
Densidad seca (gr/cm3)	<b>1,997</b>	<b>2,041</b>	<b>1,956</b>	<b>1,888</b>	<b>1,801</b>

Tabla 4

*Resultados proctor estándar*

Densidad Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,04
Humedad Óptima%	11,93

En base a esta información se hace realizó la curva de compactación para las muestras de material en estudio (Ver figura 14):

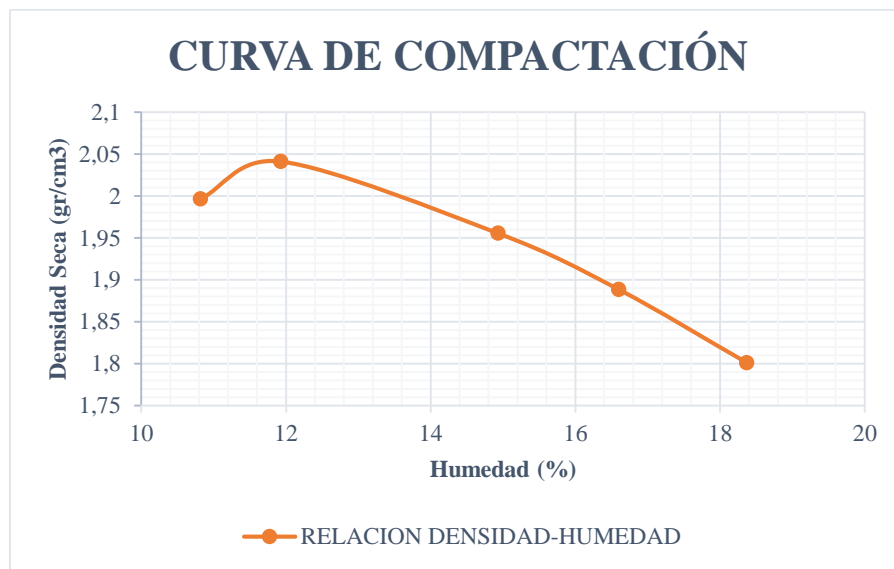


Figura 2. Curva de compactación

Las gráficas de las curvas de compactación del material, permiten determinar los valores de densidad máxima seca y humedad óptima. En la figura 15. Se marca los puntos de referencia que utilizamos para el proyecto.

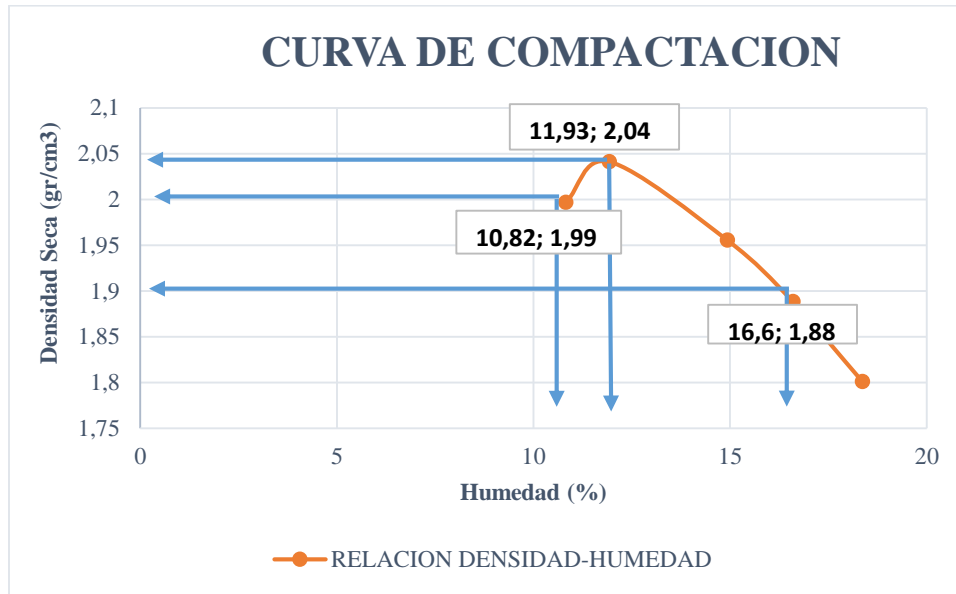


Figura 3. Curva de compactación, puntos de humedad utilizados en el proyecto

## Apéndice D. Montaje de la muestra en la maquina triaxial

### 1. Materiales

Los materiales que se muestran a continuación pueden variar según los tipos de ensayos y requerimientos de este. (Ver Figura 25)

- a) Muestra del suelo con diámetro 5 cm.
- b) 4 Anillos de sellados
- c) 2 piedras porosas
- d) 2 piezas de papel filtros que no se disuelva en agua a la medida de las piedras porosas
- e) 1 Dispositivo de succión de membrana
- f) 1 Membrana de látex
- g) Aditamento de plástico para permitir contacto con la máquina.
- h) 1 Top cap del diámetro de la muestra.

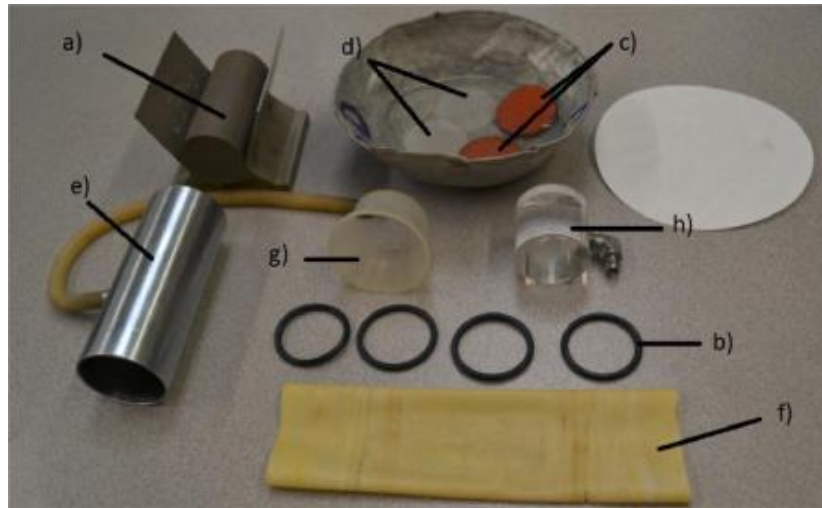


Figura 1. Materiales

## 2. Montaje de la muestra

1. Tomar dimensiones y peso de la muestra.
  
2. Ubicar la membrana dentro del dispositivo de succión de membrana, doblando sus extremos como indica la Figura 26.



Figura 2. Colocación membrana látex

3. Colocar 2 anillos de sellados en cada extremo del dispositivo de succión de membrana evitando que estos queden sobre la membrana de látex como indica la Figura 27.



*Figura 3.* Colocación anillos de sellado

4. Las piedras porosas deben encontrarse en agua junto con el papel filtro por lo menos 15 minutos antes de iniciar el montaje. Colocar una piedra porosa seguida de un papel filtro en el pedestal (Ver Figura 28).



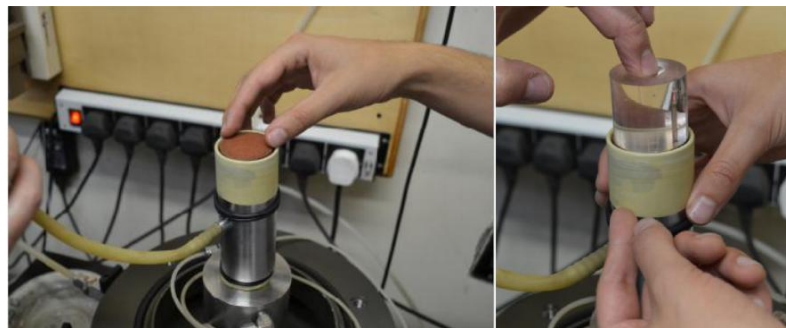
*Figura 4.* Colocación piedras porosas

5. Extraer el aire presente entre la pared del dispositivo de succión de membrana y el látex, succionando con bombas de vacío o con ayuda de la boca, por el aditamento que posee el tubo, manteniendo la succión en el tubo se coloca este de forma que la muestra quede dentro del tubo, y después se cierra soltando el aire (Ver Figura 29).



*Figura 5.* Montaje de la membrana en la muestra

6. Desdoblar la membrana inferior y asegurarla con los anillos de sellados, después colocar en la parte superior del dispositivo de succión de membrana el papel filtro, la piedra porosa y top cap del diámetro indicado, para luego sostener el cabezal y desdoblar con mucho cuidado la membrana de la parte superior del dispositivo de succión de membrana como lo muestra la Figura 30.



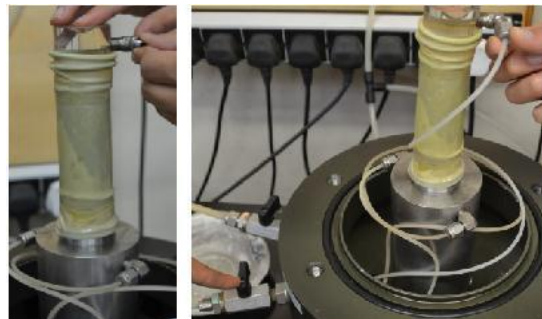
*Figura 6.* Montaje de la membrana en la muestra

7. Se retira el dispositivo de succión de membrana y se invierte con el fin de facilitar la adecuación de los anillos de sellados que asegura el top (Ver Figura 31).



*Figura 7.* Sellado de la membrana en la muestra

8. Conectar el cabezal al conducto que controla la contra presión (Ver Figura 32).



*Figura 8.* Conexión entre el cabezal y la cámara

9. Colocar el aditamento plástico en la parte superior como indica la Figura 33.



*Figura 9.* Montaje aditamento para conexión al pedestal

10. Verificar la altura del pedestal y acoplar la cámara de manera correcta como indica la Figura 34.



*Figura 10.* Acople y sellado de la cámara

Apéndice E. Resultados

Este mismo procedimiento se repitió para las otras dos probetas (Lado seco, lado húmedo) (Ver tablas 21, 22).

Tabla 1

*Módulo de corte secante, lado seco*

Módulo secante (lado seco)													
Ciclo												Promedio	
Deformación unitaria		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0,00057		13130,3	13021,6	12695,9	12535	12676,2	12569,8	12468,5	12379,8	12310,2	12293	12607,99	kPa
0,00071		11598,6	11220,1	11196,6	11172,4	10754,1	10940,5	10755,5	10880,2	10882	10845	11024,46	kPa
0,00104		9271,56	9260,3	9141,8	9859,7	9761,19	9711,9	9679,18	9659,35	9654,46	9725,3	9572,472	kPa
0,00126		9349,25	9001,24	8880,84	10720,1	10204,8	8291,26	8562,05	8533,07	8121,84	9899,6	9156,414	kPa
0,00188		7918,47	4962,67	4825,56	4727,02	4656,47	4478,18	4454,52	4418,69	4399,34	4356,5	4919,742	kPa
0,00460		3836,21	3594,4	3461,63	3377,96	3335,62	3230,74	3184,41	3140,79	3103,15	3082,7	3334,757	kPa
0,00639		3032,98	2821,48	2564,05	2393,46	2361,9	2308,75	2245,53	2274,02	2171,47	2161,9	2433,557	kPa
0,01043		2217,17	1932,56	1841,32	1784,47	1721,48	1686,44	1636,89	1558,39	1520,28	1508,7	1740,77	kPa
0,01963		1558,36	1321,77	1194,68	1109,94	1043,93	971,306	936,643	933,632	881,499	880,34	1083,21	kPa

Tabla 2

*Módulo de corte secante, lado húmedo.*

Módulo secante (Lado húmedo)												
Ciclo												
Deformación unitaria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	
0,00011	9357,96	9304,04	9320,27	9227,84	9189,97	9189,97	9255,86	9163,92	9128,14	9065	9220,299	kPa
0,00024	8409,54	8132,46	8027,57	7973,87	7691	7831,13	7544,01	7697,9	7699,27	7671,3	7867,803	kPa
0,00049	6590,43	6232,41	6137,8	6563,39	6479,39	6437,54	6378,19	6342,28	6330,1	6281,6	6377,311	kPa
0,00077	6002,64	5723,44	5601,24	6749,15	6407,89	5225,19	5362,75	5329,03	5118,66	6176,2	5769,622	kPa
0,00141	4818,44	3048,03	2979,42	2946,61	2924,84	2802,26	2783,38	2731,92	2723,29	2683,6	3044,182	kPa
0,00405	2218,96	1971,5	1943,61	1926,8	1918,32	1856,82	1852,63	1839,64	1824,7	1817	1917,001	kPa
0,00660	1680,34	1566,65	1509,26	1483,89	1461,31	1436,99	1383,43	1390,35	1333,05	1311,8	1455,712	kPa
0,01213	1232,11	1046,83	1032,11	1017,24	1008	1005,53	1001,67	996,855	992,044	992,85	1032,524	kPa
0,02650	827,516	757,905	910,337	913,729	709,128	653,291	643,871	651,774	620,291	619,41	730,7252	kPa