

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS COMPACTADAS ANTE
CARGAS CÍCLICAS – RAMA HUMEDA**

**MARISOL SANABRIA NARANJO
CRISTIAN LEONARDO REYES MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS COMPACTADAS ANTE
CARGAS CÍCLICAS – RAMA HUMEDA**

**MARISOL SANABRIA NARANJO
CRISTIAN LEONARDO REYES MORENO**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Civil

**DIRECTOR
JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO
PhD en Ingeniería Civil**

**CODIRECTOR
VLADIMIR ERNESTO MERCHÁN JAIMES
PhD en Ingeniería del Terreno Cartografía y Geofísica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A mis padres, Edilia Naranjo y Alvaro Sanabria, por el increíble ejemplo de vida que han sido, por inculcarme la honestidad, la responsabilidad y la disciplina, valores que me han acompañado toda mi vida y me han ayudado a alcanzar mis metas. A mis hermanos, Liliana, Alvaro, Marlene, Patricia, Sebastián, y a mi tía Amelia por haberme apoyado y guiado en este proceso.

A mi amiga del colegio Dayana Gómez, por haberme brindado su amistad y apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera y durante todos estos años.

A mis amigas Adriana Salcedo, Nathalia Gualdrón y Silvia Pérez a quienes conocí en la universidad y que llevare siempre en mi corazón por su ánimo y por el apoyo mutuo que nos brindamos en estos años de carrera, gracias a ustedes, a cada trabajo que compartimos, a cada jornada de estudio, a cada traspasada y a todas las veces que salimos adelante juntas es que hoy he logrado finalizar este escalón de mi vida.

A Angie Chaparro y a Gabriela Correa mil gracias por su inmensa solidaridad y colaboración, por tenderme una mano cada vez que lo necesite.

Marisol Sanabria Naranjo

A mis padres Orlando Reyes Acevedo y Florinda Moreno Gamboa por ser el apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por su esfuerzo constante y por ser ese gran ejemplo para mi formación integral.

A mi hermano Julian Orlando Reyes Moreno y a mi abuela Ana Inés Gamboa Martínez por su constante apoyo y ser un motivo más para seguir esforzándome y seguir adelante con mis proyectos.

A toda mi familia por su colaboración recibida y contribuir a ser una mejor persona.

Cristian Leonardo Reyes Moreno.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de proyecto PhD Jorge Alejandro Mendoza por su orientación y apoyo en todo momento. A los laboratoristas Álvaro y German por su buena disposición y colaboración durante la realización de los ensayos de laboratorio, y a los docentes de la línea de suelos de la Universidad Industrial de Santander que contribuyeron a nuestra formación profesional en esta área.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 1.1 COMPACTACIÓN DE SUELOS | 19 |
| 1.2 DINÁMICA DE SUELOS | 19 |
| 1.2 COMPORTAMIENTO DE UN SUELO EN UN ANTE CARGAS DINÁMICAS.. | 20 |
| 1.3 MÓDULO DE CORTE G | 20 |
| 1.4 AMORTIGUAMIENTO | 21 |
| 1.5 ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO..... | 23 |
| 2. DESARROLLO | 25 |
| 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA | 25 |
| 2.2 ENSAYO PROCTOR MODIFICADO. | 25 |
| 2.3 TRIAXIAL | 27 |
| 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 33 |
| 3.1 CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA..... | 33 |
| 3.2 PROCTOR | 34 |
| 3.3 TRIAXIAL | 35 |
| 3.3.1 Módulo de corte secante..... | 37 |
| 3.3.2 Amortiguamiento..... | 38 |
| 4. CONCLUSIONES. | 42 |
| 5. RECOMENDACIONES | 44 |
| BIBLIOGRAFÍA | 45 |
| ANEXOS..... | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Modulo de secante en curva esfuerzo cortante-deformación angular. ... | 21 |
| Figura 2. Curva de reducción de módulo de corte y variación de la razón de amortiguación con el nivel. | 22 |
| Figura 3 Esquema del registro de un ensayo triaxial cíclico. | 23 |
| Figura 4 Esquema del registro de un ensayo triaxial cíclico. | 24 |
| Figura 5. Ubicación de la muestra | 25 |
| Figura 6. Martillo de compactación. | 26 |
| Figura 7. Molde de ensayo Proctor. | 26 |
| Figura 8. Desbaste del suelo. | 27 |
| Figura 9. Muestra húmeda. | 28 |
| Figura 10. Molde triaxial. | 28 |
| Figura 11. Muestra dentro de la membrana. | 29 |
| Figura 12 Ensayo Triaxial. | 30 |
| Figura 13. Ensayo 1. | 31 |
| Figura 14 Ensayo 2. | 31 |
| Figura 15 Ensayo 3. | 32 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Gráfica 1. Gráfica Proctor. | 34 |
| Gráfica 2. Curva de Histéresis de amplitud 0.4 [mm] para una humedad (W) de 16.5%..... | 36 |
| Gráfica 3. Respuesta de la muestra con humedad (W) 16.5%, amplitud 0.4 [mm] | 36 |
| Gráfica 4. Gsec vs deformación de corte. | 38 |
| Gráfica 5. Gsec/Gmax & razón de amortiguamiento para humedad (W) de compactación del 16,5%. | 39 |
| Gráfica 6. Gsec/Gmax & razón de amortiguamiento para humedad (W) de compactación del 18%. | 39 |
| Gráfica 7. Gsec/Gmax & razón de amortiguamiento para una humedad (W) de compactación del 20%. | 40 |
| Gráfica 8. Eff. Axial Stress y Pore Pressure [Humedad (W) 16.5%] | 40 |
| Gráfica 9. Comparación de los amortiguamientos hallados en investigación hecha a una ceniza volcánica..... | 41 |
| Gráfica 10. Curva de granulometría..... | 48 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Amplitudes para ensayo triaxial. | 30 |
| Tabla 2. Clasificación del suelo..... | 33 |
| Tabla 3. Valores de LL, LP y IP. | 33 |
| Tabla 4. Especificaciones Proctor Modificado. Fuente I.N.V.E 142-13..... | 34 |
| Tabla 5. Masa de las muestras..... | 35 |
| Tabla 6. Valores de Gsec. | 37 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Granulometría | 47 |
| Anexo B Tabla de cálculos desarrollados para el ensayo de Proctor modificado. . | 54 |
| Anexo C. Curvas de histéresis Humedad de 16.5% | 55 |
| Anexo D. Curva de histéresis Humedad del 18% | 60 |
| Anexo E Curva de histéresis Humedad del 20% | 65 |
| Anexo F. Relacion esfuerzo efectivo y presión de poros | 70 |
| Anexo G. Cálculos | 73 |

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS COMPACTADAS ANTE CARGAS CÍCLICAS – RAMA HUMEDA*

AUTORES: MARISOL SANABRIA NARANJO
CRISTIAN LEONARDO REYES MORENO**

PALABRAS CLAVE: Comportamiento mecánico, ensayo triaxial cíclico, rama humedad, módulo de corte secante, amortiguamiento.

En este estudio se analiza el comportamiento ante cargas cíclicas de un suelo compactado con material extraído del área metropolitana de Bucaramanga, más específicamente de la escuela normal superior. En primer lugar, se hace la clasificación del suelo realizando los ensayos de granulometría, límite líquido y límite plástico, encontrando así que el material extraído es una arcilla arenosa, luego se establece la curva de compactación proctor para determinar la humedad óptima, y en base a esta, establecer los valores de las diferentes humedades de compactación para crear las muestras a ensayar, siendo estas la humedad óptima y dos humedades correspondientes a la rama húmeda. A continuación, se procede a crear las probetas que se ensayaran en la cámara triaxial, con base en la curva de compactación, se define la densidad de cada humedad y con este la masa que debe contener cada molde; luego de creadas se realizan los ensayos triaxiales cíclicos consolidados no drenados (CU); para esto, se hace el proceso de saturación y consolidación antes de fallar la muestra, y con base en los resultados obtenidos se elaboran las curvas de histéresis graficando el esfuerzo cortante y la deformación de corte; por último se analiza la variación del módulo de corte secante y el amortiguamiento con respecto a la humedad de compactación.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo Codirector Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE BEHAVIOR OF COMPACT SAMPLES BEFORE CYCLICAL LOADS - RAMA HUMEDA *

AUTHORS: MARISOL SANABRIA NARANJO
CRISTIAN LEONARDO REYES MORENO**

KEYWORDS: mechanical behavior, cyclic triaxial test, humid branch, secant cut module, dampness.

In this study, the behavior of the cyclic loads of a compact soil is analyzed with material extracted from the metropolitan area of Bucaramanga, more specifically from the "escuela normal superior". First, the classification of the soil is made by performing the tests of granulometry, liquid limit and plastic limit, finding that the material extracted is a sandy clay, then the proctor compaction curve is established to determine the optimum humidity, and based on to this, establish the values of the different humidities of compaction to create the samples to be tested, these being the optimum humidity and the two humidity corresponding to the wet branch. Then, proceed to create the test pieces to be tested in the triaxial chamber, based on the compaction curve, the density of each moisture is defined and with this the mass that each mold must contain; then the triaxial consolidated triaxial undrained tests (CU) are carried out; for this, the saturation and consolidation process is done before the sample fails, and based on the results obtained, the hysteresis curves are drawn graphing the shear stress and the cutting deformation; Finally, the variation of the secant module and the damping with respect to the compaction humidity is analyzed.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierias fisicomecanicas. Escuela de Ingenieria Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo Codirector Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

INTRODUCCIÓN

Colombia es una de las regiones con mayor actividad sísmica del planeta ya que se encuentra ubicado dentro del Cinturón Circumpacífico (también llamado Cinturón de Fuego del Pacífico debido a su intensa actividad volcánica)¹ que es causado por el enfrentamiento de la Placa de Nazca con la Placa de Sudamérica produciendo el fenómeno de subducción en el cual la placa Nazca por ser más rígida se introduce por debajo de la Placa Sudamericana y continúa moviéndose hacia el manto². El territorio colombiano “comprende un dominio continental deformado situado en el límite de tres placas tectónicas mayores: la placa Sudamericana, la Placa de Nazca al oeste del país y la Placa del Caribe al norte del país”³, esto ha formado diversas estructuras geológicas (volcanes y fallas activas) lo que hace necesario conocer los efectos que causan los eventos sísmicos en las estructuras y suelos para así evitar pérdidas humanas y materiales”⁴.

“Para Colombia la sismicidad está principalmente ligada al denominado “Nido de Bucaramanga” y lo demás se reparte entre la zona de subducción de la placa de Nazca y la movimientos intraplaca”⁵; de manera general se distribuye en: sismos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas (sismicidad Andina), sismicidad de subducción del Pacífico, sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga y, sismicidad de corteza difusa”⁶ Por lo dicho

¹ ARANGO GUEVARA A. F., “Análisis de la sismicidad tectónica en Colombia y México entre los años de 1999 y 2001.” Revista Mexicana de ciencias geológicas., vol. 1, no. 2, México DF, p. 20, 2005

² TARQUE RUIZ Nicola and LOAIZA C., “Análisis sísmico de edificios,” in 1 Edición., Quito, Ecuador, 2003, p. 704

³ TABOADA A., DIMATE C., and FUENZALIDA A., “Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción,” Fis. la tierra, vol. 10, no. ISSN 0214-4557, pp. 111–147, 1998

⁴ SEGURA HERNÁNDEZ O. I., “Evaluación de amenaza sísmica en municipios del departamento de Cundinamarca,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2015

⁵ ARANGO GUEVARA A. F., Op. Cit.

⁶ TABOADA A., DIMATE C., and FUENZALIDA A., Op. Cit.

anteriormente se entiende que Bucaramanga está ubicada en una zona de alta sismicidad.

La necesidad del hombre por tener una mayor certidumbre sobre las causas y consecuencias que impliquen un riesgo de falla en un terraplén ha llevado a el mejoramiento de las técnicas de compactación⁷. El desempeño de los terraplenes depende de los materiales utilizados en la construcción y a su vez estos dependen de factores como el económico y el lugar de construcción, ya que este es un país que se encuentra en vía de desarrollo y su economía es limitada, por lo tanto la infraestructura no se rige por los mejores diseños sino por los que se pueden costear. Por esto en su construcción se utilizan los materiales más económicos y fáciles de obtener, es decir, los superficiales como es el caso de los suelos finos y arenosos cuyas características los hacen suelos inestables, colapsables y susceptibles a los cambios de humedad y de cargas, ocasionando deformaciones que pueden generar daños significativos sobre las estructuras⁸.

Los sismos, cargas vehiculares, y algunas máquinas generan “vibraciones que se propagan como ondas de diferentes frecuencias cuya aceleración origina fluctuaciones en el estado de esfuerzos en el interior del suelo afectando al equilibrio”, en algunos casos se puede producir la licuación del suelo en determinadas áreas⁹.

Por lo mencionado anteriormente este proyecto se realiza a raíz de la importancia de conocer el comportamiento de un suelo ante cargas dinámicas (sismos, maquinaria, tránsito vehicular y explosiones) para que esto sea utilizado en diferentes áreas para proteger el patrimonio y la vida de las personas.

⁷ ANGUAS P. G., “Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad,” no. 423, p. 120, 2014

⁸ AIASSA G. and ARRÚA P., “Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes,” Rev. EIA, no. 7, pp. 51–61, 2007

⁹ ANGUAS P. G., Op. Cit.

En el presente artículo se exponen los ensayos, cálculos y análisis realizados a un suelo del área metropolitana de Bucaramanga con el fin de estudiar el comportamiento ante cargas cíclicas de suelos compactados a diferentes humedades.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1 COMPACTACIÓN DE SUELOS

La compactación del suelo es la reducción de la relación de vacíos a través de la expulsión de aire por medio de la aplicación de energía mecánica, lo que permite que este se densifique y experimente un incremento en su resistencia (Budhu, 2011), esto es fundamental en el diseño de estructuras de pavimentos, en el cálculo de los parámetros elásticos y en la estimación de la resistencia al corte. La compactación en campo se logra mediante el uso de rodillos, vibro compactadores, aplanadoras neumáticas, etc.; mientras que en el laboratorio se emplean técnicas basadas en el uso de martillos o apisonadores. Generalmente en el laboratorio se emplea el método Proctor para determinar los parámetros de compactación y luego se aplican los respectivos factores de conversión que permitan llevar los parámetros obtenidos con dicha prueba a campo.

1.2 DINÁMICA DE SUELOS

La dinámica de suelos estudia las propiedades y el comportamiento del suelo bajo esfuerzos dinámicos. Los sismos, explosiones, vibración de maquinaria, tráfico vehicular y ferroviario, procesos constructivos, entre otras posibles cargas pueden causar acciones dinámicas en los suelos. La dinámica de suelos se complementa con otras áreas del conocimiento de la ingeniería civil como lo son la dinámica estructural, dinámica del medio continuo y la ingeniería sísmica, entre otras. Ante cargas o sollicitaciones dinámicas el suelo puede presentar pérdida de resistencia o pérdida de la capacidad portante, cambios de volumen, cambios en el estado de esfuerzos, amplificación dinámica y resonancia. Mediante ensayos de laboratorio o

de campo se pueden hallar parámetros dinámicos del suelo tales como módulo de corte (G), módulo de rigidez dinámico (μ), relación de amortiguamiento (ξ) y relación de poisson (ν) que se utilizan como datos en modelos matemáticos para análisis sísmico y aplicaciones de diseño de estructuras¹⁰.

1.2 COMPORTAMIENTO DE UN SUELO EN UN ANTE CARGAS DINÁMICAS.

Ante cargas dinámicas las partículas de un suelo se pueden mover de dos formas:

- Ondas longitudinales (ondas P): En este las partículas de suelo se mueven paralelamente a la dirección de la onda.
- Ondas transversales (ondas S): también llamadas ondas de corte solo se propagan en sólidos ya que los líquidos no soportan esfuerzos de corte. Las partículas de suelo se mueven perpendicularmente a la dirección de la onda.

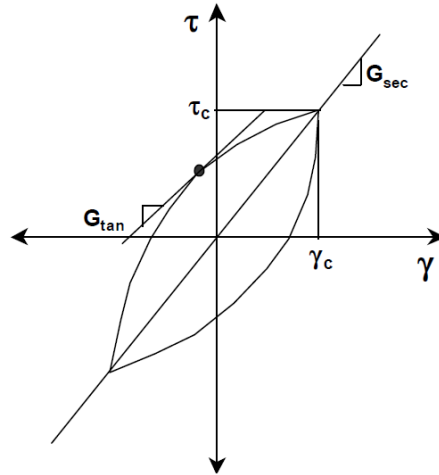
1.3 MÓDULO DE CORTE G.

Es la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva y es una medida de la dureza del material. El módulo de corte se obtiene calculando la pendiente de la curva esfuerzo cortante – deformación angular. La figura 1 define el comportamiento de los parámetros de esfuerzo-deformación, ante la acción de fuerzas cortantes. Este valor varía con el nivel de deformación, cada vez que es mayor, el módulo (G) disminuye. “La inclinación de la curva depende de

¹⁰ BRAN SANCHEZ H. A., GONZALEZ CRUZ Jose Guillermo; ORTIZ LANDAVERDE, Rafael Antonio; “Métodos de Ensayo para la Determinación de las Principales Propiedades Dinámicas de los Suelos de El Salvador,” Universidad de el Salvador., 2009

la rigidez del suelo, el cual puede ser descrito por el módulo de cortante tangente G_0 ¹¹

Figura 1. Modulo de secante en curva esfuerzo cortante-deformación angular.



Fuente: (LUNA R. and JADI H. 2000)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \text{ [kPa]}$$

Donde τ es la tensión de corte y γ la deformación angular¹².

1.4 AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento, ξ , muestra la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía.

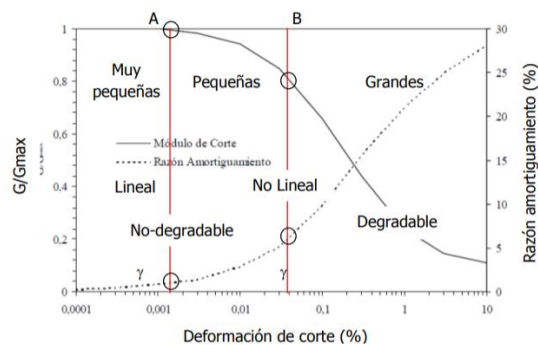
¹¹ RATIO D., SOIL F. O. R., and IN A. S. H., "Cortante y relación de amortiguamiento para setting degradation curves shear modulus and," Rev. Investig. del Quindío., vol. 27, no. 2, pp. 102–109, 2015

¹² VILLEGAS BADILLO A., "Evaluación de la resiliencia sísmica en redes de transporte," Universidad Nacional Autónoma de México, 2017

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{A_{\text{lazo}}}{2\pi G_{\text{sec}} \gamma_c^2} [\%]$$

Donde W_D es la energía disipada, W_S la energía de deformación máxima, A_{lazo} es el área del lazo del ciclo de histéresis. La figura 3 muestra la curva de reducción del módulo que “es la representación normalizada del módulo de corte versus el módulo de corte máximo, donde se observa que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta el nivel de deformación. La razón de amortiguamiento también depende del nivel de deformación siendo mayor a medida que aumenta la deformación de corte”¹³, este comportamiento se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Curva de reducción de módulo de corte y variación de la razón de amortiguación con el nivel.



Fuente: (SUN et al. 1988) (RODRÍGUEZ, 2005)

El comportamiento dinámico de un suelo es un factor indispensable para el cálculo de la respuesta del perfil de suelos; se tiene en cuenta parámetros dinámicos como la curva de degradación del módulo de cortante y el radio de amortiguamiento, estos parámetros inducen en el suelo esfuerzos cortantes generados por ondas sísmicas que se propagan en el suelo. “Un suelo típico sujeto a cargas cíclicas simétricas pueda exhibir comportamiento histórico”¹⁴

¹³ VINET L. and ZHEDANOV A., “Factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas,” Universidad Pontificia Javeriana (Bogotá), 2011

¹⁴ RATIO D., SOIL F. O. R., and IN A. S. H.,

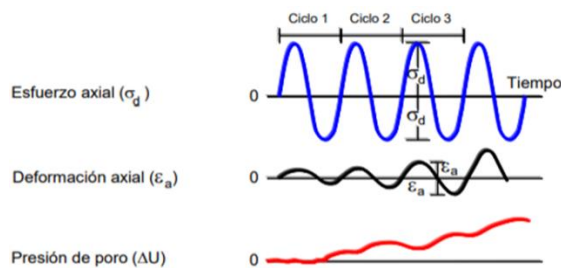
1.5 ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO.

Históricamente Casagrande y Shannon en año de 1948, desarrollaron un equipo que permitía aplicar cargas dinámicas. En el año 1959 Seed and Fead describen un equipo que usa un pistón neumático para la aplicación de la carga cíclica, el dispositivo permite someter los especímenes de ensaye a una presión de confinamiento¹⁵.

En ensayo triaxial cíclico tiene como finalidad investigar el comportamiento de esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de un espécimen cilíndrico de suelo, sometido a esfuerzo axiales cíclicos. El ensayo TC (Triaxial cíclico) consta de una cámara de confinamiento, un marco de carga con un pistón neumático para aplicar esfuerzos cíclicos, tres transductores, un para medir el esfuerzo aplicado, otro para medir la deformación axial y un tercero para medir la presión de poros que se desarrolla durante el ensayo¹⁶.

Con el ensayo TC se obtiene un registro de la variación de: la carga axial aplicada, σ_d , la deformación axial producida, ε_a , y la presión de poros, Δu , generada durante la aplicación del esfuerzo cíclico (ver figura 3)¹⁷.

Figura 3 Esquema del registro de un ensayo triaxial cíclico.



Fuente: (ABRAHAM J.. UNAM 2013)

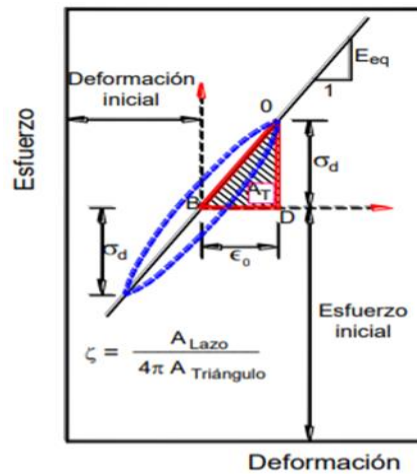
¹⁵ DÍAZ-RODRÍGUEZ J. A., "Caracterización dinámica de los suelos - Ensayos de campo y laboratorio," Universidad Nacional Autónoma de México., 2013

¹⁶ *Ibíd.*

¹⁷ *Ibíd.*

El ensayo triaxial cíclico permite visualizar un lazo de histéresis. En la figura 4 se presenta el estado inicial de consolidación de espécimen la variación del esfuerzo axial cíclico, σ_d , y la variación de la deformación axial cíclica, ε_a ¹⁸.

Figura 4 Esquema del registro de un ensayo triaxial cíclico.



Fuente: (ABRAHAM J. UNAM 2013)

El módulo equivalente de Young, E_{eq} , se determina a partir de la pendiente de la línea que une los puntos extremos del lazo de histéresis.

¹⁸ Ibíd.

2. DESARROLLO

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

La muestra es una arcilla arenosa típica del área metropolitana de Bucaramanga, esta muestra fue obtenida de la excavación de la obra realizada en la Escuela Normal Superior, ubicada en la carrera 27 # 29-69 de la ciudad de Bucaramanga. En la figura 5 se puede ver la ubicación espacial tomada de google maps.

Figura 5. Ubicación de la muestra



Fuente: Google Maps.

2.2 ENSAYO PROCTOR MODIFICADO.

Para realizar el ensayo se seca la muestra a temperatura ambiente y se pasa por el tamiz #4, luego se toman 4 muestras con peso de 2500 gramos y se agrega 100 ml, 150 ml, 200 ml y 250 ml de agua a cada muestra respectivamente.

A continuación, se compacta la muestra en el molde con el martillo descritos en la norma I.N.V.E 142-13¹⁹, la compactación se realiza en 5 capas y 25 golpes por capa.

Figura 6. Martillo de compactación.



Se toma una muestra representativa del suelo compactado y se pesa para obtener el peso del suelo húmedo luego se lleva al horno para obtener el peso del suelo seco. Con los resultados obtenidos de las cuatro muestras se procede a realizar los cálculos para crear la curva de compactación.

Figura 7. Molde de ensayo Proctor.



¹⁹ INVIAS, "Sección 100 - suelos," Normas de ensayo de materiales para carreteras. p. 798, 2012

Al finalizar la última capa de compactación se procede a retirar el anillo superior del molde y se desbasta el suelo al nivel del molde.

Figura 8. Desbaste del suelo.



2.3 TRIAXIAL

El ensayo triaxial se elabora siguiendo la norma INV E-153-13²⁰. Primero se toman dos muestras de material del mismo peso y se colocan en el horno precalentado por un intervalo de una hora, luego se pesan para tomar la masa de suelo seco y así obtener la humedad natural.

$$H \text{ natural} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso del suelo seco}} * 100\%$$

Conociendo que la muestra tendrá un diámetro de 50 mm y 100 mm de altura se calcula el volumen y con este se procede a determinar la masa necesaria para alcanzar la densidad correspondiente a la humedad seleccionada de acuerdo con la curva de compactación. Para esto se utilizan la siguiente ecuación.

²⁰ Ibíd.

$$m = \rho * v$$

Donde ρ es la densidad, m es la masa y v el volumen.

Con la humedad seleccionada y la humedad natural obtenida se calcula la cantidad de agua que se debe adicionar a la muestra.

Figura 9. Muestra húmeda.



Se agrega aceite en la parte interna del molde para evitar que la muestra se pegue a las paredes y se dañe. Se toma el molde, se ajustan los amarres para evitar pérdida del material y se coloca sobre una superficie totalmente plana.

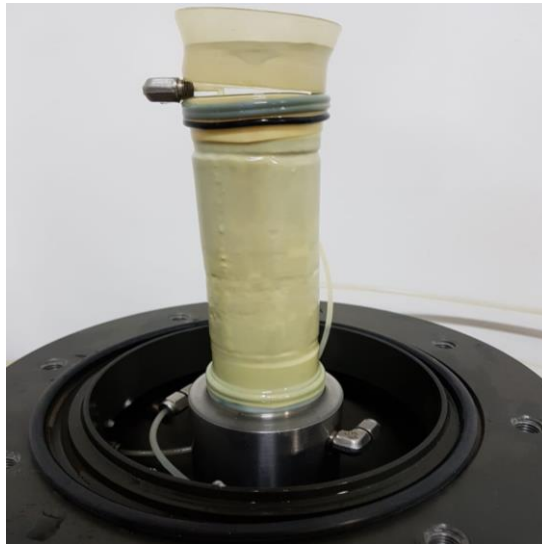
Figura 10. Molde triaxial.



A continuación, se procede a compactar el material usando el martillo, ya que no se tiene un proceso a seguir para esto, se realiza a prueba y error, aplicando igual número de golpes a cada capa hasta lograr la masa calculada sin superar el ($\pm 1\%$) de error.

Se llevan las probetas a la maquina respectiva para realizar el ensayo triaxial, una por una se realiza el debido procedimiento colocando la probeta dentro de la membrana para así dar inicio al ensayo.

Figura 11. Muestra dentro de la membrana.



Ya armada la máquina para el ensayo comienza el proceso de Saturación el cual no tiene un tiempo fijo, sino hasta que la muestra llegue a un porcentaje de saturación mayor al 90%, el siguiente paso es la consolidación de la muestra.

Figura 12 Ensayo Triaxial.



Con la muestra saturada y consolidada se da inicio al último proceso que consiste en aplicar 9 cargas a las probetas, cada carga con una amplitud mayor a la anterior hasta llegar a los 2 [mm]. Los valores de la amplitud observados en la Tabla 6 son los recomendados por el fabricante del equipo de ensayo triaxial.

Tabla 1. Amplitudes para ensayo triaxial.

| 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 |

Finalmente se retira la muestra de la máquina y con los datos obtenidos en el ensayo se realizan los análisis correspondientes.

Figura 13. Ensayo 1.



Figura 14 Ensayo 2.



Figura 15 Ensayo 3.



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA.

Para hacer una clasificación del suelo se realizó los ensayos de granulometría, límite líquido y límite plástico (ver anexo 1).

Tabla 2. Clasificación del suelo.

| | |
|------------|-------|
| Gravas [%] | 0.17 |
| Finos [%] | 56.03 |
| Arenas [%] | 43.8 |

Analizando los datos obtenidos en la granulometría representados en la tabla 2, hay un gran porcentaje de material fino y de arena. Debido a que el suelo tiene un porcentaje de finos mayor al 50% este se clasifica como un suelo fino.

Los resultados de los ensayos de límite líquido, límite plástico e Índice de plasticidad se pueden encontrar en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de LL, LP y IP.

| | |
|----------------------------|-------|
| Límite líquido (LL) | 32 |
| Límite plástico (LP) | 20.27 |
| Índice de plasticidad (IP) | 11.73 |

Mediante el uso de la carta de plasticidad del USCS (anexo 1) se puede clasificar como un suelo Arcillo arenoso (CL).

3.2 PROCTOR

En la tabla 4 se pueden observar las especificaciones para el desarrollo del ensayo proctor modificado según la norma I.N.V.E142-13²¹.

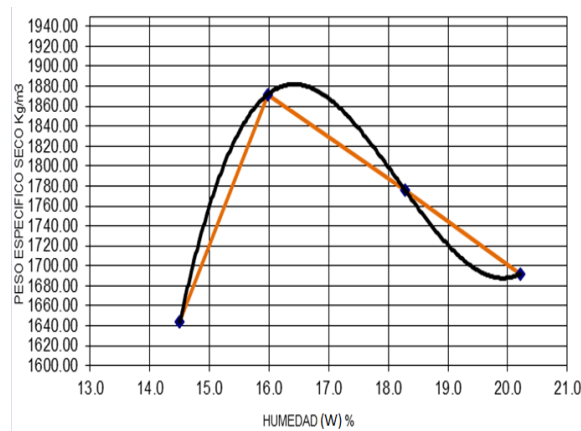
En la gráfica 3 se observa la curva de compactación obtenida tras el desarrollo del ensayo.

Tabla 4. Especificaciones Proctor Modificado. Fuente I.N.V.E 142-13

| TIPO DE ENSAYO | MODIFICADO |
|-------------------|------------|
| NUMERO DE CAPAS | 5 |
| # GOLPES POR CAPA | 25 |
| MOLDE No | 24 |
| DIAMETRO MOLDE(m) | 0,10 |
| ALTURA MOLDE (m) | 0,12 |
| VOL. MOLDE (m3) | 0,00090 |

Fuente: INVIAS, “Sección 100 - suelos,” Normas de ensayo de materiales para carreteras. p. 798, 2012

Gráfica 1. Gráfica Proctor.



²¹ Ibíd.

Observando la gráfica 3, se pudo determinar que la humedad óptima es de 16.5% y la densidad máxima es de 1880 [kg/m³] (ver anexo # 2).

3.3 TRIAXIAL

Se elaboraron 3 muestras con humedades de 16.5%, 18% y 20% respectivamente. Estas muestras se realizan a prueba y error compactando el material en 5 capas hasta lograr la masa hallada.

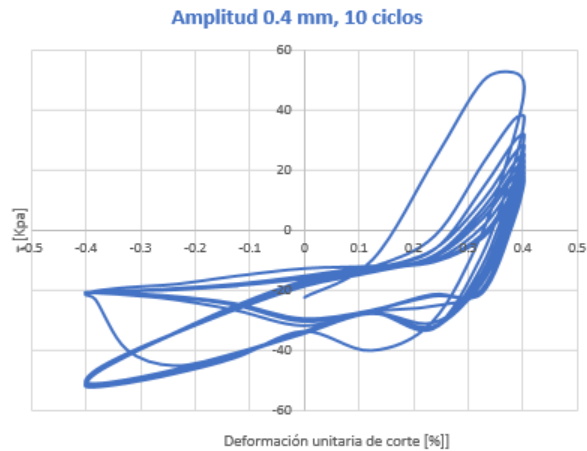
En la tabla 5, se observa la masa calculada correspondiente a cada muestra, la masa obtenida luego de la compactación y el error de laboratorio.

Tabla 5. Masa de las muestras.

| Humedad de la muestra [%] | Masa teórica [g] | Masa en laboratorio [g] | Error [%] |
|---------------------------|------------------|-------------------------|-----------|
| 16,5 | 369,14 | 372,6 | 0,93731 |
| 18 | 353,43 | 353,8 | 0,10469 |
| 20 | 340,77 | 343,2 | 0,71309 |

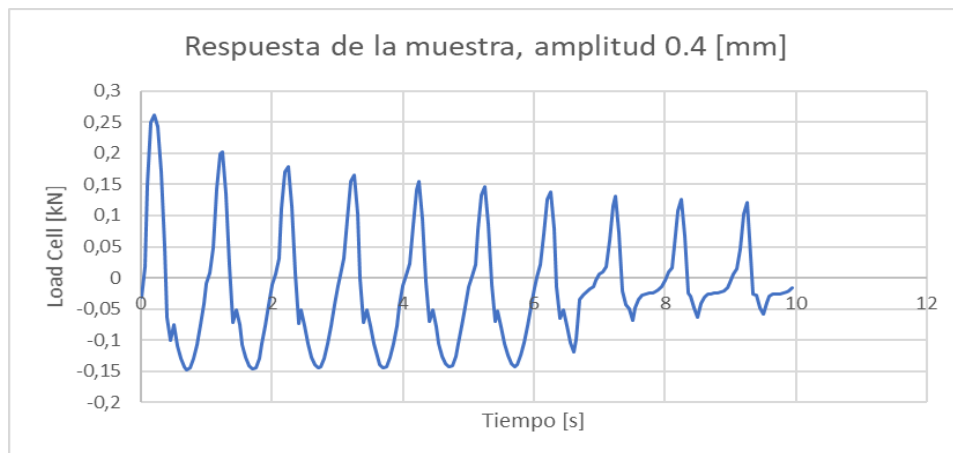
Como parte del análisis se realizaron las respectivas curvas de histéresis para cada uno de los ensayos, que se pueden observar en los anexos 3,4 y 5. En el anexo 3, correspondiente a la muestra con humedad de 16.5%, se puede observar que a partir de la amplitud de 0.4 [mm] las curvas de histéresis tienen un comportamiento inusual (ver gráfica 2).

Gráfica 2. Curva de Histéresis de amplitud 0.4 [mm] para una humedad (W) de 16.5%



Con los datos obtenidos se analizó la respuesta de la muestra al ensayo y se encontró un cambio notable luego del ciclo 7 (ver gráfica 3). Esta variación se puede interpretar como el desgaste de la muestra que provoca una pérdida de la elasticidad del suelo.

Gráfica 3. Respuesta de la muestra con humedad (W) 16.5%, amplitud 0.4 [mm]



3.3.1 Módulo de corte secante Con los resultados obtenidos en los ensayos de triaxial se calculó el módulo de corte secante siguiendo la siguiente ecuación.

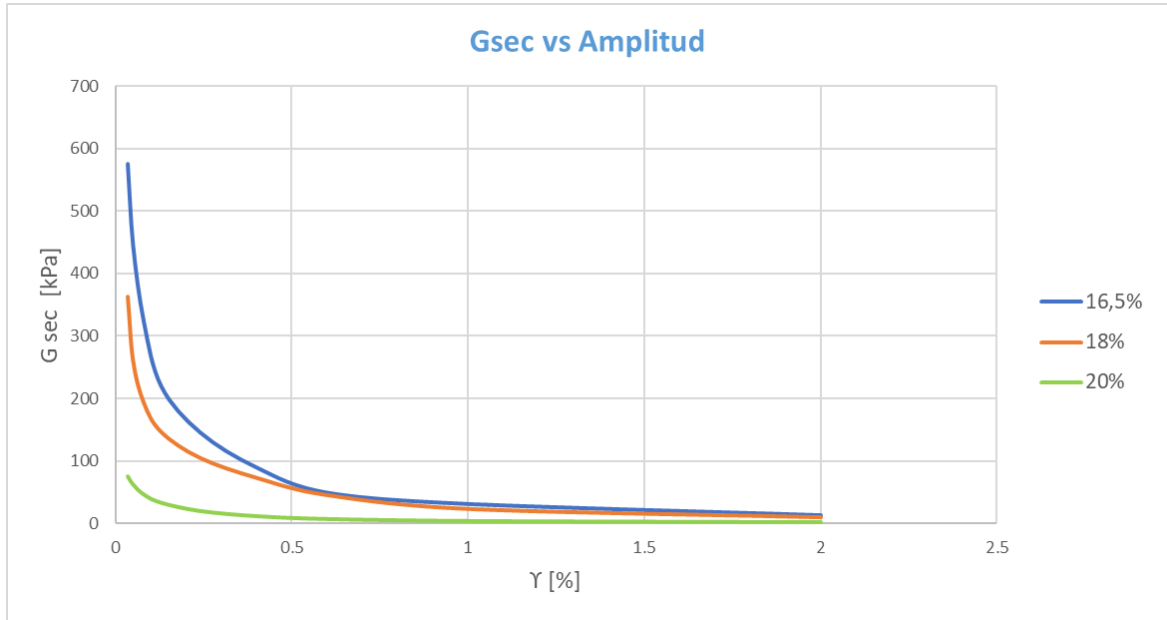
$$G_{sec} = \frac{T}{\gamma}$$

A partir de los resultados (ver tabla 6) se elaboró la gráfica 4 donde se puede observar el comportamiento de Gsec en las 3 muestras.

Tabla 6. Valores de Gsec.

| <i>G_{sec}</i> | | | |
|------------------------|----------------|--------------|--------------|
| HUMEDAD (W) | | | |
| γ [%] | 16,5% [kPa] | 18% [kPa] | 20% [kPa] |
| 0.035 | 575.65 | 362.72 | 76.20 |
| 0.05 | 445.88 | 260.41 | 63.11 |
| 0.08 | 324.32 | 193.48 | 46.92 |
| 0.13 | 219.34 | 146.05 | 33.44 |
| 0.24 | 145.65 | 104.67 | 20.07 |
| 0.4 | 89.51 | 72.88 | 11.81 |
| 0.6 | 49.11 | 45.25 | 7.15 |
| 1 | 31.01 | 23.08 | 3.89 |
| 2 | 12.87 | 9.70 | 1.81 |

Gráfica 4. Gsec vs deformación de corte.

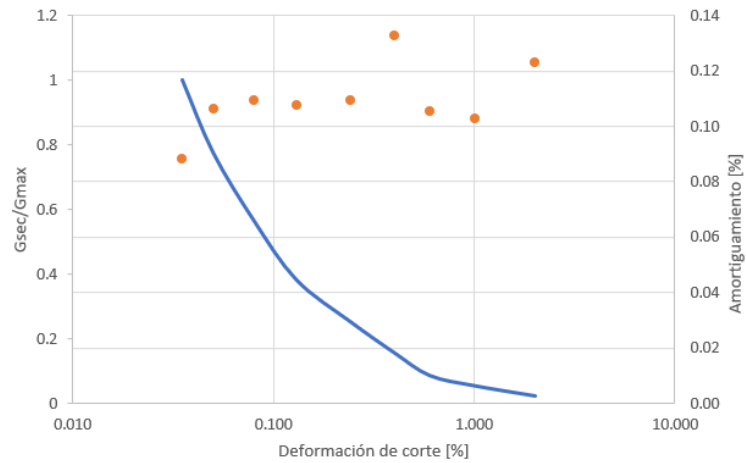


3.3.2 Amortiguamiento Para realizar los cálculos de amortiguamiento se utilizó la siguiente fórmula, ya mencionada en el marco teórico.

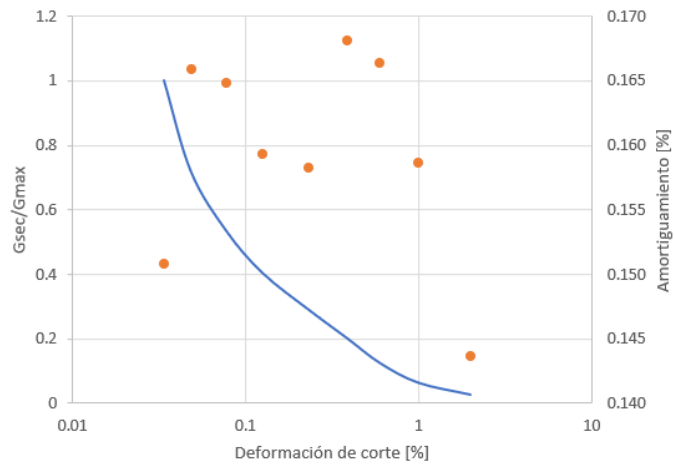
$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{A_{lazo}}{2\pi G_{sec} \gamma_c^2} [\%]$$

Con esta se hallaron los valores de amortiguamiento para las 3 muestras y se elaboraron las gráficas 5, 6 y 7.

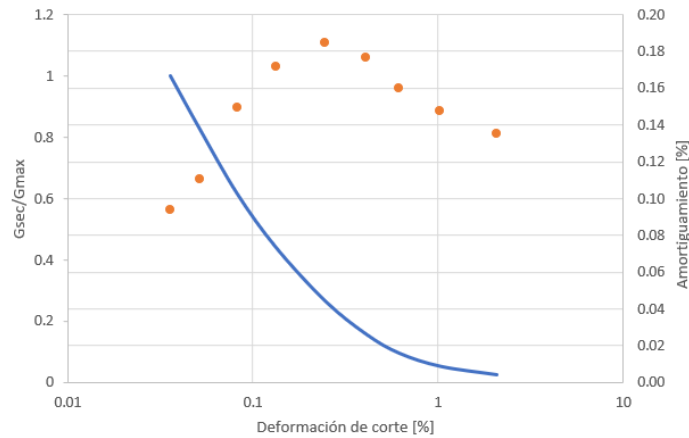
Gráfica 5. G_{sec}/G_{max} & razón de amortiguamiento para humedad (W) de compactación del 16,5%.



Gráfica 6. G_{sec}/G_{max} & razón de amortiguamiento para humedad (W) de compactación del 18%.

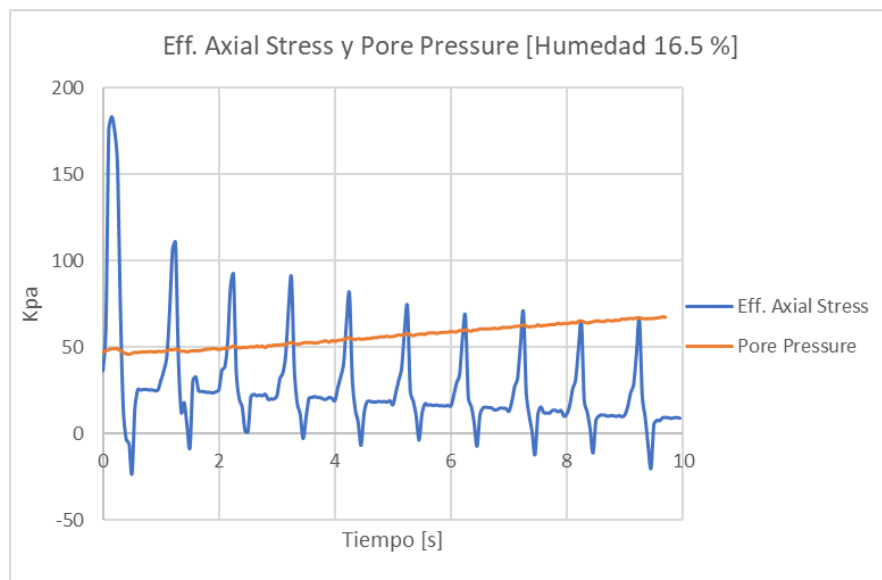


Gráfica 7. G_{sec}/G_{max} & razón de amortiguamiento para una humedad (W) de compactación del 20%.



Debido al inusual comportamiento del amortiguamiento en las 3 muestras representadas en las gráficas 5, 6 y 7; se analizó la presión de poros y esfuerzo efectivo en cada una, el resultado de este análisis se puede observar en la gráfica 8.

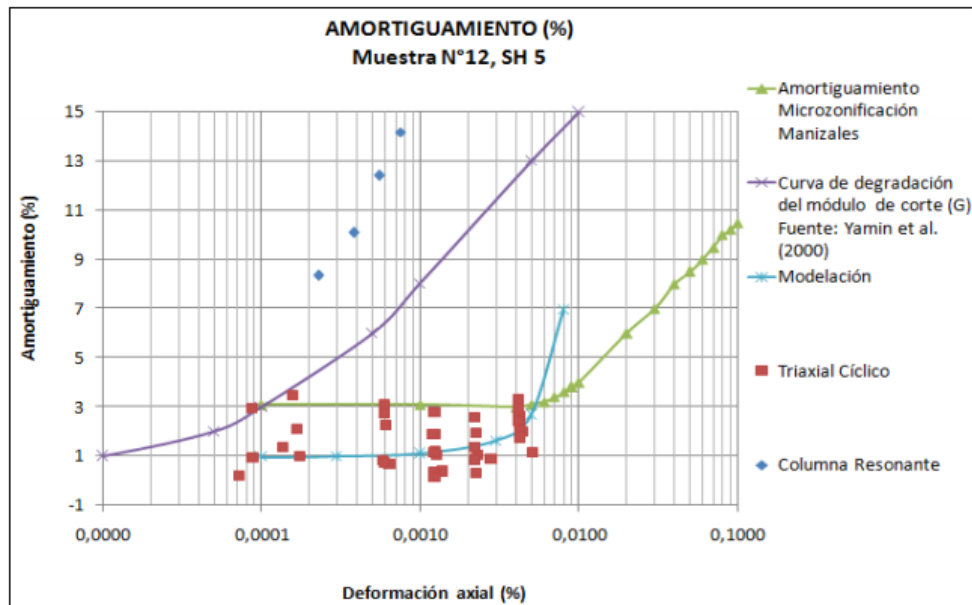
Gráfica 8. Eff. Axial Stress y Pore Pressure [Humedad (W) 16.5%]



Como se puede observar en las gráficas (ver anexo #6) la presión se poros en las 3 muestras es superior al esfuerzo efectivo del suelo en algún momento del ensayo. Esta presión de poros probablemente afecta el amortiguamiento del suelo.

El comportamiento del amortiguamiento es similar al encontrado en la investigación “factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas” publicada por la pontificia universidad javeriana²². En la gráfica 9 tomada de dicho estudio se observa que esta compara diversos métodos de medición de este parámetro.

Gráfica 9. Comparación de los amortiguamientos hallados en investigación hecha a una ceniza volcánica.



Fuente: VINET L. and ZHEDANOV A., “Factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas,” Universidad Pontificia Javeriana (Bogotá), 2011

La gráfica 9 refleja un comportamiento aproximado para los métodos diferentes a los obtenidos con el ensayo triaxial cíclico, y se evidencia una tendencia irregular en los datos del triaxial cíclico, similares a los obtenidos en las gráficas 5, 6 y 7.

²² VINET L. and ZHEDANOV A., Op. Cit.

4. CONCLUSIONES.

Por medio del ensayo proctor modificado realizado siguiendo la norma I.N.V.E 142-13²³ se trazó la curva de compactación y mediante esta se determinaron los valores de humedad óptima y densidad máxima del suelo, los cuales son 16.5% y 1880 [kg/m³] respectivamente, esto permitió identificar la rama húmeda y así seleccionar las dos humedades adicionales a ensayar con una diferencia entre ellas cercana al 2% siendo estas del 18% y 20%.

A partir de los datos obtenidos en el ensayo Triaxial Cíclico, se analizaron los valores de τ esfuerzo cortante y γ deformación de corte obteniendo así el comportamiento de G_{sec} para cada una de las muestras (ver tabla 6). Como se puede observar en la gráfica 4 los valores de G_{sec} tienen un comportamiento decreciente a medida que se aumenta la amplitud aplicada a la probeta y también se presenta una disminución del G_{sec} a mayor humedad. Alcanzando valores máximos de 575.65 kPa para una humedad de compactación del 16.5 %, 362.72 kPa para una humedad del 18% y 76.2 kPa para 20%; Por lo tanto, la dureza del material disminuye con el incremento de la humedad de compactación y de la amplitud. La disminución de la dureza a mayor amplitud puede deberse además por el desgaste de la muestra.

Los resultados obtenidos en el ensayo triaxial, específicamente en el amortiguamiento del suelo presentan un comportamiento irregular probablemente debido a la alta presión de poros en las tres muestras elaboradas, lo cual se evidencia en la gráfica 8 (ver anexo 6). Las elevadas presiones de poros, que claramente son superiores a los esfuerzos efectivos del suelo pudieron impedir el amortiguamiento de este. Tomando como referencia la investigación “factores de

²³ INVIAS, Op. Cit.

amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas” publicada por la Pontificia Universidad Javeriana, donde se realiza diferentes estudios para la determinación del comportamiento del suelo, se puede observar una tendencia similar en el ensayo triaxial cíclico, por ende, no se recomienda el uso de este equipo para hacer un análisis de amortiguamiento en suelos finos arcillosos.

5. RECOMENDACIONES

Para próximos estudios de amortiguamiento a materiales finos arcillosos no se recomienda implementar el ensayo triaxial cíclico debido a la poca confiabilidad por las limitaciones evidenciadas en este tipo de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

AIASSA G. and ARRÚA P., “Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes,” Rev. EIA, no. 7, pp. 51–61, 2007.

ANGUAS P. G., “Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad,” no. 423, p. 120, 2014.

ARANGO GUEVARA A. F., “Análisis de la sismicidad tectónica en Colombia y México entre los años de 1999 y 2001.,” Revista Mexicana de ciencias geológicas., vol. 1, no. 2, México DF, p. 20, 2005.

BRAN SANCHEZ H. A., GONZALEZ CRUZ Jose Guillermo; ORTIZ LANDAVERDE, Rafael Antonio; “Métodos de Ensayo para la Determinación de las Principales Propiedades Dinámicas de los Suelos de El Salvador,” Universidad de el Salvador., 2009.

DÍAZ-RODRÍGUEZ J. A., “Caracterización dinámica de los suelos - Ensayos de campo y laboratorio,” Universidad Nacional Autónoma de México., 2013.

INVIAS, “Sección 100 - suelos,” Normas de ensayo de materiales para carreteras. p. 798, 2012.

RATIO D., SOIL F. O. R., and IN A. S. H., “Cortante y relación de amortiguamiento para setting degradation curves shear modulus and and,” Rev. Investig. del Quindío., vol. 27, no. 2, pp. 102–109, 2015.

SEGURA HERNÁNDEZ O. I., “Evaluación de amenaza sísmica en municipios del departamento de Cundinamarca,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2015.

TABOADA A., DIMATE C., and FUENZALIDA A., “Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción,” *Fis. la tierra*, vol. 10, no. ISSN 0214-4557, pp. 111–147, 1998.

TARQUE RUIZ Nicola and LOAIZA C., “Análisis sísmico de edificios,” in 1 Edición., Quito, Ecuador, 2003, p. 704.

VILLEGAS BADILLO A., “Evaluación de la resiliencia sísmica en redes de transporte,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.

VINET L. and ZHEDANOV A., “Factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas,” Universidad Pontificia Javeriana (Bogotá), 2011.

ANEXOS.

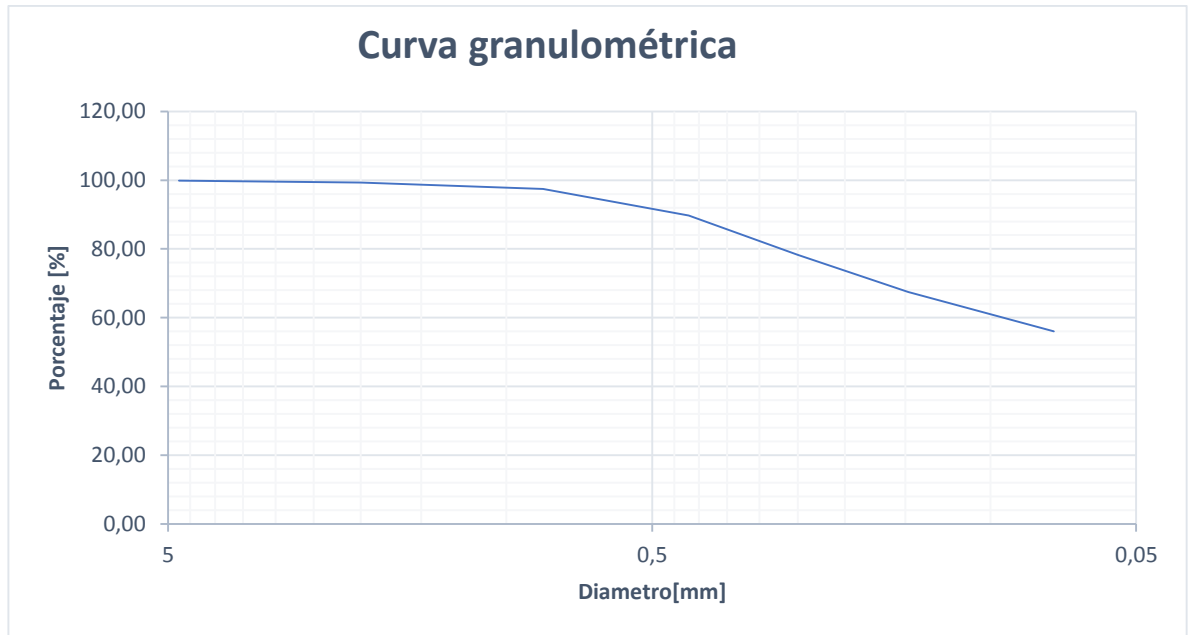
Anexo A. Granulometría

Granulometría

Se toma una muestra de 900 g, se lava y se seca, obteniendo un peso de 401.1 g. Luego se procede a hacer la clasificación de la muestra mediante el método de tamizado, los resultados de este se pueden apreciar en la siguiente tabla.

| N° Tamiz | Diámetro [mm] | Masa retenida [g] | Porcentaje Retenido [%] | Porcentaje acumulado retenido [%] | Porcentaje que pasa [%] |
|------------|---------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| N°4 | 4.75 | 1.5 | 0.17 | 0.17 | 99.83 |
| N°10 | 2 | 4.9 | 0.54 | 0.71 | 99.29 |
| N°20 | 0.84 | 16.3 | 1.81 | 2.52 | 97.48 |
| N°40 | 0.42 | 70.2 | 7.8 | 10.32 | 89.68 |
| N°60 | 0.25 | 102.9 | 11.43 | 21.76 | 78.24 |
| N°100 | 0.148 | 96.9 | 10.77 | 32.52 | 67.48 |
| N°200 | 0.074 | 103 | 11.44 | 43.97 | 56.03 |
| Pasa N°200 | 0 | 5.4 | 0.6 | 44.57 | 55.43 |
| Fondo | | 498.9 | 55.43 | 100 | 0 |

Gráfica 10. Curva de granulometría



Luego se realizan los ensayos de límite líquido (LL) y límite plástico (LP)

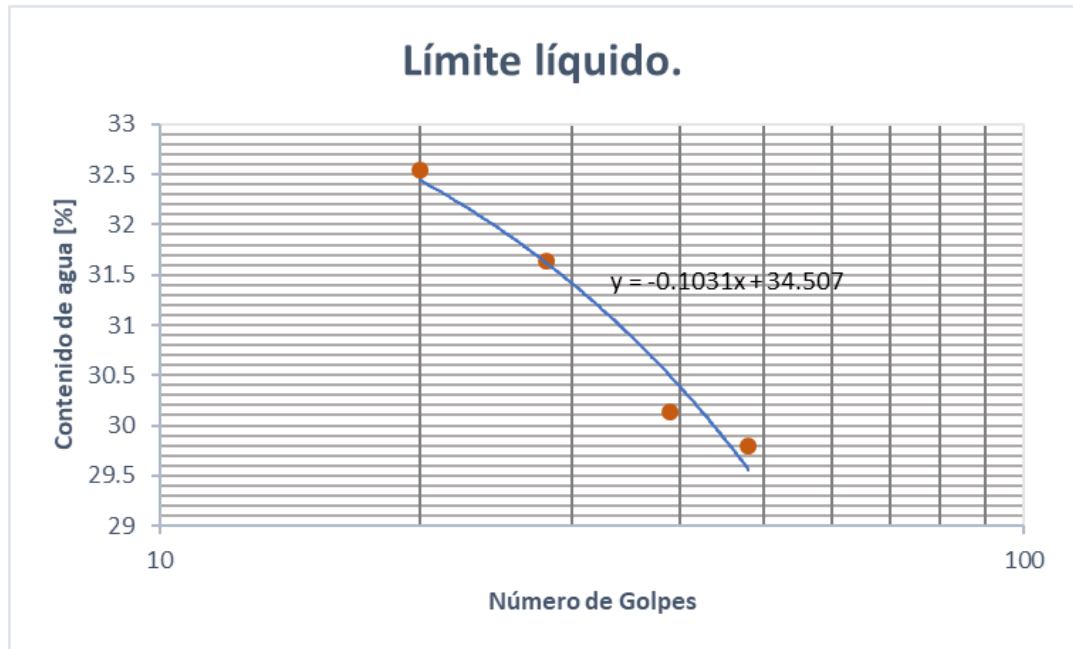
Límite líquido (LL)

Los resultados del ensayo de límite líquido realizados siguiendo la norma I,N.V.E 125-13 se presentan a continuación.

Tabla límite líquido.

| Prueba N° | Cápsula N° | Peso capsula (g) | N° Golpes | Peso Cápsula+Suelo húmedo (g) | Peso Cápsula+suelo seco (g) | Peso del suelo húmedo (g) | Peso del agua (g) | Peso del suelo seco (g) | Contenido de agua (%) |
|-----------|------------|------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | 28 | 7.3 | 48 | 45.2 | 36.5 | 37.9 | 8.7 | 29.2 | 29.7945 |
| 2 | 26 | 7 | 39 | 45 | 36.2 | 38 | 8.8 | 29.2 | 30.1369 |
| 3 | 14 | 7.2 | 28 | 45.9 | 36.6 | 38.7 | 9.3 | 29.4 | 31.6326 |
| 4 | 32 | 7.2 | 20 | 46.7 | 37 | 39.5 | 9.7 | 29.8 | 32.5503 |

Gráfica Límite Líquido



Con los valores se obtuvo la siguiente ecuación

$$y = -0.1031X + 34.507$$

Con la ecuación anterior se calcula el contenido de agua para un número de 25 golpes, obteniendo un valor de 31.93 %. Finalmente se realiza el ensayo de límite plástico siguiendo la norma 1.N.V.E 126-13.

Límite plástico (LP)

Tabla límite plástico

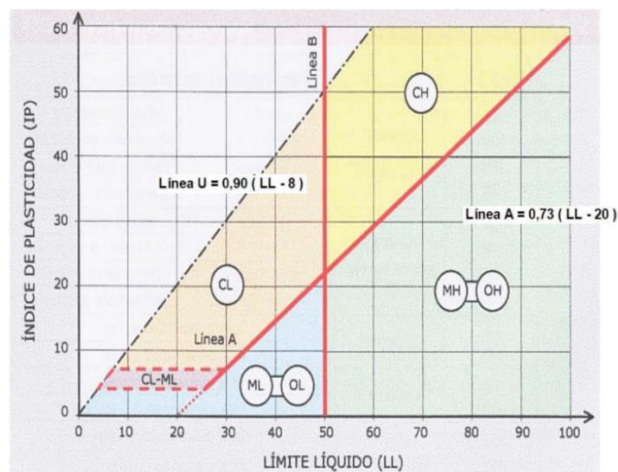
| Prueba N° | Cápsula N° | Peso capsula (g) | Peso Cápsula+Suelo húmedo (g) | Peso capsula+suelo seco (g) | Peso del suelo húmedo (g) | Peso del agua (g) | Peso del suelo seco (g) | Contenido de agua (%) |
|-----------|------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | 17 | 6.9 | 20.4 | 18.1 | 13.5 | 2.3 | 11.2 | 20.54 |
| 2 | 30 | 7.5 | 21.3 | 19 | 13.8 | 2.3 | 11.5 | 20 |
| PROMEDIO | | | | | | | | 20.27 |

Con los datos obtenidos en el ensayo de LP representados en la tabla anterior se determina el contenido de agua de la muestra para cada una de las pruebas y se calcula su promedio obteniendo un valor de 20.27 %.

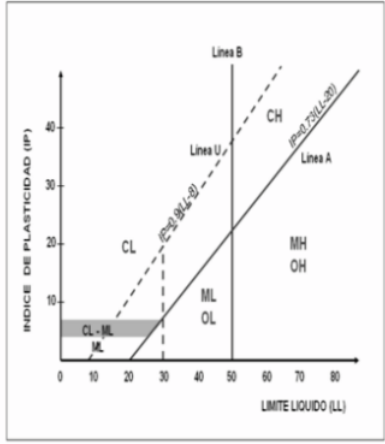
Finalmente se calcula el Índice de plasticidad (IP) para hacer su clasificación final, donde IP se define como $IP = LL - LP$. Los valores de LL, LP e IP se muestran en la siguiente tabla.

| | |
|----------------------------|-------|
| Límite líquido (LL) | 32 |
| Límite plástico (LP) | 20.27 |
| Índice de plasticidad (IP) | 11.73 |

Mediante el uso de la carta de plasticidad del USCS podemos clasificarlo como un suelo Arcillo arenoso (CL).



Clasificación USCS. LIMITES DE ATTERBERG

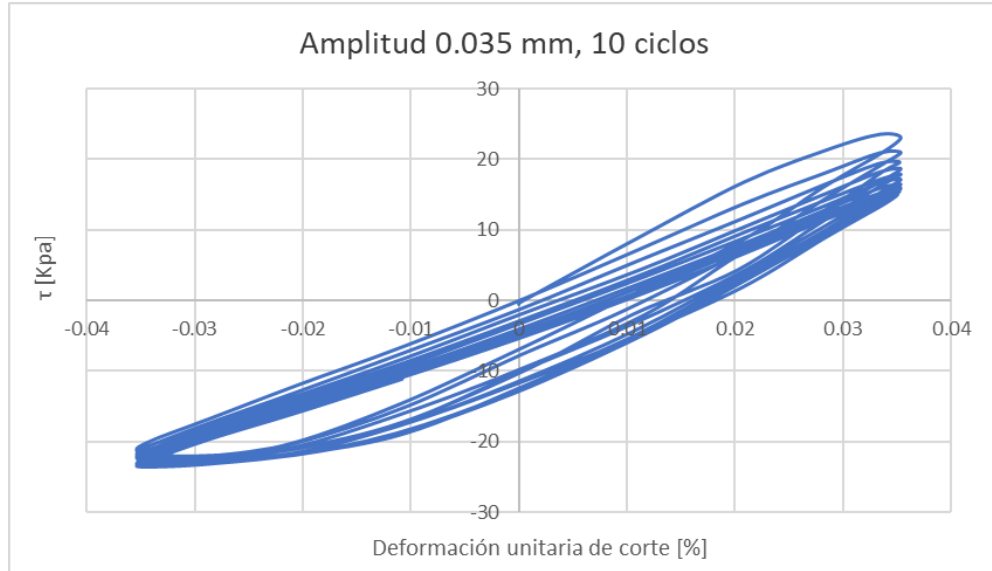
| DIVISIÓN MAYOR | | SÍMBOLO | NOMBRES TÍPICOS | CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO | |
|---|---|---------|--|---|---|
| SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla N° 200 La partícula de 0,074mm de diámetro (la malla N° 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista. | LIMOS Y ARCILLAS Limite liquido menor de 50 | ML | Limos orgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos | EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS G= Gravas; M= limo; O= suelos orgánicos; W= bien gradados; S= arenas; C= arcilla; PI= turbo; P= mal gradados; L= baja compresibilidad; H= alta compresibilidad CARTA DE PLASTICIDAD Para la clasificación de suelos de partículas finas en el Lab.  | |
| | | CL | Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres | | |
| | | OL | Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad | | |
| | LIMOS Y ARCILLAS Limite liquido mayor de 50 | MH | Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos | | |
| | | CH | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas | | |
| | | OH | Arcilla orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad | | |
| | SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS | | PI | | Turbas y otros suelos altamente orgánicos |

Clasificación USCS. LIMITES DE ATTERBERG.

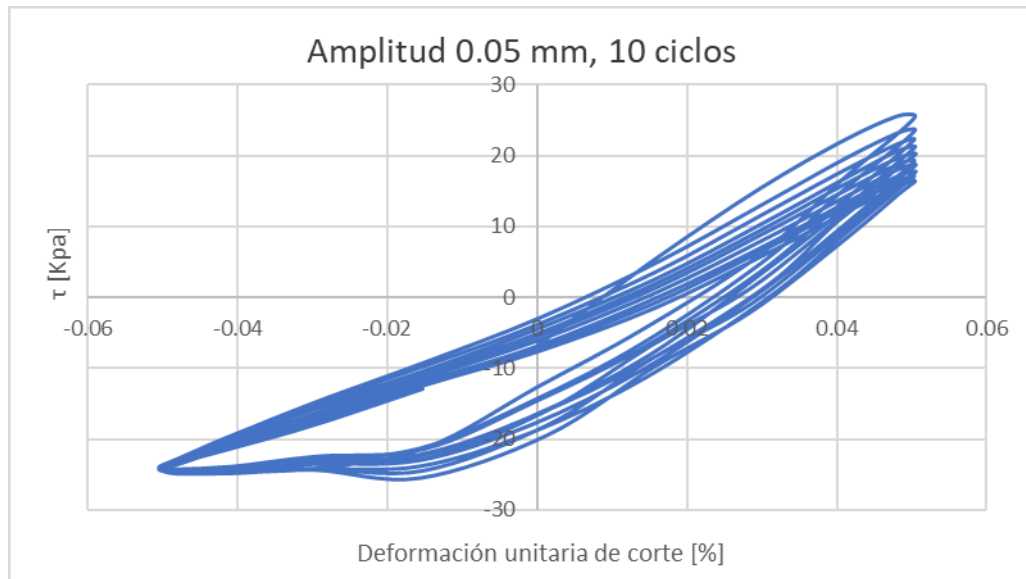
Anexo B Tabla de cálculos desarrollados para el ensayo de Proctor modificado.

| | | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PESO TARA (Kg) | 0.0055 | 0.0046 | 0.0057 | 0.0045 | 0.0084 | 0.0057 | 0.0084 | 0.0056 |
| W TARA + S.H (Kg) | 0.0505 | 0.0496 | 0.0507 | 0.0495 | 0.0534 | 0.0507 | 0.0534 | 0.0506 |
| W TARA + S.S (Kg) | 0.0448 | 0.0439 | 0.0444 | 0.0434 | 0.0460 | 0.0442 | 0.0435 | 0.0457 |
| PESO AGUA | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PESO SOLIDO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| HUMEDAD | 14.5 | 14.5 | 16.3 | 15.7 | 19.7 | 16.9 | 28.2 | 12.2 |
| PROM. HUMEDAD % | 14.50 | | 15.98 | | 18.28 | | 20.21 | |
| PESO MOLDE (Kg) | 4.163 | | 4.163 | | 4.163 | | 4.163 | |
| W MOLDE+S.H (Kg) | 5.863 | | 6.124 | | 6.060 | | 6.000 | |
| W DEL S. H. (Kg) | 1.700 | | 1.961 | | 1.897 | | 1.837 | |
| DENSIDAD H. (Kg/m3) | 1882 | | 2171 | | 2100 | | 2034 | |
| DENSIDAD S. (Kg/m3) | 1644 | | 1872 | | 1776 | | 1692 | |

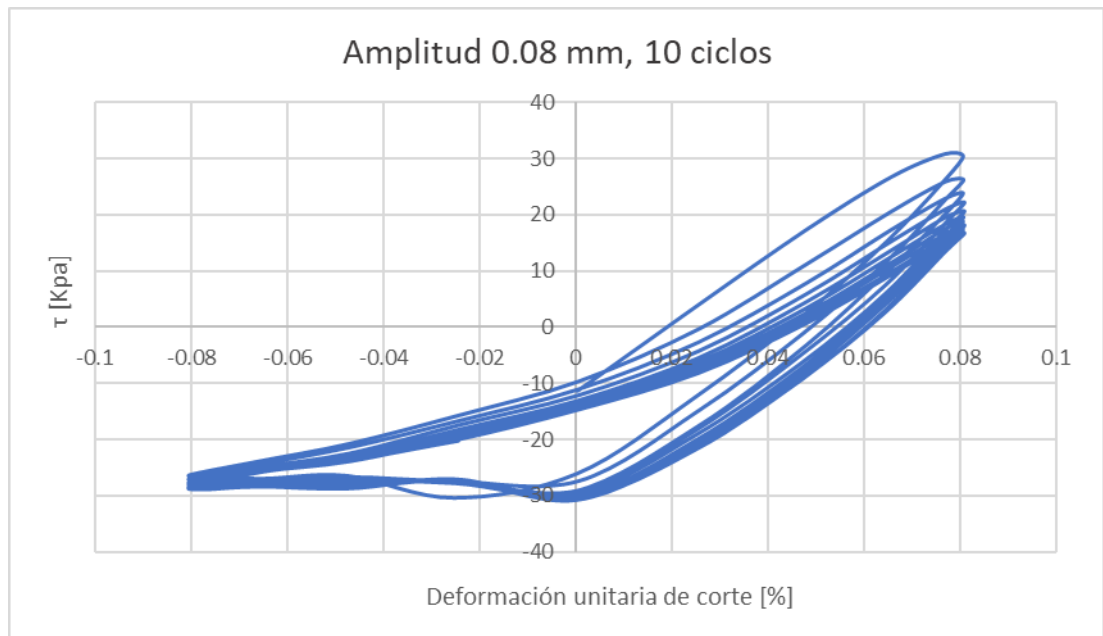
Anexo C. Curvas de histéresis Humedad de 16.5%



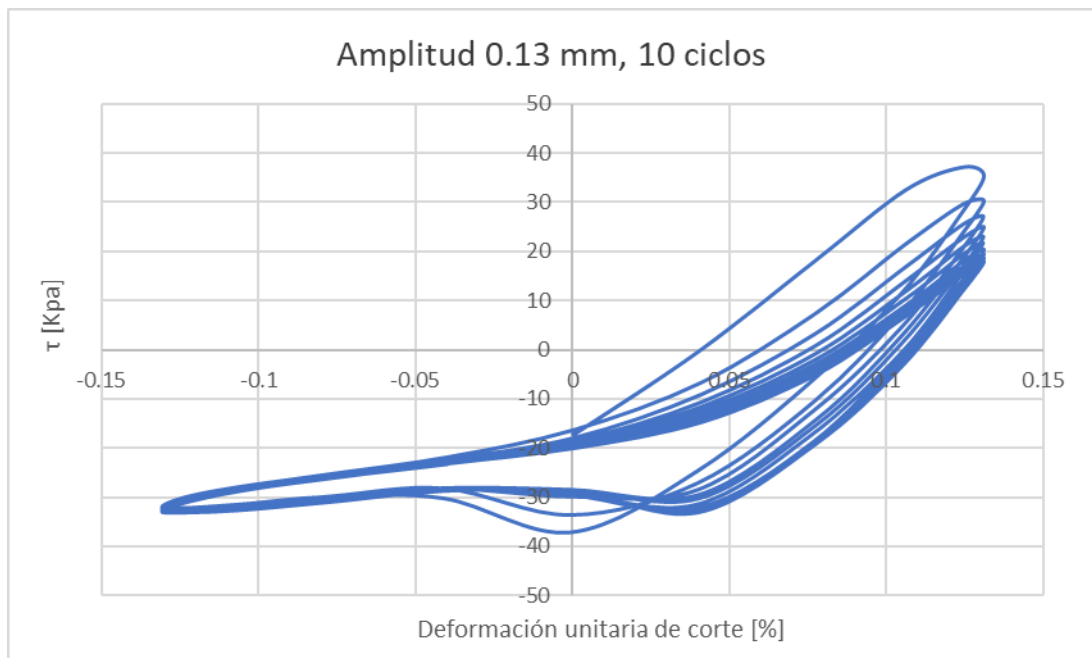
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



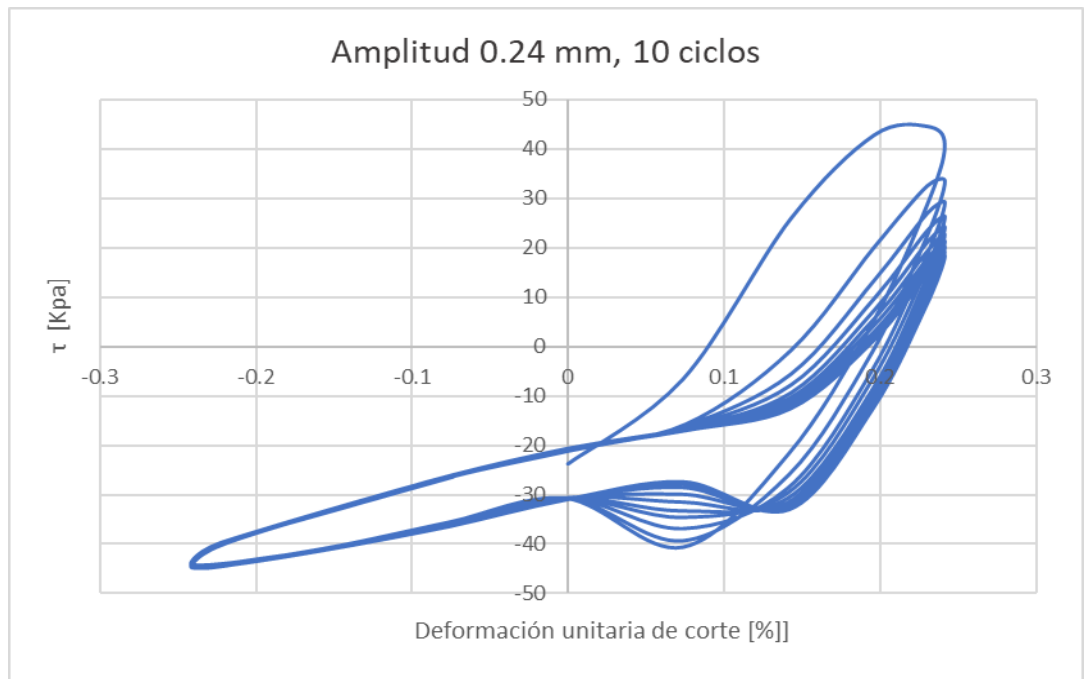
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



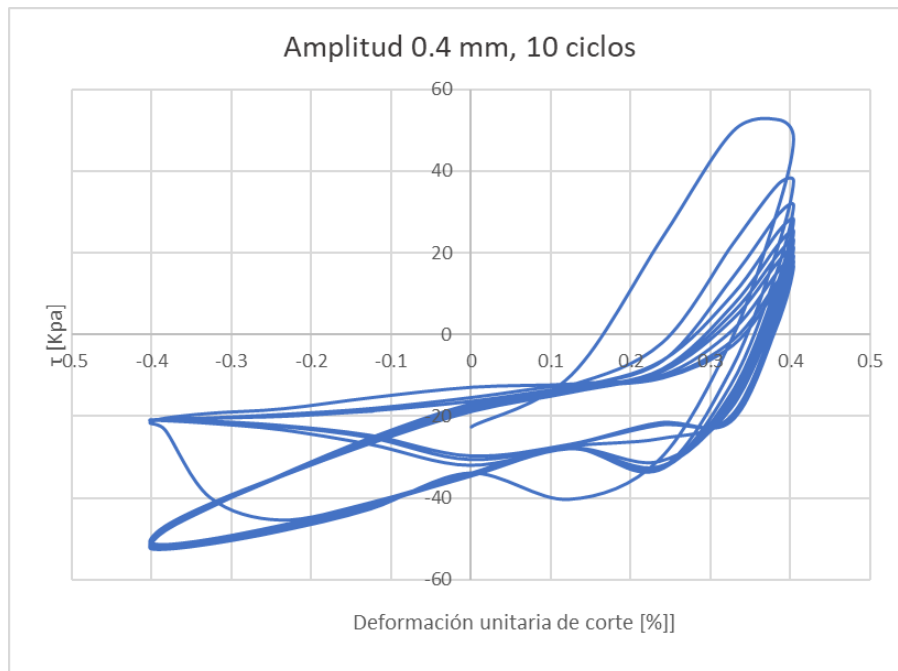
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



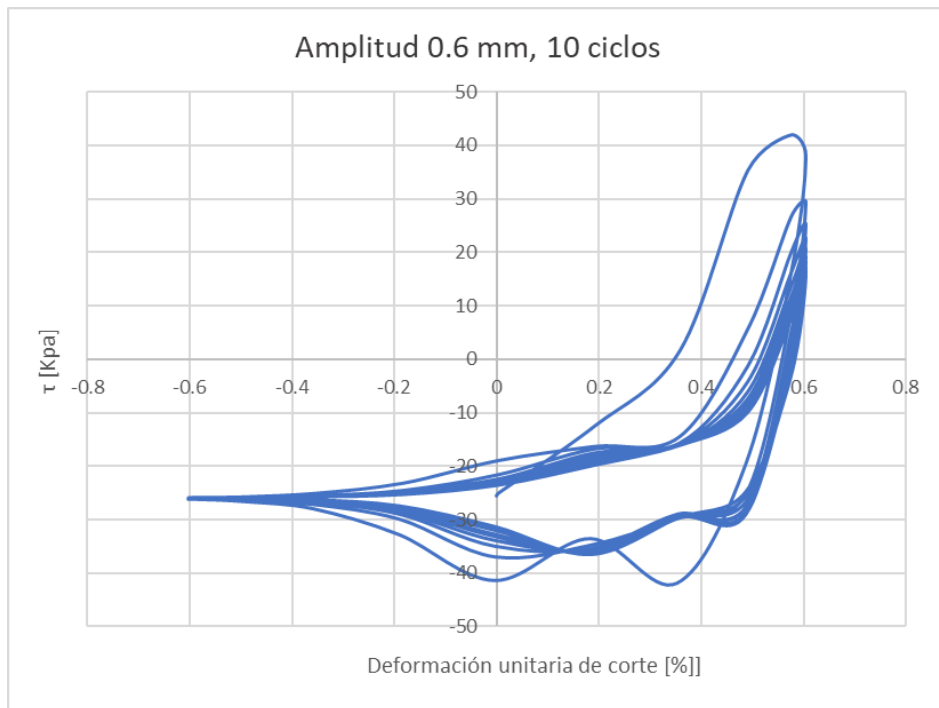
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



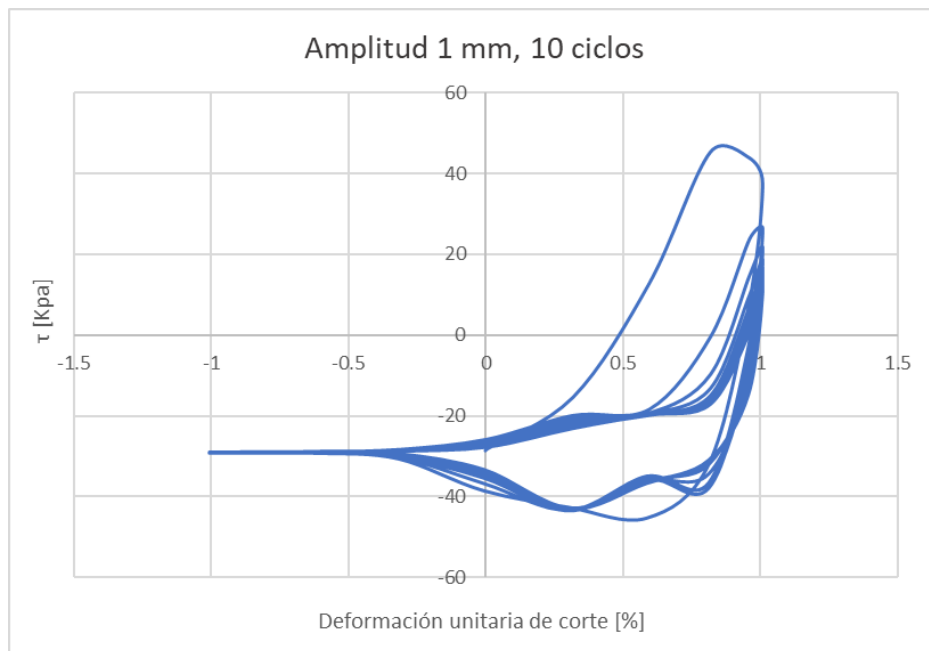
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



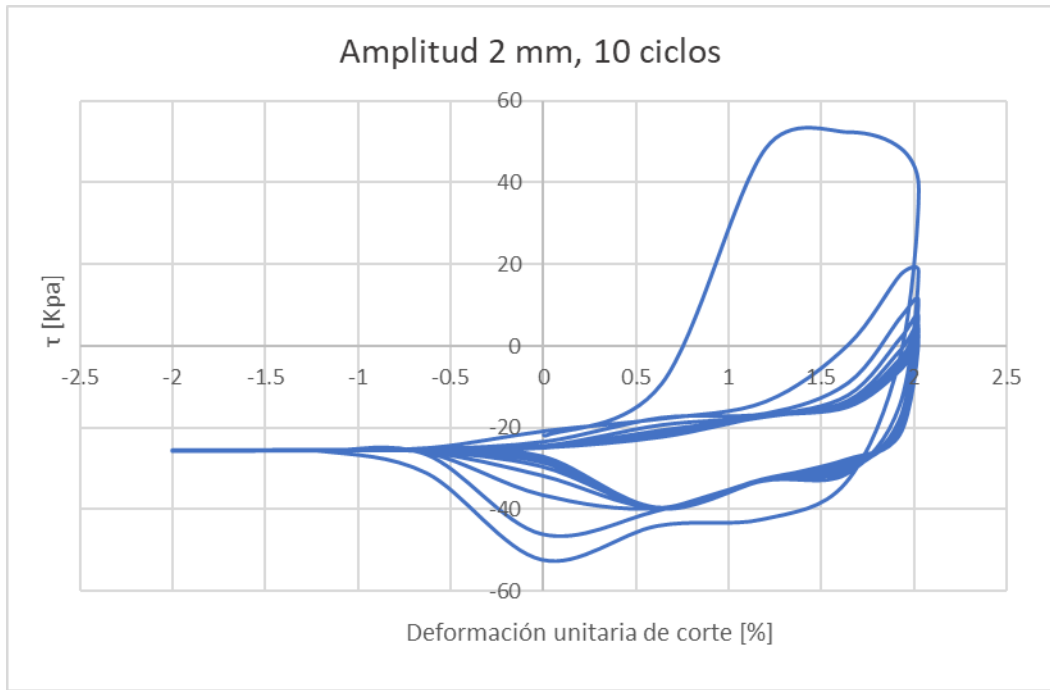
Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]



Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]

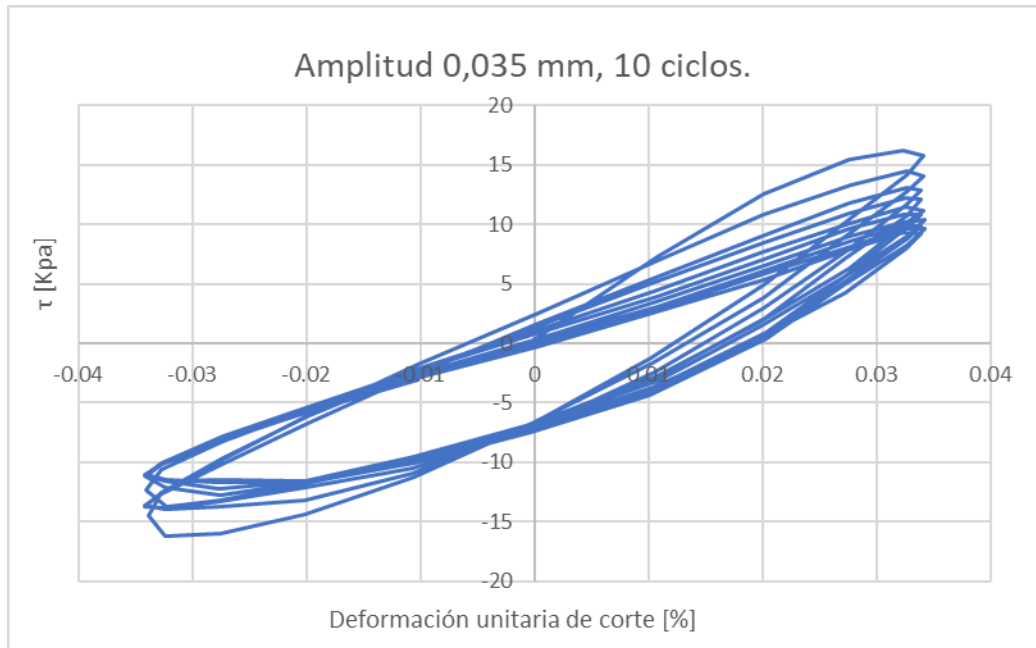


Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]

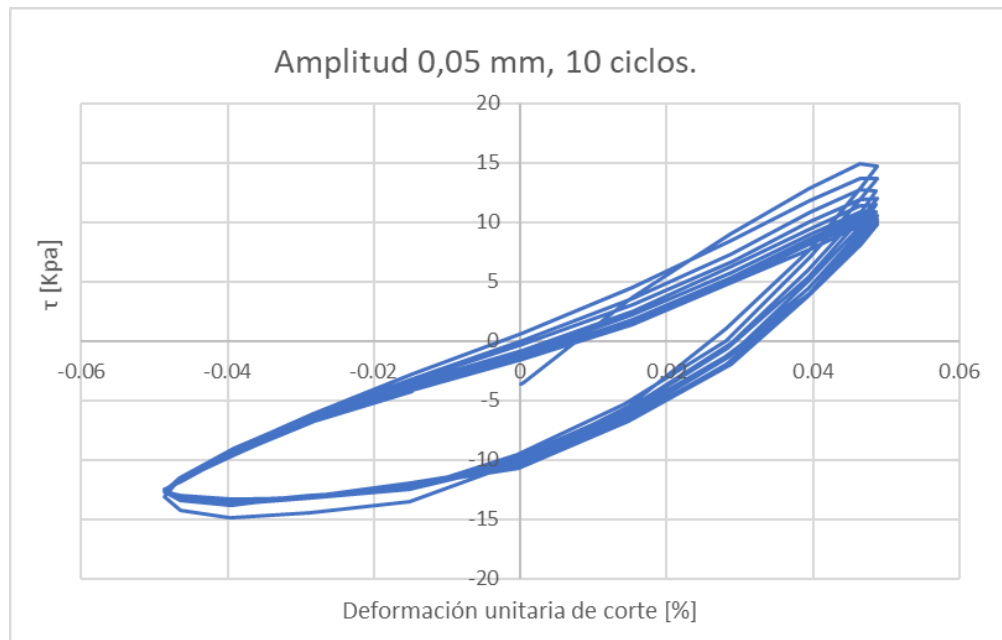


Curva de histéresis para una humedad (W) del 16.5% y deformación unitaria de corte [%]

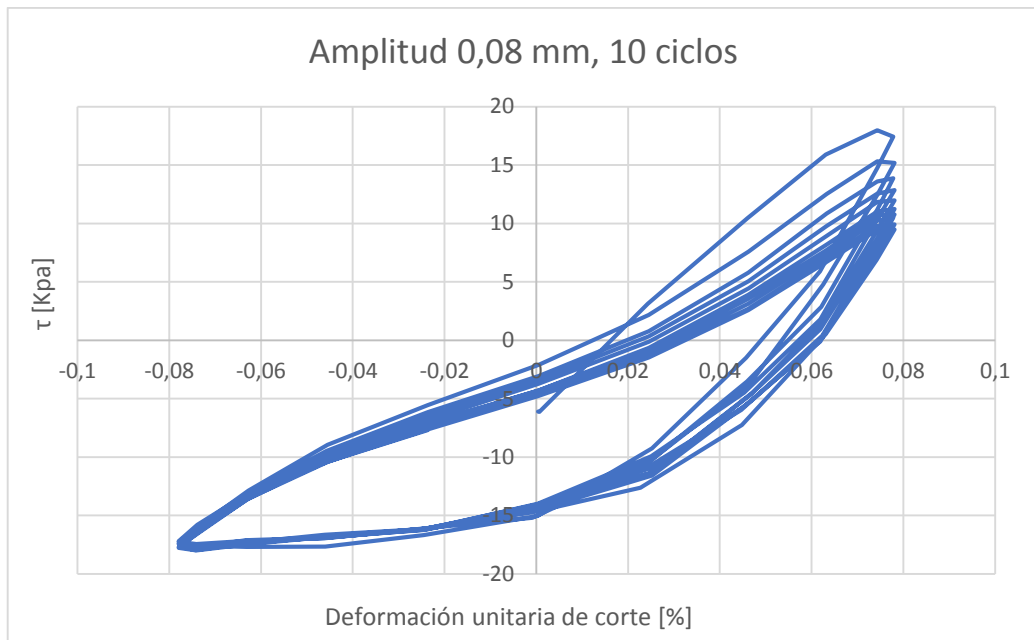
Anexo D. Curva de histéresis Humedad del 18%



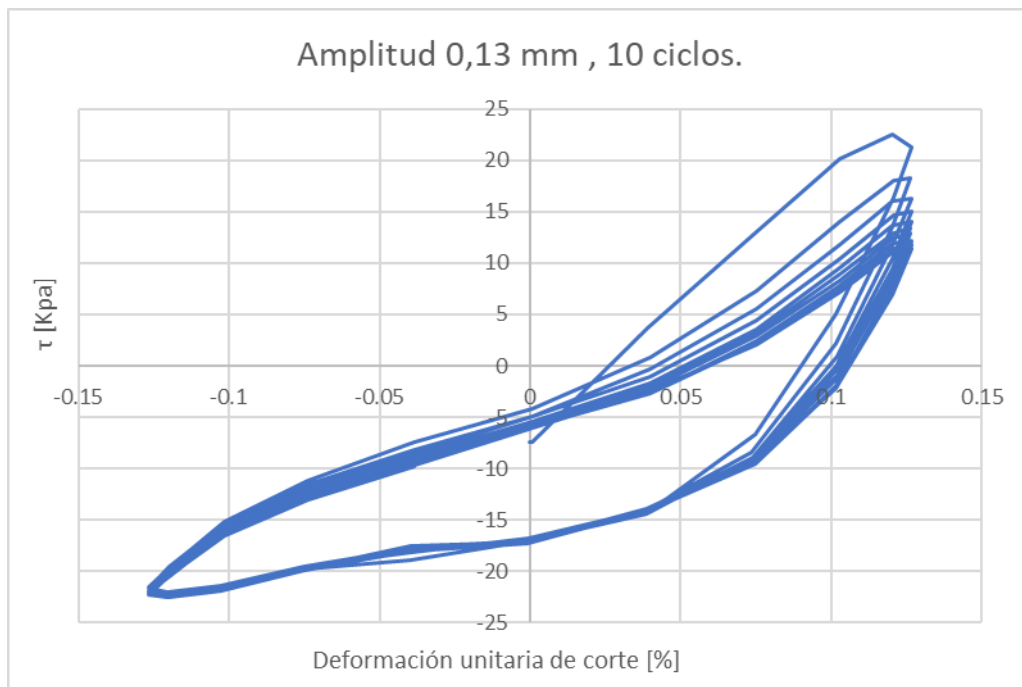
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



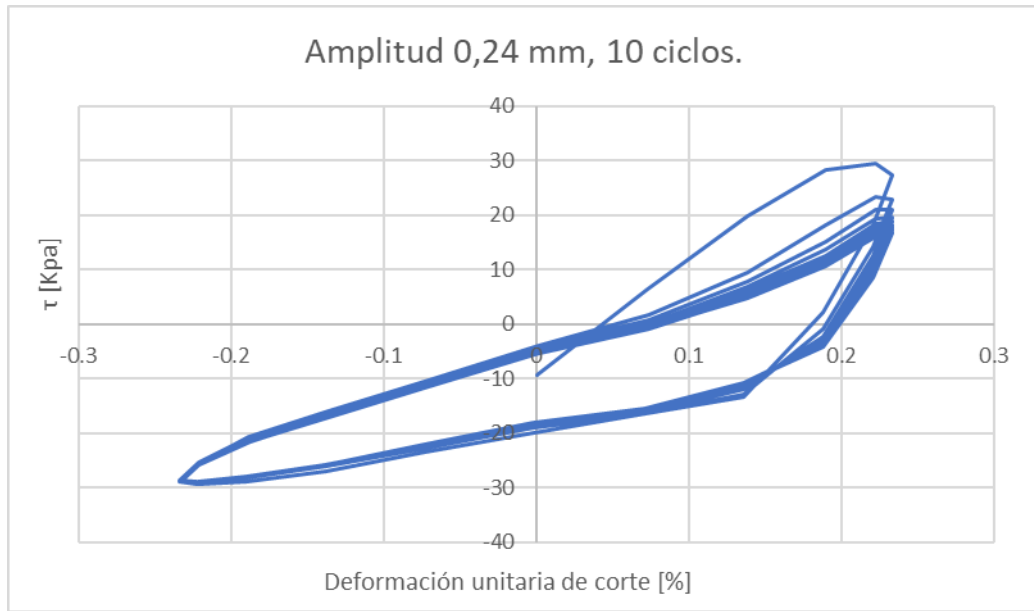
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



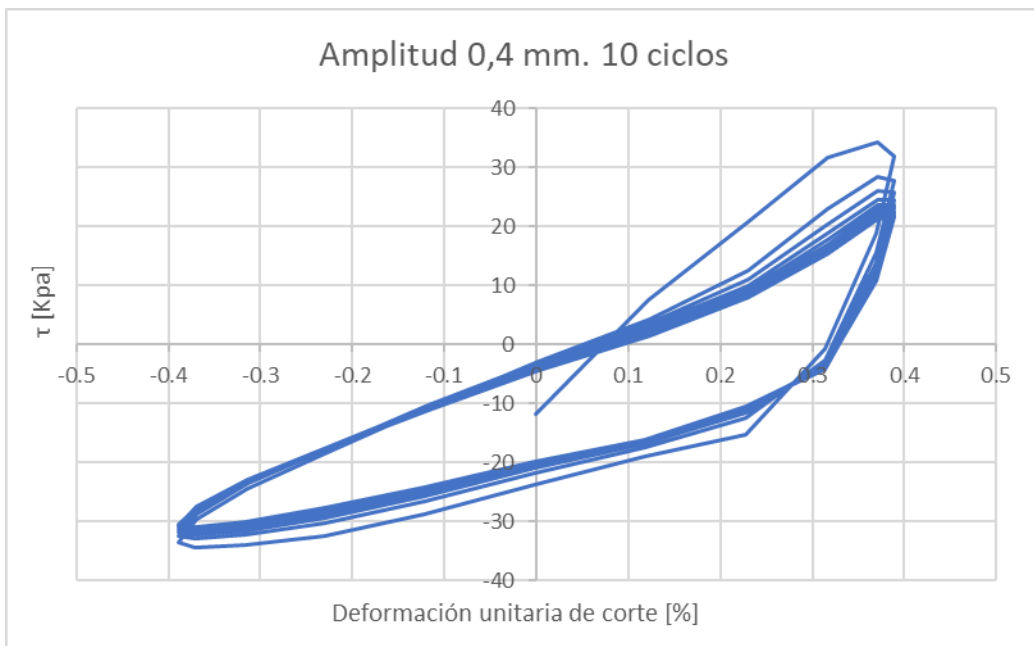
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



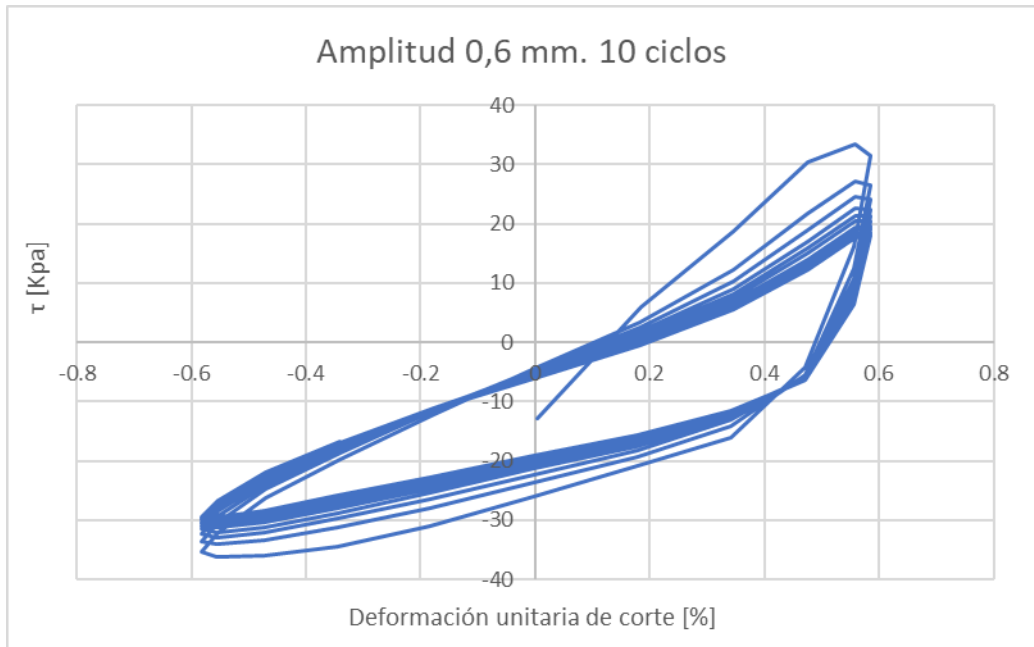
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



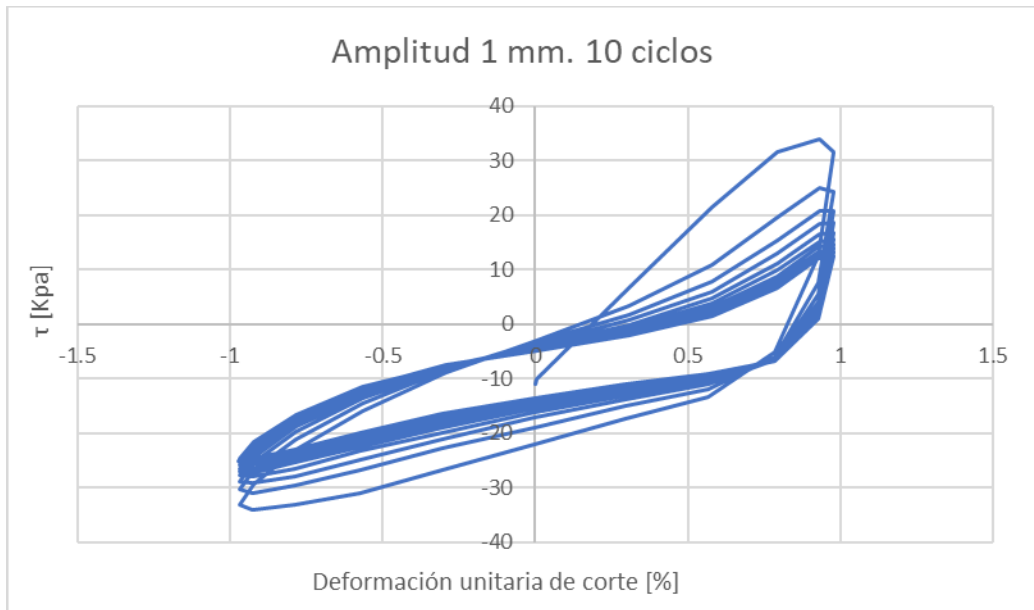
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



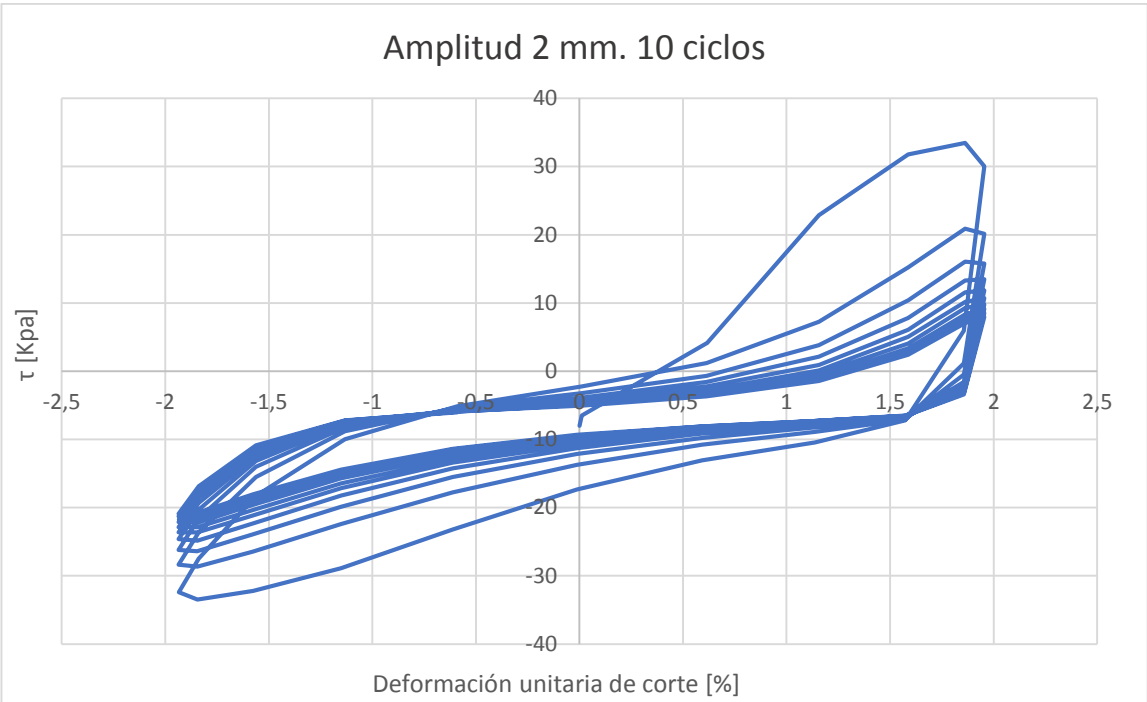
Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]



Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]

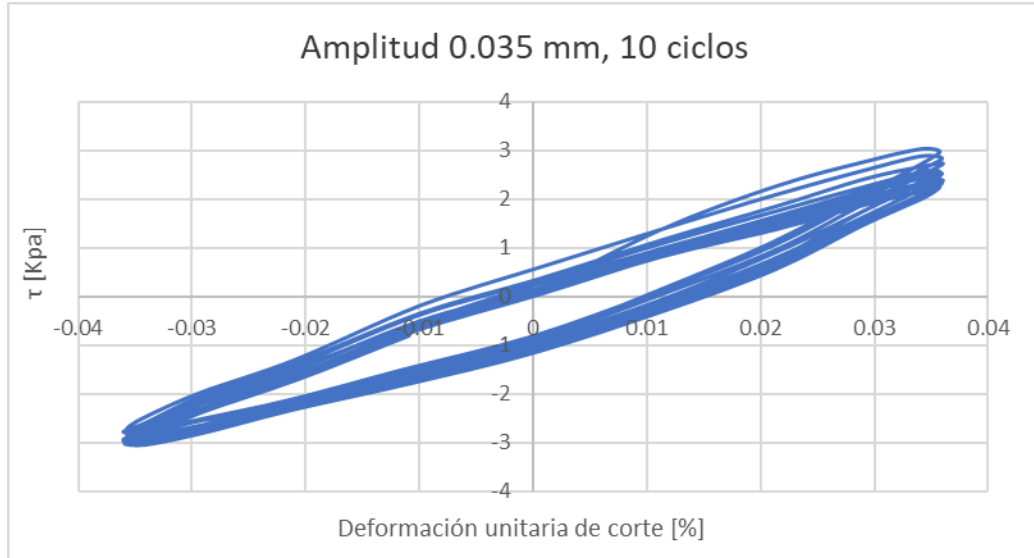


Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]

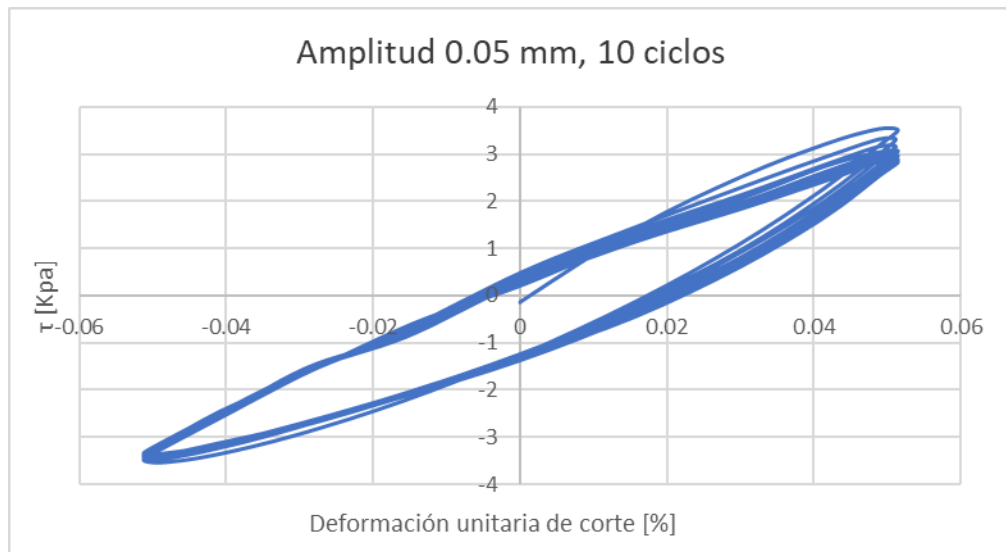


Curva de histéresis para una humedad (W) del 18% y deformación unitaria de corte [%]

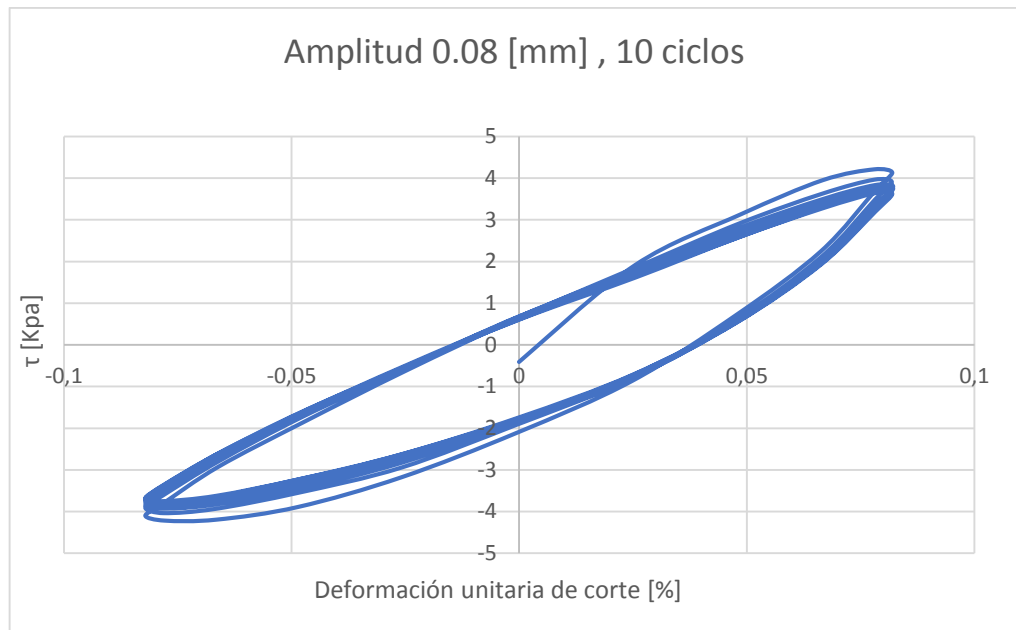
Anexo E Curva de histéresis Humedad del 20%



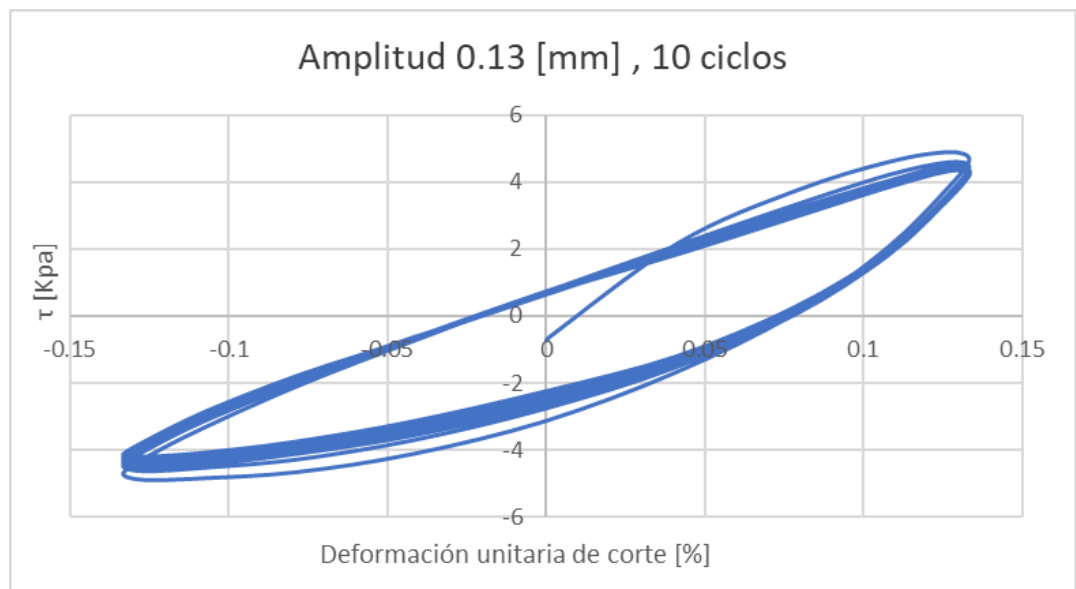
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



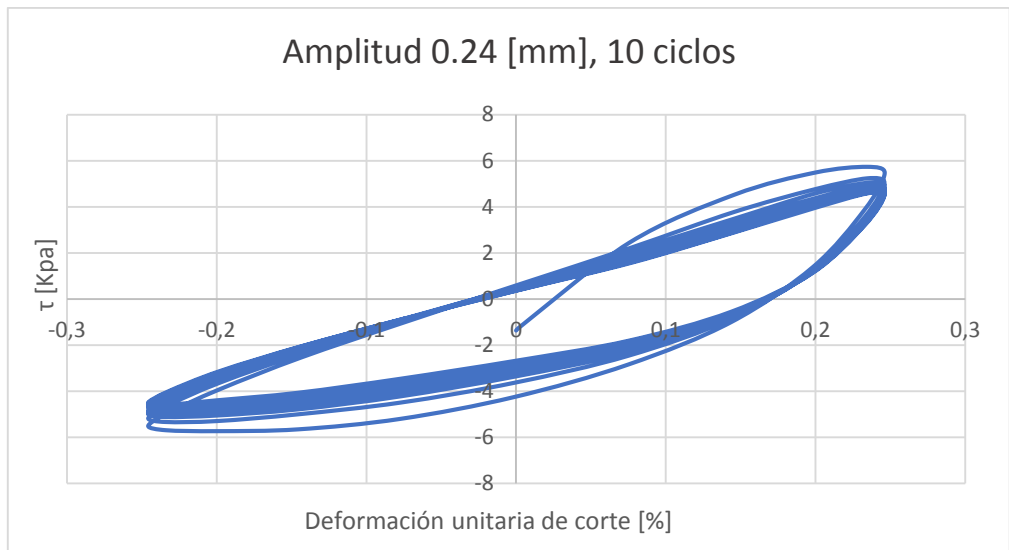
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



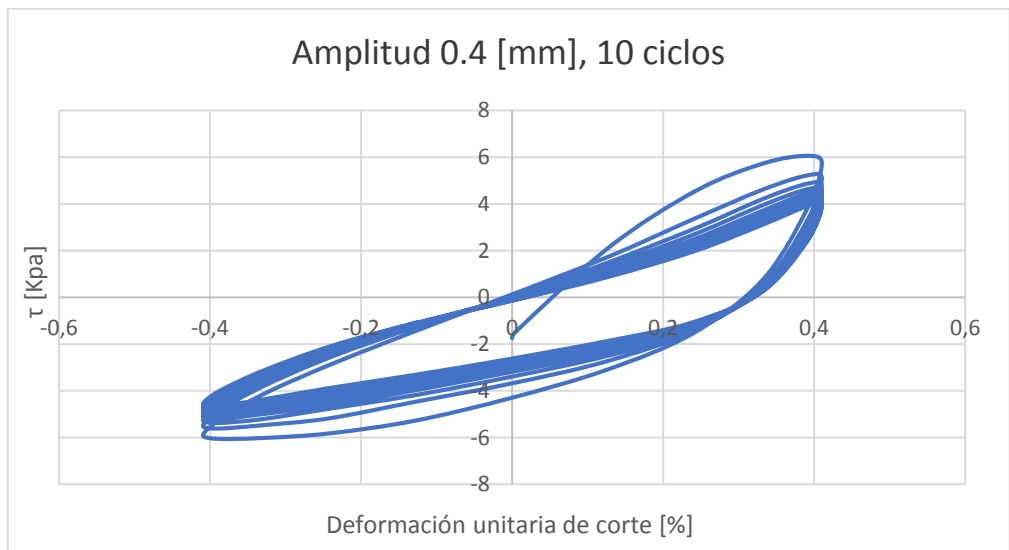
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



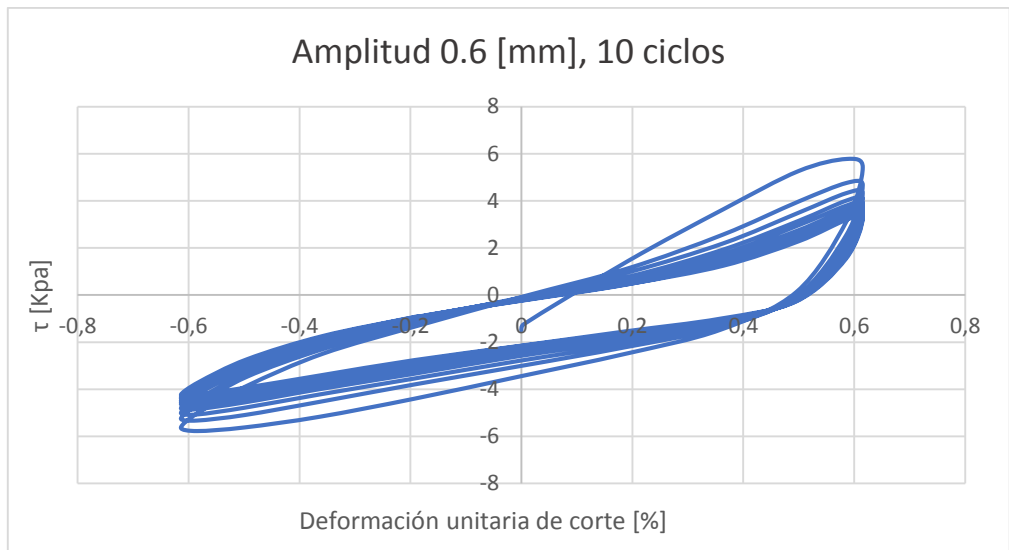
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



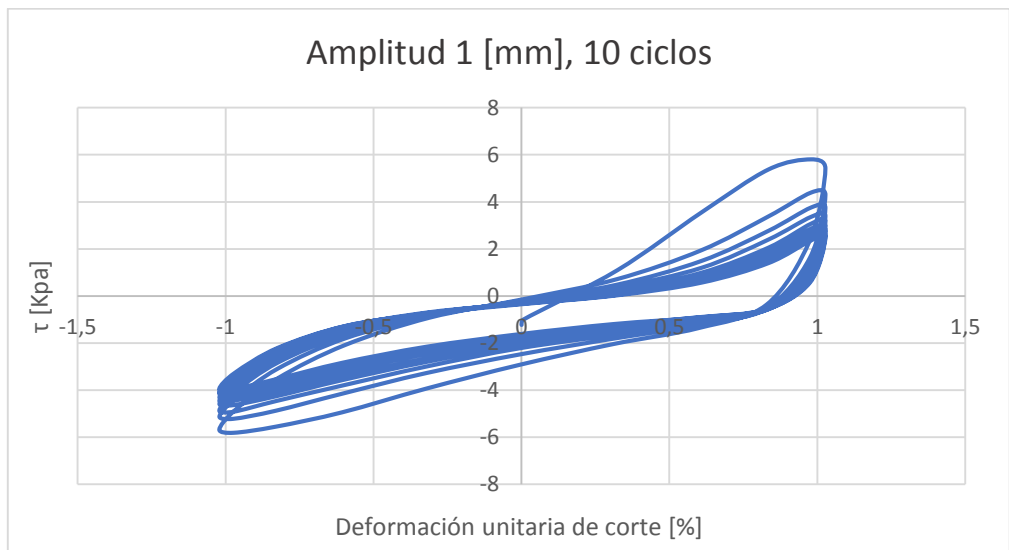
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



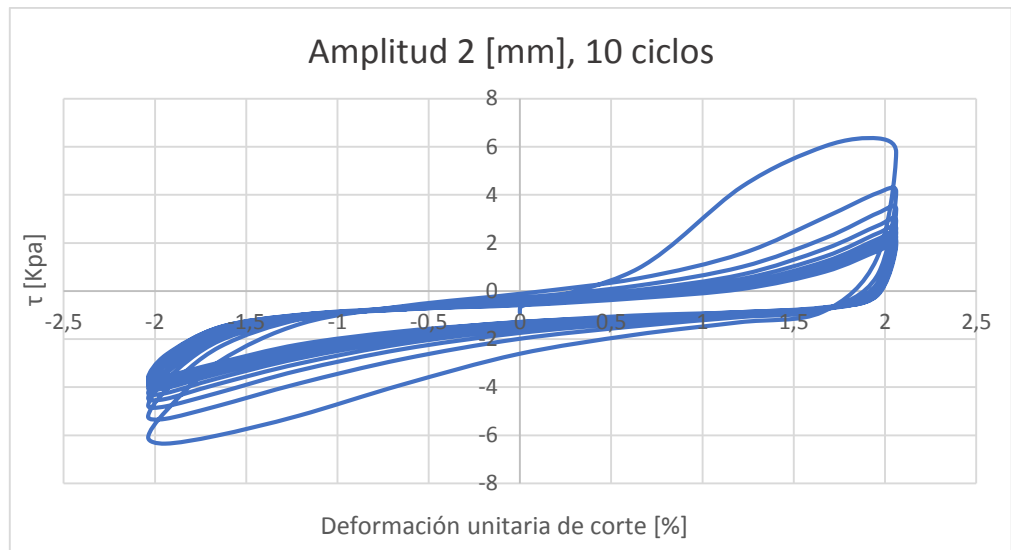
Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]



Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]

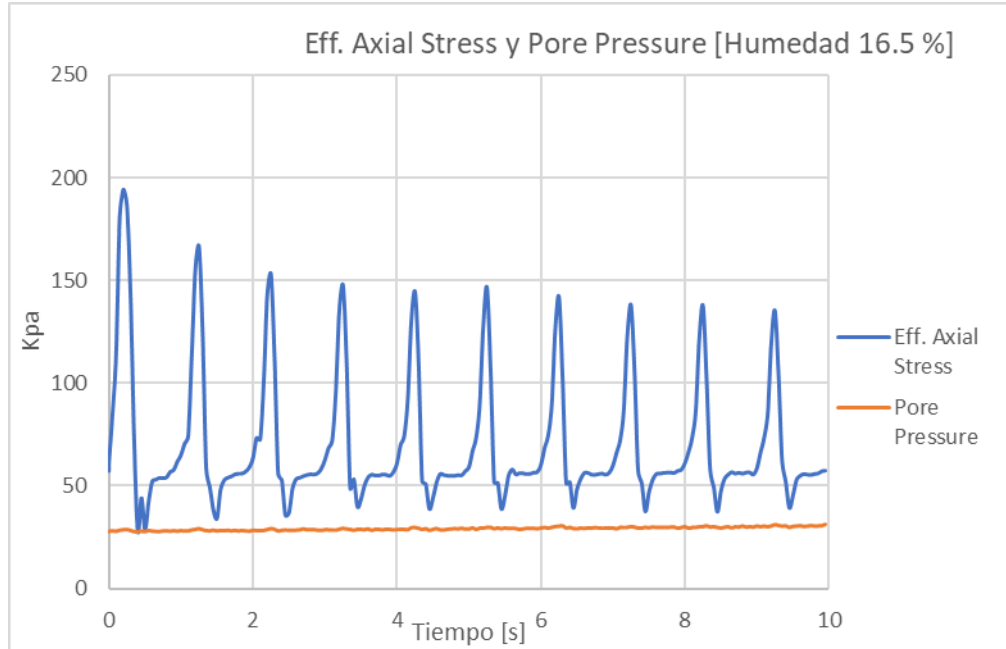


Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]

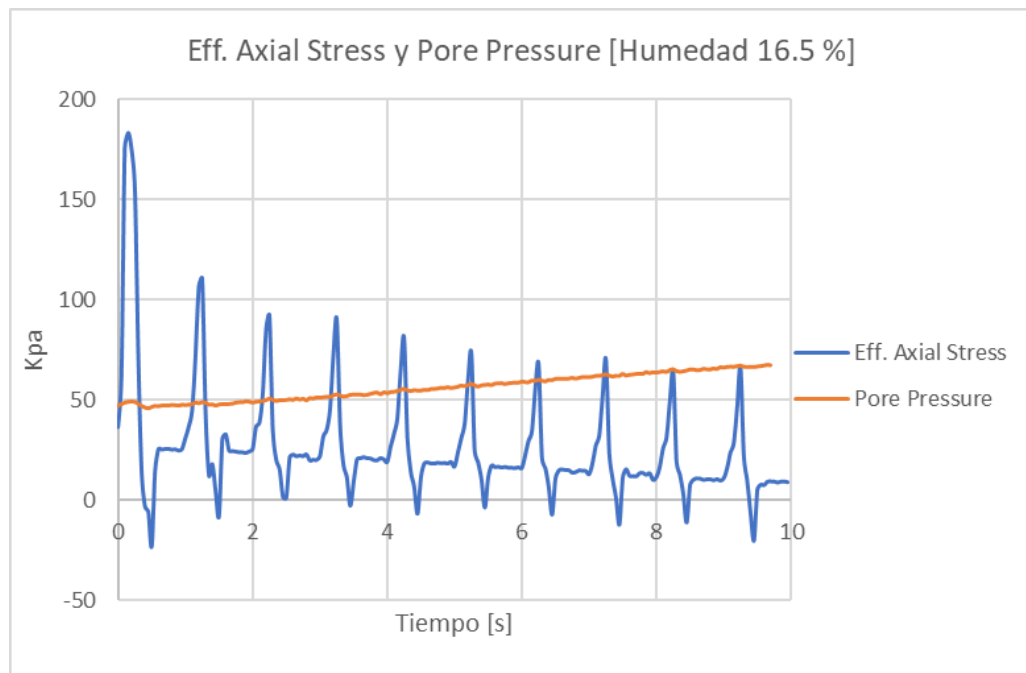


Curva de histéresis para una humedad (W) del 20% y deformación unitaria de corte [%]

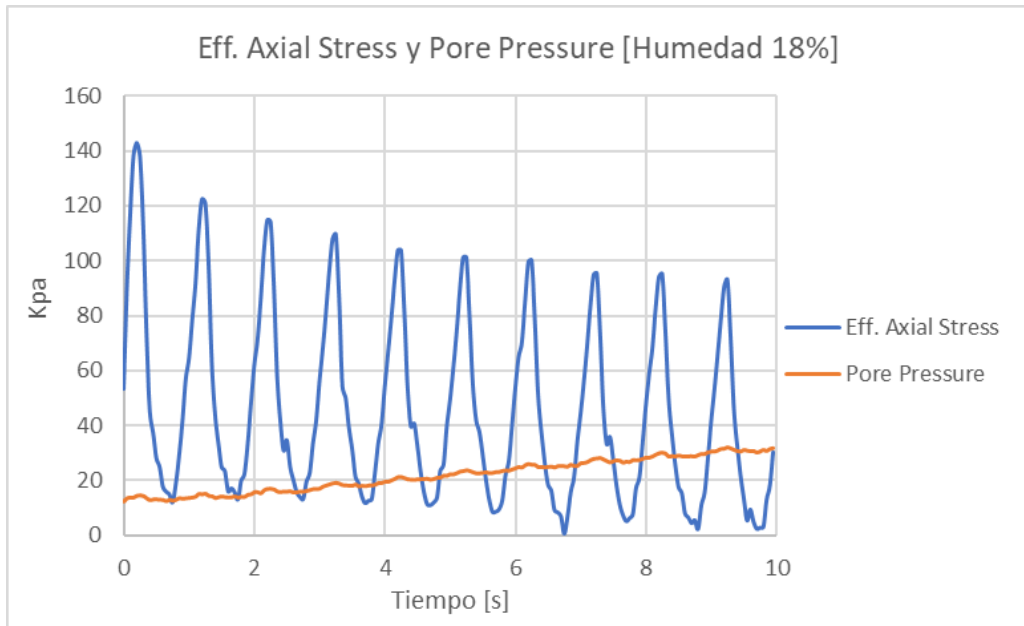
Anexo F. Relacion esfuerzo efectivo y presión de poros



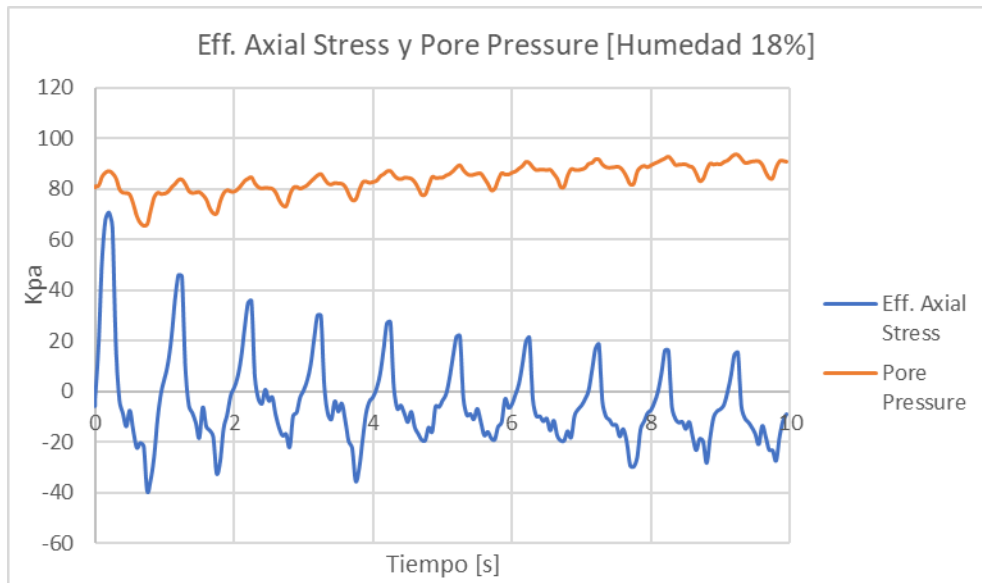
Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con humedad (W) 16.5%



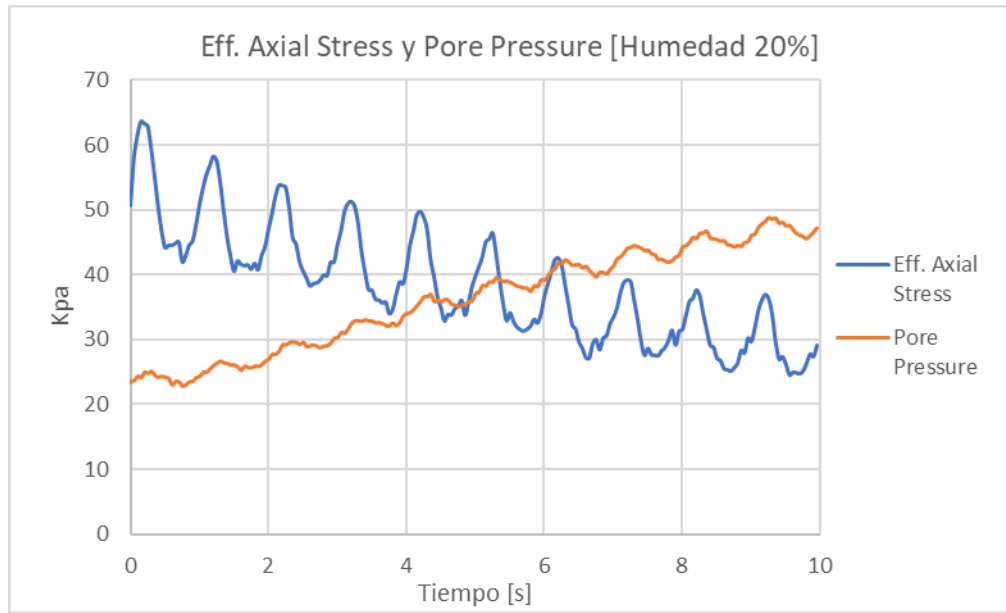
Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con humedad (W) 16.5%



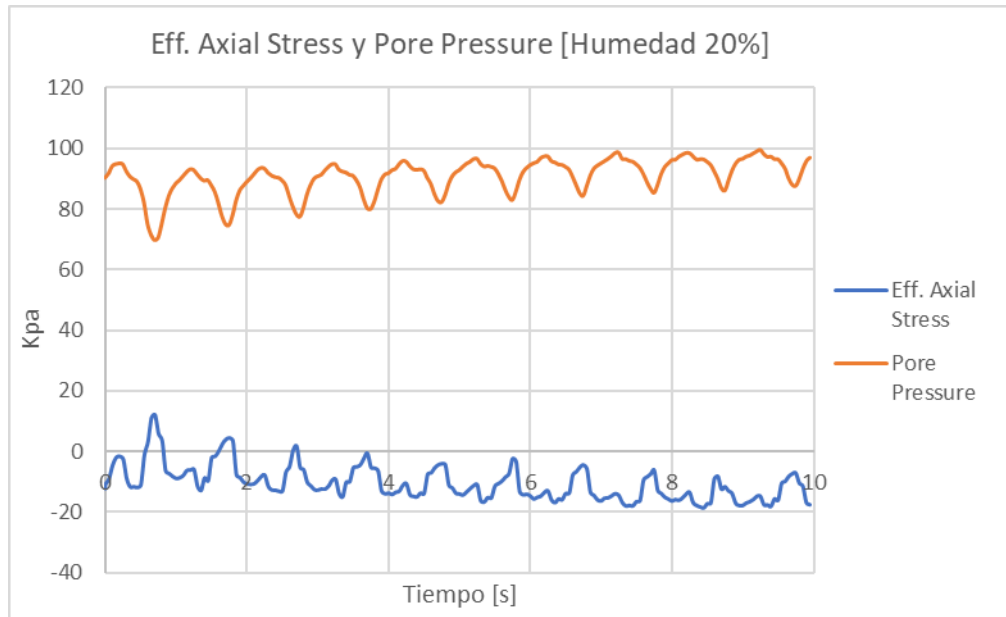
Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con humedad (W) 18%



Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con (W) 18%



Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con humedad (W) 20%



Grafica Eff. Axial Stress y Pore Pressure con humedad (W) 20%

Anexo G. Cálculos

Ver documento adjunto