

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SUELO ARCILLOSO DE BOGOTÁ
SOMETIDO A CARGA Y DESCARGA PARCIAL CÍCLICA

GONZÁLEZ MARTÍNEZ MAURICIO
ORTIZ PÉREZ DANIELA



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA
BOGOTÁ D.C.
2017

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SUELO ARCILLOSO DE BOGOTÁ
SOMETIDO A CARGA Y DESCARGA PARCIAL CÍCLICA

GONZÁLEZ MARTÍNEZ MAURICIO
ORTIZ PÉREZ DANIELA

TRABAJO COMO OPCIÓN DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ASESOR DISCIPLINAR: I.C. EDISON FERNEY GARZÓN MONTAÑO
ASESOR METODOLÓGICO: LIC. LAURA MILENA CALA CRISTANCHO



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA
BOGOTÁ D.C
2017

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 2. | JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 3. | OBJETIVOS..... | 4 |
| 3.1. | OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 3.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 4. | ANTECEDENTES..... | 5 |
| 5. | MARCO DE REFERENCIA..... | 8 |
| 5.1. | MARCO CONCEPTUAL..... | 8 |
| 5.1.1. | Suelo arcilloso | 8 |
| 5.1.2. | Tipos de muestras de suelos..... | 8 |
| 5.1.3. | Plasticidad | 10 |
| 5.1.4. | Límites de Atterberg..... | 10 |
| 5.1.5. | Métodos de calificación de los suelos | 13 |
| 5.1.6. | Propiedades dinámicas del suelo..... | 15 |
| 5.1.7. | Compresión inconfiada en suelos | 16 |
| 5.1.8. | Compresión inconfiada cíclica: carga y descarga | 18 |
| 5.1.9. | Módulo de elasticidad (E) | 18 |
| 5.1.10. | Energía de deformación | 18 |
| 5.2. | MARCO LEGAL..... | 19 |
| 6. | DISEÑO METODOLÓGICO | 20 |
| 6.1. | ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN..... | 20 |
| 6.2. | TIPO DE INVESTIGACIÓN | 20 |
| 6.3. | POBLACIÓN Y MUESTRA | 20 |
| 6.4. | DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES..... | 21 |
| 6.4.1. | Variables..... | 21 |
| 6.5. | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN | 22 |
| 6.5.1. | Observación estructurada | 22 |
| 6.6. | FASES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 22 |
| 6.7. | DISEÑO EXPERIMENTAL ENSAYO DE CARGA Y DESCARGA PARCIAL CÍCLICA | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 26 |
| 7.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES | 26 |
| 7.1.1. Extracción de la muestra | 26 |
| 7.1.2. Clasificación de las propiedades y características de las muestras | 29 |
| 7.2. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD $E_{50\%}$ EN LAS MUESTRAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN INCONFINADA CÍCLICA. | 31 |
| 7.2.1. Comparación del esfuerzo de compresión inconfiada a partir del ensayo compresión inconfiada I.N.V.E 152.13 y compresión inconfiada cíclica. | 31 |
| 7.2.2. Módulos de elasticidad $E_{50\%}$ en las muestras sometidas a compresión inconfiada cíclica..... | 45 |
| 7.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LOS CICLOS DE CARGA. | 52 |
| 7.3.1. Análisis general de la variación de energía en función de los ciclos de carga. | 59 |
| 7.4. ANÁLISIS DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN. | 59 |
| 8. CONCLUSIONES | 61 |
| 9. RECOMENDACIONES | 62 |
| 10. BIBLIOGRAFIA..... | 63 |
| ANEXOS..... | 65 |
| ANEXO A – DATOS ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN | 65 |
| ANEXO B – DATOS GRAFICAS ESFUERZO Vs DEFORMACIÓN | 65 |
| ANEXO C – PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA DE CARGA Y DESCARGA | 65 |
| ANEXO D – REGISTRO FOTOGRAFICO. | 65 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1 Muestra inalterada de suelo | 9 |
| Ilustración 2 Muestra remoldeada de suelo | 9 |
| Ilustración 3 Muestra compactada de suelo..... | 10 |
| Ilustración 4 Estados del suelo | 11 |
| Ilustración 5 Cambio de volumen asociado a la variación de humedad en arcillas | 11 |
| Ilustración 6 Carta de plasticidad de Casagrande..... | 12 |
| Ilustración 7 Clasificación de los suelos Metodo USCS..... | 15 |
| Ilustración 8 Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes | 16 |
| Ilustración 9 fases de la investigación..... | 22 |
| Ilustración 10 Diseño experimental ensayo de carga y descarga parcial cíclica.... | 25 |
| Ilustración 11 Ubicación extracción de muestra..... | 26 |
| Ilustración 12 Herramientas utilizadas para la extracción de la muestra | 27 |
| Ilustración 13 Muestra 1..... | 32 |
| Ilustración 14 Cálculo de la energía..... | 52 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfica 1 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 2. Ensayo de compresión inconfinada..... | 32 |
| Gráfica 2 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 2. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 33 |
| Gráfica 3 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 3. Ensayo de compresión inconfinada | 34 |
| Gráfica 4 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 3. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 35 |
| Gráfica 5 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 4. Ensayo de compresión inconfinada..... | 36 |
| Gráfica 6 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 4. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 38 |
| Gráfica 7 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 5. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 39 |
| Gráfica 8 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 6. Ensayo de compresión inconfinada..... | 40 |
| Gráfica 9 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 6. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 40 |
| Gráfica 10 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 7. Ensayo de compresión inconfinada..... | 41 |
| Gráfica 11 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 7. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 42 |
| Gráfica 12 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 9. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 43 |
| Gráfica 13 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 9. Ensayo de compresión inconfinada cíclico..... | 43 |
| Gráfica 14 Módulos de elasticidad muestra 2. | 46 |
| Gráfica 15 Módulos de elasticidad muestra 3. | 47 |
| Gráfica 16 Módulos de elasticidad muestra 4. | 48 |
| Gráfica 17 Módulos de elasticidad muestra 6. | 49 |
| Gráfica 18 Módulos de elasticidad muestra 7. | 50 |
| Gráfica 19 Módulos de elasticidad muestra 9. | 51 |
| Gráfica 20 Comparación módulos de elasticidad de las muestras..... | 51 |
| Gráfica 21 Curva de energía muestra 2..... | 53 |
| Gráfica 22 Curva de energía muestra 3..... | 54 |
| Gráfica 23 Curva de energía muestra 4..... | 55 |
| Gráfica 24 Curva de energía muestra 6..... | 56 |
| Gráfica 25 Curva de energía muestra 7..... | 57 |

Gráfica 26 Curva de energía muestra 958
Gráfica 27 Comparación de la energía acumulada de las muestras.....59
Gráfica 28 Energía total Vs deformación unitaria.....60

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Rangos y características de las solicitaciones y pruebas dinámicas | 16 |
| Tabla 2 Consistencia de las arcillas..... | 17 |
| Tabla 3 Marco legal | 19 |
| Tabla 4 Tipos de variables | 21 |
| Tabla 5 Formato registro de perforación..... | 28 |
| Tabla 6 Resumen clasificación, características y propiedades de las muestras de suelo. | 29 |
| Tabla 7 Pesos unitarios característicos | 30 |
| Tabla 8 Diferencia porcentual de los esfuerzos de compresión de los ensayos realizados. | 44 |
| Tabla 9 Comportamiento de la deformación unitaria y la resistencia a la compresión inconfiada cíclica respecto a la deformación unitaria y la resistencia a la compresión inconfiada. | 45 |
| Tabla 10 Datos módulos de elasticidad. Muestra 2. | 45 |
| Tabla 11 Datos módulos de elasticidad. Muestra 3 | 46 |
| Tabla 12 Datos módulos de elasticidad. Muestra 4. | 47 |
| Tabla 13 Datos módulos de elasticidad. Muestra 6. | 48 |
| Tabla 14 Datos módulos de elasticidad. Muestra 7. | 49 |
| Tabla 15 Datos módulos de elasticidad. Muestra 9 | 50 |
| Tabla 16 Datos energía Muestra 2..... | 52 |
| Tabla 17 Datos energía Muestra 3..... | 53 |
| Tabla 18 Datos energía Muestra 4..... | 54 |
| Tabla 19 Datos energía Muestra 6..... | 56 |
| Tabla 20 Datos energía Muestra 7..... | 57 |
| Tabla 21 Datos energía Muestra 9..... | 58 |
| Tabla 22 Datos deformación unitaria máxima y energía total | 60 |

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Bogotá está situada en el centro de Colombia, en la cordillera oriental, que se encuentra ubicada en el centro geográfico del territorio nacional a 2600 m sobre el nivel del mar, en el borde oriental de la sabana de Bogotá, que es la altiplanicie más alta de los andes colombianos. La capital del país tiene un área total de 1776 km².¹

En Bogotá el espesor del depósito lacustre aumenta gradualmente desde las zonas próximas a los cerros orientales, en donde tienen pocos metros de profundidad, hasta el sector occidental de la Sabana, con sedimentos de hasta 600 m. En la parte media de la ciudad, cerca al jardín botánico zona donde se realizará el estudio, el espesor varía entre los 180 y los 200 m. Se trata de grandes capas de suelos relativamente blandos y compresibles², lo cual constituye un escenario propicio para condiciones de cimentación o excavaciones complejas en suelos arcillosos.

Actualmente la ingeniería geotécnica emplea criterios y métodos como lo son los programas Phase 2 y Slide para la evaluación de las deformaciones por excavaciones, diseño de cimentaciones sometidas ante cargas cíclicas por medio de equipos industriales y definición de parámetros geomecánicos para cálculo de capacidad portante.

Es por eso que se pretende mediante la ejecución del ensayo de compresión confinada cíclica en muestras de suelo arcilloso, analizar el comportamiento del módulo de elasticidad E y el comportamiento de la energía durante los ciclos de carga.

El ensayo de compresión confinada cíclico no está normalizado en Colombia, solo algunos laboratorios reconocidos en el país lo ejecutan correctamente. Por

¹ SOCIALHIZO. Bogotá: Descripción geográfica. [En línea]. [Citado 03 oct. 17]. Disponible en: <http://www.socialhizo.com/entretenimiento/turismo-al-dia/bogota-descripcion-geografica>

² ÁVILA, Guillermo. Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento. [En línea]. Agencia de noticias UN. Bogotá D.C. 2012 [citado 15 feb., 2017]. Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>

lo anterior, es relativamente novedosa su aplicación, como en el diseño de pavimentos, fundaciones y movimientos de tierras en taludes.

El cual en un futuro se puede implementar como una herramienta para conocer cómo es el comportamiento del suelo mediante una modelación, ya que este está sometido a carga y descarga cíclica frecuentemente y su uso no es extendido debido al desconocimiento sobre el tema en el ámbito ingenieril.

Por lo tanto, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el comportamiento geotécnico de un suelo arcilloso de Bogotá sometido a un ensayo de carga y descarga parcial cíclica?

2. JUSTIFICACIÓN

La idea fundamental del proyecto es hacer un primer acercamiento del ensayo de compresión cíclica inconfiada para evaluar y examinar el comportamiento de suelos cohesivos sometidos a ciclos de carga y descarga parcial. Este ensayo brindará un beneficio a los ingenieros dado que por medio de ensayos en el laboratorio se puede relacionar el comportamiento de los suelos arcillosos durante una actividad de ciclos de carga y descarga, y tiene una importancia en los diseños de cimentaciones sometidas ante cargas parciales (equipos industriales), la modelación y el diseño de pavimentos de vías terciarias, y en la definición de parámetros geotécnicos para el cálculo de expansión por excavaciones (alivio de presiones por excavaciones).

Los suelos al ser sometidos a procesos cíclicos de carga y descarga, presentan una variación en su módulo elástico y de corte, ya que estos tienden a reducirse por la serie de movimientos, a partir de muestras cilíndricas de suelo, se busca obtener los datos relacionados con estos módulos, para así proceder al análisis del comportamiento del suelo de estudio.

Adicionalmente este pretende ser un documento preliminar para una futura estandarización y su inclusión en los estándares de normas nacionales; se proyecta analizar y evaluar las ventajas de emplear los resultados del ensayo de compresión inconfiada cíclica en el diseño de las obras ingenieriles.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar mediante la prensa universal el comportamiento de un suelo arcilloso de Bogotá sometido a carga y descarga parcial cíclica.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el tipo de suelo de las muestras inalteradas, características y propiedades.
- Comparar la magnitud de los módulos de elasticidad $E_{50\%}$ en sus diferentes estados de carga cíclica.
- Analizar la variación de la energía en función de los ciclos de carga cíclica y descarga al 50% de deformación.
- Determinar las relaciones energía contra deformación para cada ciclo de carga.

4. ANTECEDENTES

El trabajo de Rubén Ángel y Galindo-Aires³, sobre la degradación del suelo ante tensión de corte cíclico, estudia el comportamiento del suelo ante cargas cíclicas, y la investigación de González, A.J⁴, Comportamiento de Excavaciones y Métodos de Análisis, sobre el factor de seguridad del suelo con respecto a las estructuras. Estas dos investigaciones demuestran que el comportamiento del suelo frente a cargas cíclicas es impredecible ya que se generan comportamientos anómalos por parte del suelo y las propiedades que lo componen, este tipo de comportamiento se trata de determinar por medio de modelación de ecuaciones matemáticas y experiencia de campo.

Por otro lado, Mamani Chambi⁵ menciona en el ensayo de compresión no confinada, también conocido con el nombre de ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, es muy importante en la mecánica de suelos, ya que permite obtener un valor de carga última del suelo, el cual, está relacionado con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor más preciso, ya que entrega un resultado conservador. Este ensayo puede definirse como un caso particular de ensayo triaxial.

Por su parte Fenglin Liang, Martial Sauceau, Gilles Dusserre, y Patricia Arlabosse⁶, en su escrito tienen como objetivo analizar el comportamiento reológico y de textura del lodo, tales como la elasticidad, viscosidad, plasticidad, el índice de endurecimiento, adhesivo y parámetros cohesivos, bajo diferentes tipos de condiciones de funcionamiento, en tres tipos de muestras, original fresco, frescas premezcladas y viejas.

³ GALINDO, Rubén, ÁNGEL. Aires. Comportamiento del suelo ante cargas cíclicas .Revista digital. Lampsaros.2013. [Citado, 15 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/933>

⁴ GONZÁLEZ G, Álvaro. Comportamiento de excavaciones y métodos de análisis. En: Primer Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras –Escuela Colombiana de Ingeniería.4 – 6 septiembre de 1991. [citado 15 mayo, 2016]. Disponible en: http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/1_encuentro/comportamiento_excavaciones_metodos_analisis.pdf

⁵ CHAMBI, Mamani. Ensayo de compresión confinada .slideshare LinkedIn. 2012 [Citado, 15 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/JorgeVizneyChambiMamani/30512569-informeens-ayodecompresionsimple>

⁶ LIANG, Fenglin y *et al.* A uniaxial cyclic compression method for characterizing the rheological and textural behaviors of mechanically dewatered sewage sludge. *En: Water Research*. 2017. Vol. 133. Pag 171-180. Disponible en: <http://ugc.elogim.com:2054/science/article/pii/S0043135417300830>

Se hace hincapié en la fiabilidad y la sensibilidad de este método, poniendo de relieve los cambios inducidos por el envejecimiento y la mezcla. Esto se lleva a cabo mediante la aplicación de la compresión cíclica uniaxial, de modo que se puede aplicar a los lodos al comportarse como un sólido blando con contenido sólido total entre el límite líquido (evaluada por ensayo de asentamiento y / o ASTM D 4318 para asegurar que la muestra de lodo no puede ser fluida bajo su propio peso por la gravedad) y el límite plástico (ASTMD 4318 para asegurarse de que puede ser considerado como un medio continuo).

Los resultados de los ensayos de compresión cíclica basados en forma experimental revelan que el lodo se comporta como un cuerpo viscoelástico cuando la deformación real es menor que 0.05 y como visco – elastoplástico una vez superior a la tensión de fluencia.

También F.J.C Del Vecchio, J.M.L Reis, H.S. da Costa Mattos⁷, estudian comportamiento plástico y la sensibilidad de la velocidad de deformación de las muestras de mortero con polímero cilíndrico en ensayos de compresión monótona y cíclica, con el objeto de proponer un modelo fenomenológico unidimensional para permitir su uso en problemas de ingeniería con la capacidad de describir un comportamiento no lineal complejo. Las pruebas monotónicas, que se realizaron bajo tres velocidades de deformación demostrando que estas son significativas en el comportamiento elasto-plástico y no en el viscoelástico, además el material presenta un comportamiento plástico dependiente del tiempo, mientras las propiedades elásticas son prácticamente insensibles a la velocidad.

La prueba de carga y descarga controlada por la deformación indica una acumulación progresiva de la deformación, una vez este ensayo es cíclico el material sufre un retardo de fase conduciendo a la disipación de energía mecánica; generando endurecimiento cinemático del material así mismo cuando la parte es irreversible o plástica de la deformación no es despreciable, la vida de la fatiga dependerá fuertemente del tipo de carga y su frecuencia: haciendo difícil cualquier predicción de ingeniería sobre la vida de la fatiga, debido a que es difícil tener un control tan preciso sobre la propiedades de este tipo de

7 DEL VECCHIO, F.J.C, REIS, J.M.L, y DA COSTA MATTOS, H.S. Elasto-viscoplastic behaviour of polyester polymer mortars under monotonic and cyclic compression.2014. *En: Polymer Testing*. Vol. 35. Disponible en: <http://ugc.elogim.com:2054/science/article/pii/S0142941814000440>

compuestos, la mejor opción es evitar usar el compuesto más allá del límite proporcional.

La investigación realizada en la Universidad de Varsovia por Wojciech Sas, Andrzej Głuchowski y Alojzy Szymański⁸ tiene como objetivo principal demostrar que la prueba repetida CBR es usual para dar un parámetro cíclico triaxial confinado de prueba para el diseño de pavimento y sub-base de suelos. Ese parámetro es el módulo resiliente elástico (MR) que es el módulo elástico basado en la capa recuperable bajo carga repetida. Actualmente gran número de pruebas realizadas permiten simular las condiciones del lugar de las carreteras según el tráfico en un laboratorio. Mediante ensayos triaxiales realizados en condiciones de carga cíclica, es posible obtener factores mecanicistas que describen mejor el comportamiento de la sub-base que las pruebas empíricas y ecuaciones. Las pruebas realizadas para la estabilización de suelos pobres, tales como arcilla, puede ser una buena manera de resolver el problema del procedimiento de diseño del pavimento. También las deformaciones cíclicas pueden describir el comportamiento material y puede ser más útil en ingeniería. Los ensayos demostraron que la "CBR estático" prueba empírica, se usó para la obtención de los parámetros del material su aplicación en el campo puede ser cuestionable. Adicionalmente, la prueba cíclica CBR puede ser una herramienta útil para obtener parámetros buscados y puede ser realizado por personal de laboratorio sin mucha experiencia de formación.

Por otro lado Woojin Lee, et al⁹ llevaron a cabo un estudio en el que desarrollaron una serie de pruebas de módulo de resiliencia para suelos típicos de Indiana en Estados Unidos. Se utilizaron cinco suelos cohesivos y un suelo granular. El programa experimental de laboratorio consistió de pruebas de compresión no confinada, pruebas triaxiales repetidas de módulo de resiliencia, etc. En la prueba de compresión no confinada, la muestra se deformó 1.5 mm -a una velocidad de deformación de 1% de deformación por minuto- después se llevó a cabo la prueba de módulo de resiliencia siguiendo el procedimiento AASHTO T274-82. Con los datos obtenidos, se determinaron una serie de correlaciones entre el módulo de resiliencia y pruebas de compresión no confinada para todos los suelos estudiados

⁸ SAS, Wojciechx, GŁUCHOWSKI Andrzej y SZYMAŃSKI , Alojzy. Determination of the resilient modulus MR for de lime stabilized clay obtained from the repeated loading CBR test. 2012. Annal of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land reclamation N° 44. Pag 143-153

⁹ Lee, Woojin, Bohra N.C., Altschaeffl, A.G. and White, T.D., (1995). "Resilient Modulus of Cohesive Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 2., pp. 131-135.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. MARCO CONCEPTUAL

5.1.1. Suelo arcilloso

Las muestras de suelos utilizadas para los ensayos presentados más adelante en este trabajo corresponden a un suelo arcilloso que tiene como características:

El suelo arcilloso es aquel en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste en un material muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras, y se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados.¹⁰ Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar. En ellos se pueden producir grandes asentamientos en un largo plazo de tiempo, y es en los que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas ha progresado más en los últimos años.¹¹

5.1.2. Tipos de muestras de suelos

Una muestra de suelo es una parte representativa del total del suelo, que son tomadas con el propósito de estudios y análisis de sus características y propiedades, entre ellas se encuentran:

5.1.2.1. Muestras inalteradas. Son aquellas en las que se conserva la estructura y la humedad que tiene el suelo en el lugar en donde se obtenga la muestra (*ver ilustración 1*). Las muestras inalteradas se obtendrán de suelos finos que puedan labrarse sin que se disgreguen. La obtención puede efectuarse en el piso o en una de las paredes de una excavación, en la superficie del terreno natural o en la de una terracería.¹²

¹⁰ ANGELONE, Silvia. Tipos de suelos: arcillas. [En línea]. [Citado 03 oct. 17]. Disponible en: http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Tipos%20de%20suelos_2007.pdf

¹¹ JARDIN PLANTAS. El suelo arcilloso. [En línea]. [Citado 16 feb. 17]. Disponible en: <http://jardinplantas.com/el-suelo-arcilloso/#ixzz4YrdxYH64>

¹² MECÁNICA DE SUELOS FESAR. Exploración y muestreo. [En línea]. [Citado 16 feb. 17]. Disponible en: <http://mecanicadesuelosfesar.blogspot.com.co/2012/06/practica-1-exploracion-y-muestreo.html>

Ilustración 1 Muestra inalterada de suelo



Fuente: goo.gl/obZGYa

5.1.2.2. Muestras remoldeadas. “Las muestras remoldeadas (ver *Ilustración 2*) pueden ser preparadas a partir de una muestra inalterada o a partir de una muestra alterada, siempre y cuando sea representativa de la muestra inalterada fallada”.¹³

Ilustración 2 Muestra remoldeada de suelo



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23939>

5.1.2.3. Muestras compactadas. Las muestras son preparadas con un contenido de agua predeterminada y con la densidad prescrita para el ensayo, estas muestras son compactadas en moldes. (ver *Ilustración 3*).

¹³ Ibid,.

Ilustración 3 Muestra compactada de suelo



Fuente: <http://ingenieriacivilfacil.blogspot.com.co/>

5.1.3. Plasticidad

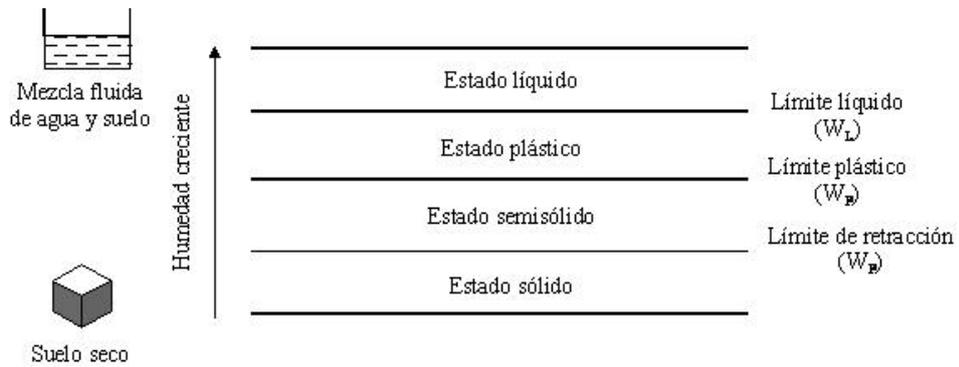
Es la propiedad que presentan algunos suelos de modificar su consistencia en función de la humedad. Existe una correspondencia entre la plasticidad de un suelo y su cohesión. La plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos finos (arcillas y limos), siendo producto de las relaciones electroquímicas que se establecen entre las superficies de los elementos que forman el agregado que compone el suelo (partículas elementales de limo o arcilla). Los suelos granulares, formados exclusivamente por elementos de granulometría gruesa (arena, gravilla, grava o cantos) no presentan plasticidad.¹⁴

5.1.4. Límites de Atterberg

Albert Mauritz Atterberg definió para el uso en agronomía cuatro estados en los que puede encontrarse un suelo plástico en función de su consistencia, que varía según la humedad: sólido, semisólido, plástico y líquido. Un suelo plástico seco se encuentra en estado sólido; al incrementar su humedad varía de forma gradual su consistencia hasta llegar al estado líquido. Los umbrales de humedad que separan cada uno de los estados son denominados límites de Atterberg.

¹⁴ ESTUDIOS GEOTECNICOS. Descriptores geotécnicos (5): plasticidad límites de Atterberg y consistencia. [En línea]. [Citado 7 Oct. 17]. Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

Ilustración 4 Estados del suelo



Fuente: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

La aplicación ingenieril de los conceptos de Atterberg se debe a Arthur Casagrande, quien normalizó una metodología de laboratorio para determinar la humedad a la cual un suelo se encuentra en la frontera entre dos estados de consistencia.

Conceptualmente el límite líquido (w_L) corresponde a la humedad por encima de la cual la resistencia al corte de un suelo es nula (propia de un líquido).

El límite plástico (w_P) corresponde al umbral de humedad de un suelo por encima del cual el material muestra una deformación de tipo plástica en relación a las tensiones aplicadas.

Ilustración 5 Cambio de volumen asociado a la variación de humedad en arcillas



Fuente: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

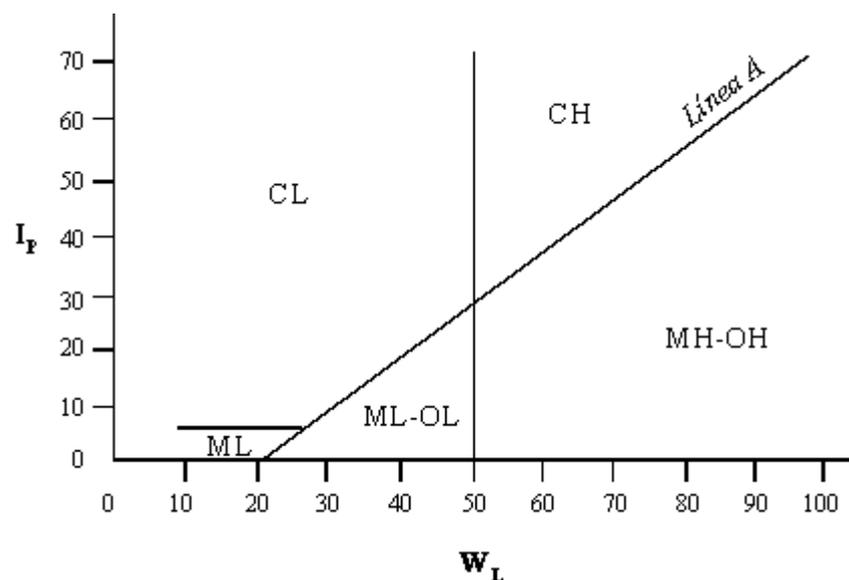
Cuanto mayor sea el rango de humedad entre los diferentes límites de plasticidad, mayor cantidad de agua podrá asumir un suelo sin variar su estado de consistencia, entendiéndose por este comportamiento el concepto cualitativo de “plasticidad”; la diferencia entre el valor de humedad correspondiente al límite líquido y al límite plástico se define como “índice de plasticidad” (I_p), siendo pues “más plástico” pues un suelo cuanto mayor sea este índice.

$$I_p = w_L - w_P \quad \text{Ec. 1}$$

La clasificación de los suelos finos según su plasticidad tiene en consideración los valores del límite líquido y del índice de plasticidad. El valor del límite líquido $w_L = 50$ se considera como umbral que distingue los suelos de alta y media plasticidad, y el de $w_L = 30$ distingue entre suelos de plasticidad media y baja; una clasificación más habitual y simplificada considera los suelos de plasticidad media y baja en un único grupo de suelos de baja plasticidad.

Representando la pareja de valores (w_L , I_p) por un punto en un gráfico de coordenadas, situando en abscisas w_L y en ordenadas I_p , es posible clasificar el suelo en uno de los grupos definidos por A. Casagrande.

Ilustración 6 Carta de plasticidad de Casagrande



Fuente: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

En el gráfico hay dos líneas rectas principales que separan cuatro regiones. Una línea es vertical y corresponde a $wL = 50$ (delimita los suelos de plasticidad alta o baja). La otra es una diagonal, la llamada línea "A", que delimita las arcillas (por encima de la línea) y los limos (por debajo de la misma) y tiene por ecuación:

$$I_p = 0,73 \cdot (wL - 20) \quad \text{Ec.2}$$

Las clases de suelos definidas en función del gráfico de Casagrande son:

Arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL).

Arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH).

Limo inorgánico de baja plasticidad (ML).

Suelo con materia orgánica coloidal y baja plasticidad (OL).

Limo orgánico de alta plasticidad (MH).

Suelo con materia orgánica coloidal y alta plasticidad (OH).¹⁵

5.1.5. Métodos de calificación de los suelos

Los suelos se clasifican en diferentes grupos con características ingenieriles similares, estos grupos se diferencian con nombres descriptores o símbolos, para así dar a conocer sus propiedades. Para ello existen algunos métodos, uno de ellos es:

5.1.5.1. Clasificación Método unificado de los suelos.

Establecida por Arthur Casagrande, quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el cuerpo de ingeniero del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

¹⁵ Ibid,.

En primera instancia este sistema divide los suelos en dos grandes grupos: de grano grueso y de grano fino. Pertenecen al primero aquellos suelos que cuentan con más del 50 % en peso de partículas de tamaño mayor a 0,080mm. Se representan por el símbolo "G" (de gravas) si más de la mitad de las partículas gruesas son retenidas en tamiz 5 mm, y por el símbolo "S" (de arenas) si más de la mitad de las mismas pasa por tamiz 5mm.

A la "G" o a la "S" se les agrega una segunda letra que describe la graduación y la presencia de finos (partículas de tamaño inferior a 0.080 mm):

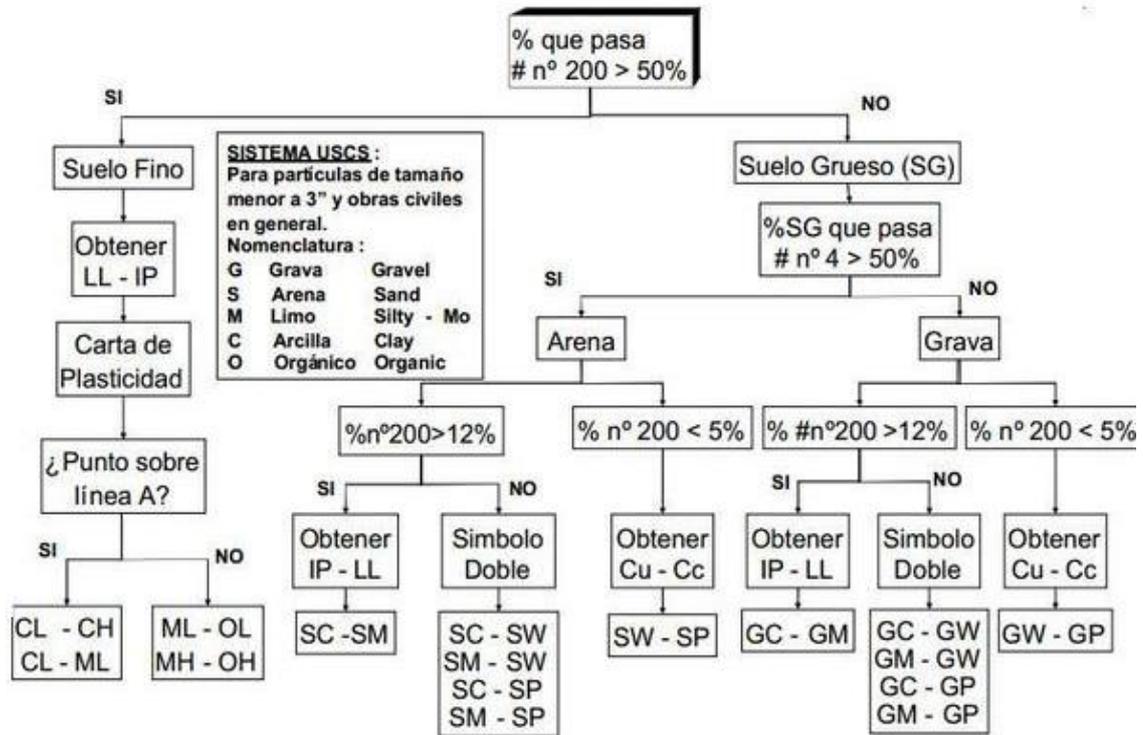
- "W" para suelos con buena graduación, con poco o ningún fino.
- "P" para suelos de graduación pobre, uniforme o discontinua y con poco o ningún fino
- "M" para suelos que contienen limo o limo y arena
- "C" para suelos que contienen arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos (aquellos que cuentan con una proporción superior al 50 % de partículas de tamaño inferior a 0.080 mm), se clasifican según la propuesta de Casagrande (véase el capítulo dedicado a la plasticidad), dividiéndose en tres grupos: las arcillas ("C"), los limos ("M") y los limos o arcillas orgánicos ("O").

Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que depende del valor del límite líquido: "L" si el límite líquido es menor a 50, y "H" si es mayor o igual a 50.¹⁶

¹⁶ ESTUDIOS GEOTECNICOS. Descriptores geotécnicos (6): clasificación del suelo. [En línea]. [Citado 7 Oct. 17]. Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-6-clasificacion-de-suelos/>

Ilustración 7 Clasificación de los suelos Metodo USCS



Fuente: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf

5.1.6. Propiedades dinámicas del suelo

Las propiedades dinámicas son las que rigen el comportamiento de los suelos, estas son el módulo de corte, el amortiguamiento, la relación de Poisson, el módulo de elasticidad. Para la obtención de estos parámetros, se cuenta con varios métodos de campo y laboratorio.

Es indispensable el conocimiento del nivel de deformación del suelo señalado en la *Ilustración 8*, para la implementación de un modelo constitutivo adecuado y un mejor estudio de los parámetros dinámicos, gracias a que el comportamiento del suelo varía en función del rango de deformación de corte.

Ilustración 8 Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes

| Shear strain | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻³ | 10 ⁻² | 10 ⁻¹ |
|-----------------------------|----------------------|------------------|--------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|
| | Small strain | Medium strain | | Large strain | Failure | |
| Elastic | | | | | | |
| Elasto-plastic | | | | | | |
| Failure | | | | | | |
| Effect of load repetition | | | | | | |
| Effect of load rate | | | | | | |
| Model | Linear elastic model | | Viscoelastic model | | Load history tracing type model | |
| Method of response analysis | Linear method | | Equivalent linear method | | Setp-by-step integration method | |

Fuente: RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes.

A continuación, en la *Tabla 1*, se presenta la relación entre el procedimiento general de obtención de propiedades dinámicas y su respectivo rango de deformaciones.

Tabla 1 Rangos y características de las solicitaciones y pruebas dinámicas

| Ensayo | Intervalo de frecuencia (Hz) | Intervalo de deformación angular (%) | Intervalo de velocidad de deformación angular (1/seg) |
|--|------------------------------|--|---|
| Triaxial cíclico | 0.2 – 5 | 10 ⁻² – 5 | 0.8 x 10 ⁻⁴ – 1 |
| Corte simple cíclico | 0.2 – 5 | 10 ⁻² – 5 | 0.8 x 10 ⁻⁴ – 1 |
| Torsión cíclica | 0.2 – 5 | 10 ⁻² – 5 | 0.8 x 10 ⁻⁴ – 1 |
| Columna resonante | 50 – 200 | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻² | 2 x 10 ⁻⁴ – 8 x 10 ⁻² |
| Refracción sísmica | 20 – 100 | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻³ | 0.8 x 10 ⁻⁴ – 0.4 x 10 ⁻² |
| Cross hole, Down hole | 20 – 100 | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻³ | 0.8 x 10 ⁻⁴ – 0.4 x 10 ⁻² |
| Vibración forzada en bloques | < 50 | 10 ⁻³ – 10 ⁻¹ | < 2 x 10 ⁻³ – < 2 x 10 ⁻¹ |
| Placa cíclico | < 0.1 | 10 ⁻² – 5 | < 0.4 x 10 ⁻⁴ – < 2 x 10 ⁻² |
| Vibración forzada en placa atornillada | < 50 | 10 ⁻³ – 10 ⁻¹ | < 2 x 10 ⁻³ – < 2 x 10 ⁻¹ |
| Maquinas | 3 – 50 | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻³ | 1.2 x 10 ⁻³ – < 2 x 10 ⁻³ |
| Sismos con foco transcurivo | 3 – 5 | Depende del suelo, solicitaciones de interacción suelo –estructura, degradación por licuación etc. | |
| Sismos con foco subductivo | 10 – 15 | | |
| Olas | < 0.2 | | |

Fuente: DÍAZ, J. Rangos y características de los ensayos dinámicos.2006.

5.1.7. Compresión inconfiada en suelos

Este ensayo es utilizado para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas, compactadas o remodeladas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de

resistencia controlada o deformación controlada. Este ensayo se emplea únicamente para suelos cohesivos, ya que en un suelo carente de cohesión no puede formarse una probeta sin confinamiento lateral. Da un valor aproximado a la resistencia del suelo en término de esfuerzos totales.¹⁷

5.1.7.1. Resistencia a la compresión inconfiada (qu). Es el mínimo esfuerzo compresivo al cual falla una muestra no confinada de suelo, de forma cilíndrica, en condiciones normalizadas. La resistencia a la compresión inconfiada se toma como la máxima carga por unidad de área alcanzada durante el ensayo, o la carga por unidad de área cuando se alcanza el 15% de deformación axial, lo que ocurra primero, durante la ejecución del ensayo.¹⁸ En la *Tabla 2* se presentan algunos valores de resistencias y de acuerdo a estos el grado de consistencia del suelo.

Tabla 2 Consistencia de las arcillas

| CONSISTENCIA DE ARCILLA | Qu (Kg/cm ²) |
|-------------------------|--------------------------|
| DURA | >4,0 |
| MUY FIRME | 2,0 - 4,0 |
| FIRME | 1,0 - 2,0 |
| MEDIO | 0,5 - 1,0 |
| BLANDA | 0,25 - 0,5 |
| MUY BLANDA | <0,25 |

Fuente: <http://albatros.uis.edu.co/eisi/ArchivosProfesores/U9186/COMPRESION.pdf>

5.1.7.2. Resistencia al corte (Su). Para los especímenes sometidos al ensayo de resistencia a la compresión inconfiada, la resistencia al corte se define como:

$$Su = 0.5 \times qu \quad \text{Ec. 3}$$

¹⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Compresión inconfiada en muestras de suelos. Bogotá, (I.N.V. E- 152-13). 2013. [citado 03- Oct. de 2017].

¹⁸ Ibid,.

5.1.8. Compresión inconfiada cíclica: carga y descarga

Es un ensayo relativamente nuevo no se tiene aún una norma que estandarice su aplicación, las muestras falladas se basaron en las especificaciones de la norma I.N.V. E 152 – 13 Compresión inconfiada en muestras de suelos, en este trabajo el ensayo fue controlado mediante la carga, mediante ciclos que se cargaban y descargaban a 0 o que se cargaban y se descargaba al 50% de esta.

5.1.9. Módulo de elasticidad (E)

Módulo de elasticidad E es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria, debida a dicho esfuerzo y existe cuando el suelo se comporta elásticamente.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Ec. 4}$$

5.1.10. Energía de deformación

La energía de deformación es el aumento de energía interna acumulada en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación. La energía de deformación es igual al trabajo realizado por una carga la cual se incrementa lentamente aplicada al elemento. Se define como la energía de deformación por unidad de volumen y es igual al área bajo la curva esfuerzo-deformación.¹⁹

¹⁹ UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. Teoría de la energía de la deformación. [En línea]. [citado 03- Oct. de 2017]. Disponible en: <http://www.josemec.mex.tl/images/5147/ENERGIA%20DE%20DEFORMACION.pdf>

5.2. MARCO LEGAL

A continuación, en la *Tabla 3*, se enuncia la normativa mediante la cual se realizaron los ensayos de laboratorio para la caracterización física, mecánica y dinámica del suelo a estudiar.

Tabla 3 Marco legal

| NORMA | DESCRIPCIÓN | APLICACIÓN |
|---------------|--|--|
| INV. E 102-13 | Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual) | Descripción manual del suelo |
| INV. E 122-13 | Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas suelo-agregado. | Determinación del contenido de humedad |
| INV. E 125-13 | Determinación del límite líquido de los suelos. | Límites de Atterberg |
| INV. E 126-13 | Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. | Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos |
| INV. E 152-13 | Compresión inconfiada en muestras de suelos. | Determina la resistencia a la compresión no confinada de los suelos cohesivos. |

Fuente: Propia

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que las recolecciones de datos utilizados para los ensayos de laboratorios y los cálculos ayuden al análisis y la comparación de los resultados y así poder explicar y predecir los fenómenos que se quieren investigar, buscando regularidades y relaciones para la solución de la pregunta de investigación que se planteó.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es exploratoria ya que se basa en la aplicación de técnicas controladas sobre un objeto de estudio para explicar su funcionamiento y predecir su comportamiento. Ya que este método que recoge e identifica antecedentes generales examinando temas o problemas poco estudiados o que no han sido abordados antes.

6.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La muestra que se utilizó en esta investigación será de tipo muestreo subjetivo por decisión razonada, ya que esta se elige en función de características de manera racional y no casual debido a que la muestra se obtuvo de Bogotá específicamente de la calle 63 c # 70c - 96 zona de estudio.

6.4. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

6.4.1. Variables

Tabla 4 Tipos de variables

| TIPOS DE VARIABLES | VARIABLE | DESCRIPCIÓN |
|--------------------|---|---|
| Independientes | Carga de aplicación en el ensayo de compresión (Kg) | Capacidad de carga no es un valor único e invariable de ese suelo, sino que dependerá también de cómo se va a transmitir dicha carga. |
| | Límite líquido (%) | Es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo del secado al horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. |
| | Límite plástico (%) | Contenido más bajo de agua, en el cual el suelo permanece en estado plástico. |
| | Índice de plasticidad (%) | Se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. |
| Dependientes | Energía de deformación (Kg/m ²) | Se define como la energía de deformación por unidad de volumen y es igual al área bajo la curva esfuerzo-deformación |
| | Esfuerzo último (Kg/m ²) | Es el mayor esfuerzo basado en el área original que puede desarrollar un material así que es la máxima ordenada de un diagrama. Esfuerzo/Deformación. |
| | Modulo elástico (Kg/m ²) | Es la relación esfuerzo deformación unitaria. |
| Intervinientes | Humedad natural (%) | Relación existente entre el peso del agua y el peso de los sólidos en un volumen dado de suelo. |
| | Relación de volúmenes de vacíos en los sólidos | Volumen de suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea la relación de vacío más suelto es el suelo. |
| | Peso específico (gr/cm ³) | Vínculo existente entre el peso de una cierta sustancia y el volumen correspondiente. |

Fuente: Propia

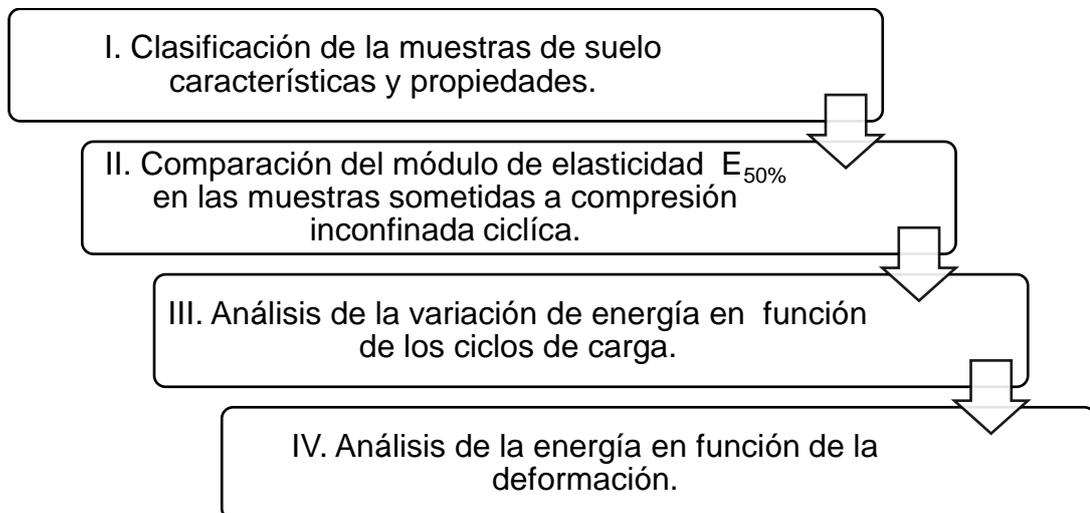
6.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

6.5.1. Observación estructurada

Es aquella que se realiza en campo, ya que es necesario la extracción de la muestra de suelo, de la cual fue importante tener la información de la ubicación de extracción, una identificación y un correcto almacenamiento para no alterar sus propiedades, estos datos se deben registrar en el formato de perforación que se encuentra en el anexos A, en este se encuentra datos de profundidad, descripción visual, ubicación, equipo, tipo y número de muestra, y nivel freático. Una vez se inician los ensayos es necesario llevar el registro para su posterior análisis.

6.6. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Ilustración 9 fases de la investigación



Fuente: Propia

FASE I: Clasificación de la muestras de suelo, características y propiedades

La extracción de la muestra se realizó en la ciudad de Bogotá, mediante tubos shelby a una profundidad de 8.4 mts. La información obtenida en campo se encuentra registrada el formato del registro de la perforación.

Se ejecutaron los ensayos en el laboratorio de contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, peso unitario, según las especificaciones de las Normas técnicas colombianas mencionadas en el marco legal, además de que las muestras fueron clasificadas por el método USCS de Casagrande.

FASE II: Comparación del módulo de elasticidad $E_{50\%}$ en las muestras sometidas a compresión inconfiada cíclica.

Se realizó el ensayo de compresión no confinada de acuerdo a la norma colombiana INVE 152-13, con el fin de conocer el esfuerzo de resistencia a la compresión de cada una de las muestras en condición estática.

Luego se planteó y se ejecutó el ensayo de compresión cíclica de carga y descarga, controlado por la carga, las muestras se prepararon de acuerdo a la norma INVE 152-13, para calcular el comportamiento módulo elástico y la resistencia de la compresión en condiciones de carga y descarga cíclica hasta la falla.

Una vez se obtuvieron los resultados de los módulos, se procede a graficar y comparar los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras de estudio.

FASE III: Análisis de la variación de energía en función de los ciclos de carga

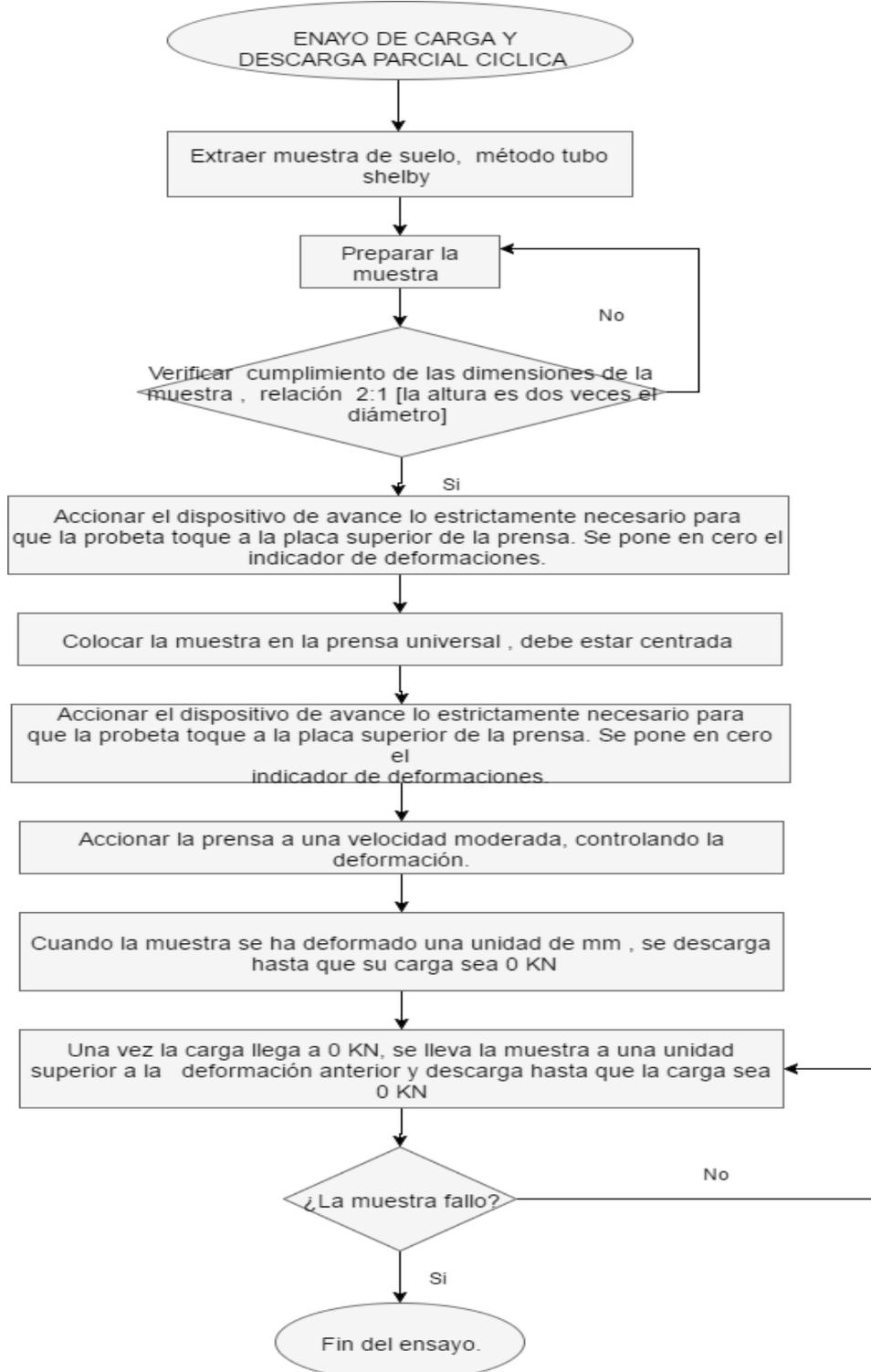
A partir de las gráficas esfuerzo Vs deformación por medio del método gráfico hallar el valor de la energía bajo la curva de cada ciclo, para graficar y observar cómo es su comportamiento durante la carga y descarga cíclica.

FASE IV: Análisis de variación de energía en función de la deformación

A partir de las gráficas energía total vs deformación analizar el comportamiento de la energía presentado en el punto de deformación máxima de cada muestra.

6.7. DISEÑO EXPERIMENTAL ENSAYO DE CARGA Y DESCARGA PARCIAL CÍCLICA

Ilustración 10 Diseño experimental ensayo de carga y descarga parcial cíclica



Fuente: Propia

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los datos de las muestras seleccionadas para este estudio en los diferentes ensayos realizados.

7.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

7.1.1. Extracción de la muestra

La extracción de la muestra tuvo lugar en la Calle 63 c # 70c - 96 (ver ubicación en la Ilustración 11) en la ciudad de Bogotá, el día 12 de abril del 2017.

Ilustración 11 Ubicación extracción de muestra



Fuente: google maps

El equipo que se utilizó fue manual, el cual estaba conformado por un barreno espiral, 3 tubos shelby, tubos de acero de 1 y 1.5 mts., un trípode para ayudar a sacar los tubos, y herramienta menor; en la Ilustración 12 se presenta un registro fotográfico tomado en campo.

Ilustración 12 Herramientas utilizadas para la extracción de la muestra



Fuente: propia

En el siguiente formato se encuentra registrada la información de campo, en este se encuentra el número de sondeo, el número de la muestra, profundidad y la descripción visual del suelo extraído.

Tabla 5 Formato registro de perforación.

| | |
|---|--|
| FORMATO REGISTRO DE PERFORACIÓN PROYECTO: Tesis análisis del comportamiento de un suelo arcilloso de Bogotá sometido a carga y descarga parcial cíclica DIRECCION : Calle 63 c N° 70c – 96 FECHA: 12- Abril- 2017 EQUIPO: Manual | |
|---|--|

| SONDEO 1 | | | | |
|-------------|-----|---|---------|------|
| PROFUNDIDAD | | DESCRIPCIÓN VISUAL | MUESTRA | |
| DE | A | | MUESTRA | TIPO |
| 0 | 0 | Capa vegetal | | |
| 0 | 0,5 | Relleno limo arenoso color marrón oscuro con residuos y desechos de construcción | 1 | SH |
| 0,5 | 0,9 | Limo negro de apariencia orgánica quebradizo | | |
| 0,9 | 1,5 | Limo marrón quebradizo , algo oxidado, poroso, procedemos a tomas muestra con el tubo shelby | 2 | SH |
| 1,5 | 1,9 | En la profundidad de 1 .90 aparece la arcilla color abanó claro oxidada, y de consistencia blanda | | |
| 1,9 | 2,4 | Arcilla abana | 3 | SH |
| 2,5 | 2,6 | Arcilla gris | | |
| | | Limpieza con espiral hasta 3 m | | |
| 3 | 3,6 | Arcilla gris, consistencia blanda, bastante húmeda | 4 | SH |
| | | Limpieza con espiral hasta 3 m | | |
| 3,6 | 4,2 | Arcilla gris consistencia media | 5 | SH |
| 4,5 | 5,1 | Arcilla marrón claro- gris arcilla limosa alta plasticidad | 6 | SH |
| | | Limpieza con espiral hasta 5.6 m | | |
| 5,9 | 6,5 | Arcilla marrón | 7 | SH |
| | | Limpieza con espiral de 6.60 a 7.20 m | | |
| 7,2 | 7,8 | Remoldeada, no se tuvo en cuenta | 8 | |
| 7,8 | 8,4 | Arcilla gris - marrón | 9 | SH |
| | | | | |
| | | | | |

| | |
|----------------|--------|
| NIVEL FREÁTICO | 2.20 m |
|----------------|--------|

Fuente: propia

7.1.2. Clasificación de las propiedades y características de las muestras

En la *Tabla 6* se presenta el resumen de los datos obtenidos mediante los ensayos realizados para la caracterización del suelo en el laboratorio. Para ver todos los datos y graficas ver **ANEXO A**.

Tabla 6 Resumen clasificación, características y propiedades de las muestras de suelo.

| MUESTRA | PROFUNDIDAD | DESCRIPCIÓN | HUMEDAD | PESO UNITARIO | LIMITE LIQUIDO | LIMITE PLÁSTICO | INDICE PLÁSTICO | PLASTICIDAD | P. UNITARIO SECO | CONTENIDO DE VACIOS | CLASIFICACIÓN U.S.C.S | |
|---------|-------------|--|---------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|------------------|---------------------|-----------------------|--|
| | [m] | | % | gr/cm3 | % | % | % | | gr/cm3 | | GRUPO | DESCRIPCIÓN |
| M1-S1 | 0.50 - 0.90 | Limo de color marrón oscuro de apariencia orgánica. | 94,36 | 1,33 | | | | | | | | |
| M2-S1 | 0.90 - 1.50 | Limo de color marrón algo oxidado, poroso, quebradizo, bastante humedo. | 98,63 | 1,29 | 123,6 | 77,6 | 46 | Muy alta | 0,65 | 3,23 | MH | Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, limos elásticos. |
| M3-S1 | 1.90 - 2.40 | Arcilla de color habano clara, oxidada, de consistencia blanda, bastante humeda. | 84,62 | 1,58 | 72,7 | 33,5 | 39,2 | Muy alta | 0,86 | 2,21 | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas gruesas. |
| M4-S1 | 3.0 - 3.60 | Arcilla de color habano oscura y marrón gris de consistencia blanda. | 127,8 | 1,57 | 144,8 | 46,4 | 98,4 | Muy alta | 0,69 | 2,99 | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas gruesas. |
| M5-S1 | 3.60 - 4.20 | Arcilla algo limosa de color gris y marron. | 131,08 | 1,55 | 200,2 | 64,8 | 135,4 | Muy alta | 0,67 | 3,10 | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas gruesas. |
| M6-S1 | 4.50 - 5.10 | Arcilla de color marrón. | 127,21 | 1,56 | 190,2 | 64,4 | 125,8 | Muy alta | 0,69 | 3,01 | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas gruesas. |
| M7-S1 | 5.90 - 6.50 | Arcilla algo limosa de color marrón oxidada. | 135,98 | 1,41 | 193,6 | 56,4 | 137,2 | Muy alta | 0,60 | 3,60 | CH | Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas gruesas. |
| M9-S1 | 7.8 - 8.4 | Arcilla algo limosa de color marrón | 127,99 | 1,44 | 132,9 | 60,4 | 72,5 | Muy alta | 0,63 | 3,35 | MH | Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos. |

Fuente: Propia

En la tabla anterior se encuentran las muestras obtenidas en la perforación, en ella se presenta la profundidad, la descripción visual, la humedad, el peso unitario, el límite líquido, el límite plástico, el índice de plasticidad, el peso unitario seco, el contenido de vacíos y la clasificación del suelo según el método U.S.C.S.

En esta se observa que las muestras utilizadas en esta investigación poseían un alto contenido de agua expresado como la humedad (I.N.V E 122 – 13 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas suelo- agregado), el menor valor es fue 84.62% y el mayor 135.98%.

El peso unitario que se obtuvo por el método de la parafina se encuentra entre los rangos para los tipos de suelos según la clasificación UCSC como se muestra en la *tabla 6* el limo de alta plasticidad que se encuentra arriba del nivel freático (muestra 2) tuvo un peso unitario dentro del rango (1.17 – 1.78) gr/cm³, las arcillas de alta plasticidad que se encuentran debajo del nivel freático (muestra 3,4,5,6,7) tuvieron el peso unitario dentro del rango (1.12 – 1.98) gr/cm³, y el limo de alta plasticidad que se encuentra debajo del nivel freático entre el rango de (1.27 - 2.09) gr/cm³.

Tabla 7 Pesos unitarios característicos

| Clasificación del suelos SUCS | Peso Unitario en kN/m ³ | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | Arriba del nivel freático | Abajo del nivel freático |
| GP grava mal graduada | 17.50-20.50 | 19.50-22.00 |
| GW grava bien graduada | 17.50-22.00 | 19.50-23.50 |
| GM grava limosa | 16.00-20.50 | 19.50-22.00 |
| GC grava arcillosa | 16.00-20.50 | 19.50-22.00 |
| SP arena mal graduada | 15.00-19.50 | 19.00-21.00 |
| SW arena bien graduada | 15.00-21.00 | 19.00-23.00 |
| SM arena limosa | 12.50-21.00 | 17.50-22.00 |
| SC arena arcillosa | 13.50-20.50 | 17.50-21.00 |
| ML limo de baja plasticidad | 11.50-17.50 | 17.50-21.00 |
| MH limo de alta plasticidad | 11.50-17.50 | 12.50-20.50 |
| CL arcilla de baja plasticidad | 12.50-17.50 | 11.50-20.50 |
| CH arcilla de alta plasticidad | 12.50-17.50 | 11.00-19.50 |

Fuente: <http://geolabs.com.mx/blog/trabajo/page/2/>

El límite líquido se trabajó bajo la norma I.N.V E 125 -13 Determinación del límite líquido de los suelos y el límite plástico y el índice de plasticidad se empleó la norma I.N.V E 126 -13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, estos parámetros son necesarios para poder emplear el método de clasificación de

suelos UCSC, además permite conocer que todas las muestras poseen una alta plasticidad.

El peso unitario seco se obtuvo a partir de relaciones de fase, para el contenido de vacíos fue necesario utilizar un valor teórico de la gravedad específica de las arcillas, ya que no se realizó un ensayo para calcularlo, este valor fue 2.75²⁰, por último se realizó la clasificación del suelo por el método U.S.C.S la cual dio una descripción de los suelos similar a la descripción visual.

7.2. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD $E_{50\%}$ EN LAS MUESTRAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN INCONFINADA CÍCLICA.

Por medio de las gráficas esfuerzo Vs deformación se comparan las resistencias últimas y los módulos de elasticidad que se toman de la gráfica del ensayo de compresión inconfiada cíclica. Para ver el procedimiento detallado del examen dirigirse al **ANEXO C**.

7.2.1. Comparación del esfuerzo de compresión inconfiada a partir del ensayo compresión inconfiada I.N.V.E 152.13 y compresión inconfiada cíclica.

Todos los datos con los que se realizamos la graficas esfuerzo vs deformación se encuentran en el **ANEXO B**.

Para ver las fotos de las muestras falladas mediante el ensayo de compresión cíclica ver el **ANEXO D**.

7.2.1.1. Muestra 1

La muestra número uno tiene una profundidad entre 0.5 - 0.9 mts, no se le halló características ni propiedades, debido a que esta muestra no tenía la consistencia necesaria para reproducir una muestra cilíndrica inalterada, la cual era necesaria para los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica, además de contener desechos y residuos de construcción.

²⁰ CONSTRUCTOR CIVIL. Tablas para valores típicos de gravedad específica. [En línea]. [citado 03- Oct. de 2017]. Disponible en: <http://constructorcivil.org/tablas-para-valores-tipicos-de-gravedad/>

Ilustración 13 Muestra 1



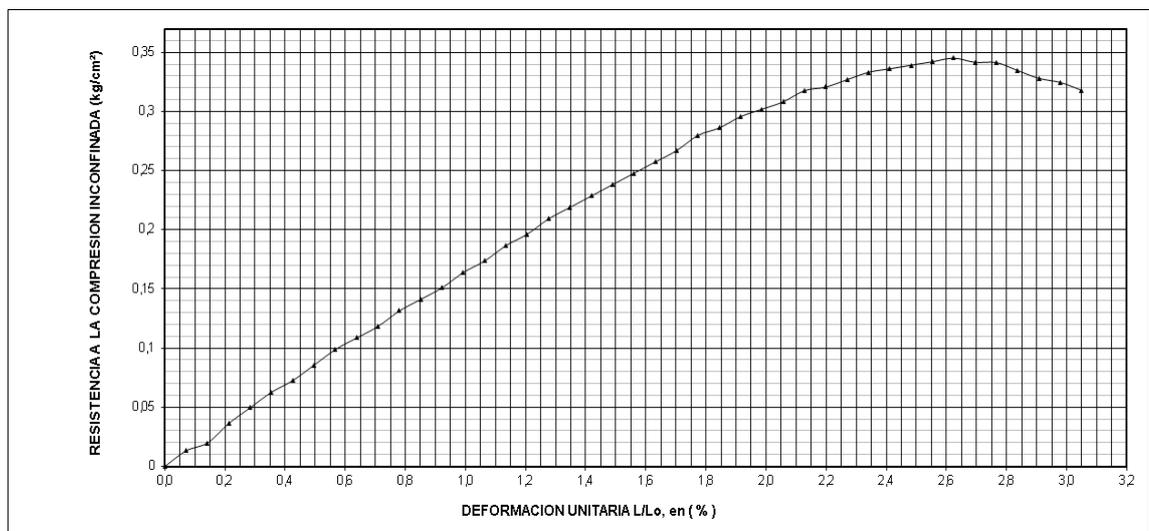
Fuente: Propia

7.2.1.2. Muestra 2

La muestra número dos extraída a una profundidad de 0.90 – 1.50 mts. Se le desarrolló los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica, en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la *gráfica 1* de compresión inconfiada se obtiene que a una deformación de unitaria de 2.6% y una resistencia a la compresión inconfiada de 0.35 kg/cm², falla la muestra.

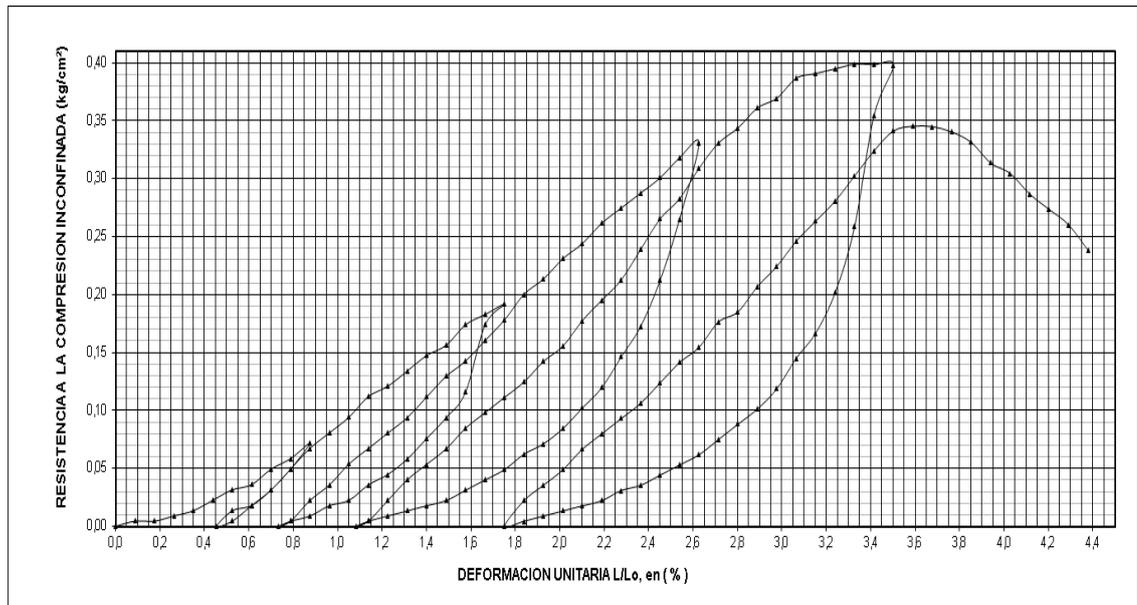
Gráfica 1 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 2. Ensayo de compresión inconfiada.



Fuente: Propia

La Gráfica 2 muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 3.5% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.40 Kg/cm² para la falla de la muestra en el ciclo 4.

Gráfica 2 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 2. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



Fuente: Propia

Mediante estos resultados se evidencia que cuando está sometida la muestra al ensayo de compresión inconfiada cíclica tiene una mayor deformación para llegar a la falla, teniendo un aumento del 14.28% en el esfuerzo máximo de acuerdo al ensayo de compresión inconfiada.

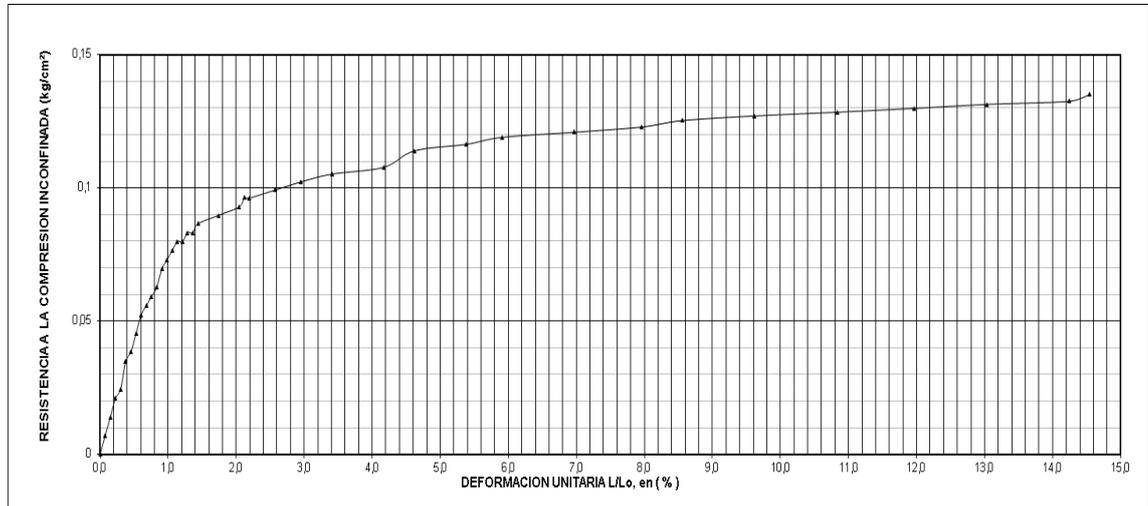
Ambas resistencias a la compresión (q_u) indican que la muestra 2 pertenece a un suelo de consistencia blanda (ver tabla 2. Consistencia de las arcillas).

7.2.1.3. Muestra 3

La muestra número tres extraída a una profundidad de 1.90 – 2.40 mts. Se le desarrolló los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la *Gráfica 3* se obtiene que a una deformación unitaria de 14% y una resistencia a la compresión inconfiada de 0.14 Kg/cm², falla la muestra.

Gráfica 3 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 3. Ensayo de compresión inconfiada



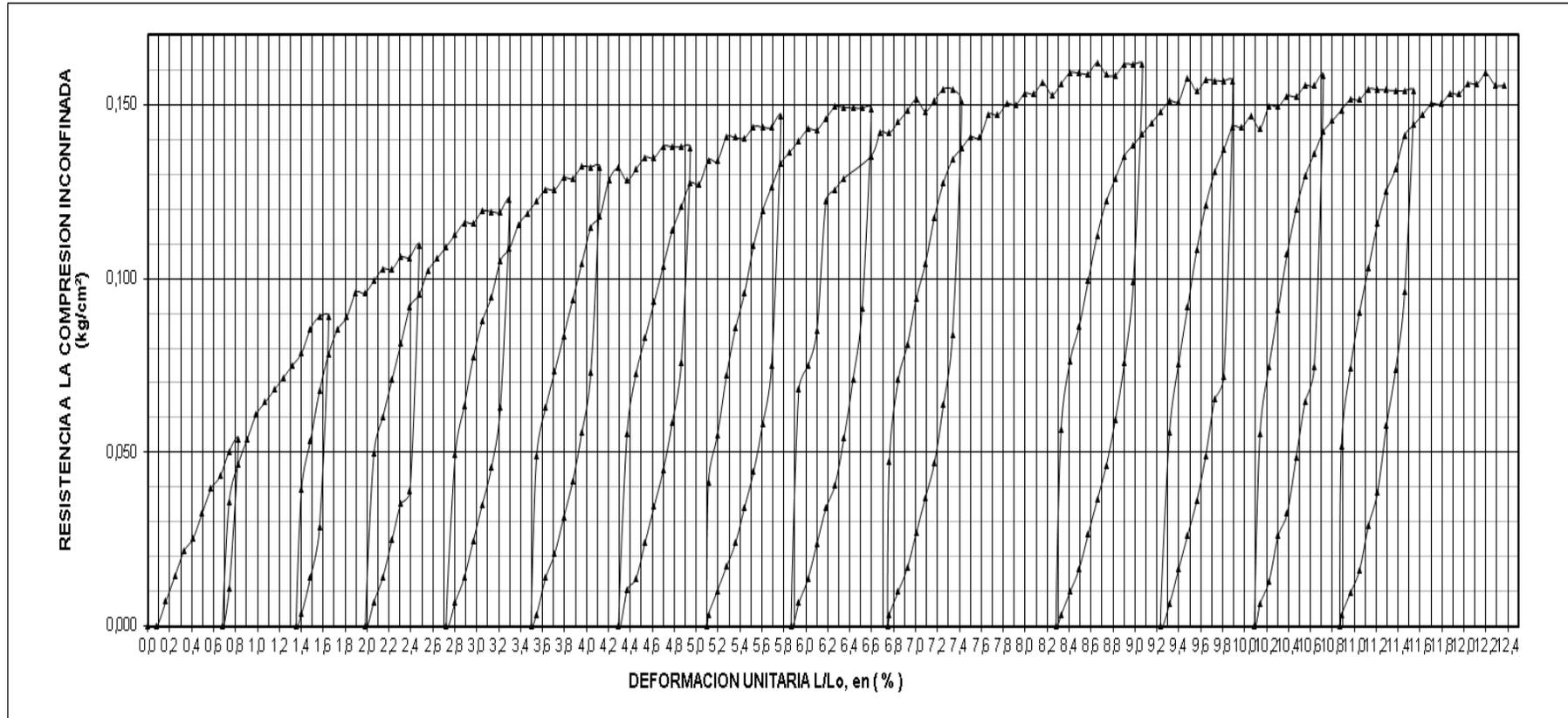
Fuente: propia

La *gráfica 4* muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 8.656% y una resistencia a la compresión inconfiada de 0.162 Kg/cm² para la falla de esta muestra en el ciclo 9.

Mediante estos resultados se evidencia que cuando está sometida la muestra al ensayo de compresión inconfiada cíclica tiene una menor deformación para llegar a la falla y un aumento del 15.71% en el esfuerzo máximo de acuerdo al ensayo de compresión inconfiada.

Ambas resistencias a la compresión (q_u) indican que la muestra 3 pertenece a un suelo de consistencia muy blanda (*ver tabla 2. Consistencia de las arcillas*).

Gráfica 4 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 3. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



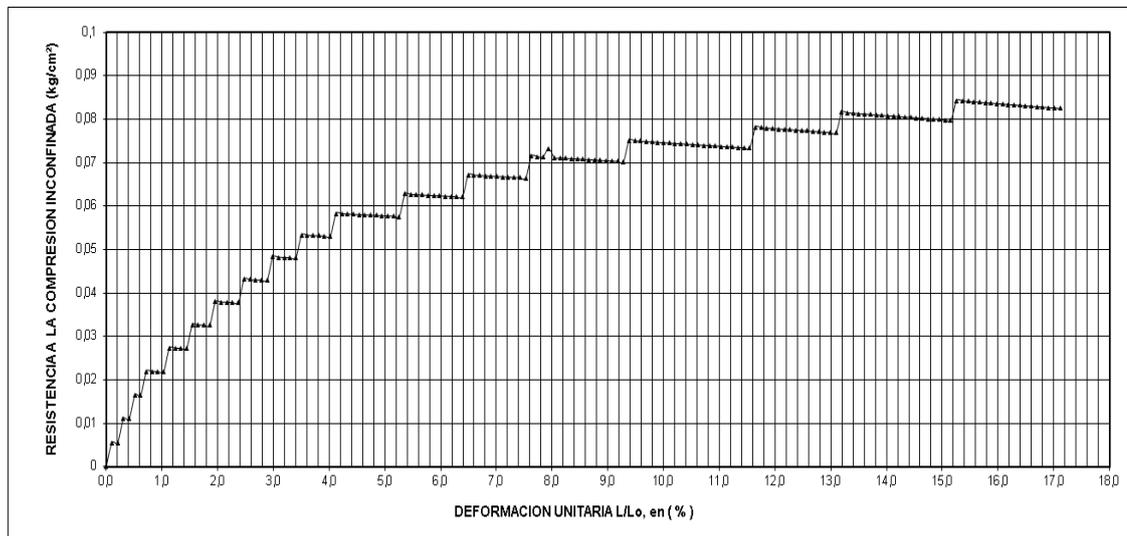
Fuente: propia

7.2.1.4. Muestra 4

La muestra número cuatro extraída a una profundidad de 3.0 – 3.60 mts. Se le desarrollo los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la *Gráfica 5* de compresión inconfiada se obtiene que a una deformación unitaria 17.1% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.08 Kg/cm², falla la muestra.

Gráfica 5 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 4. Ensayo de compresión inconfiada.



Fuente: propia

En la siguiente gráfica se observa que el ensayo de compresión inconfiada cíclica presenta una variación de acuerdo a los ensayos de las demás muestras ya que fue descargada a un 50% de la carga máxima de cada ciclo.

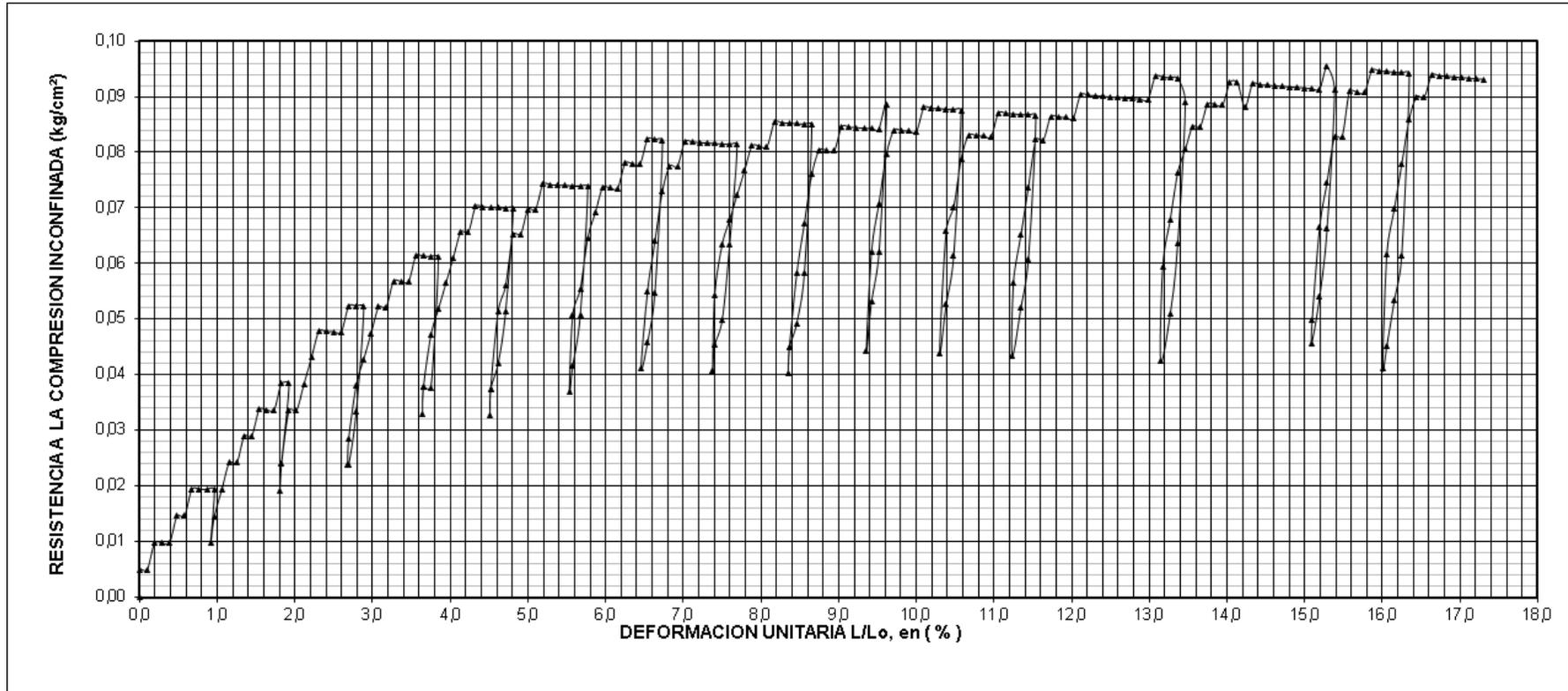
De acuerdo a la *Gráfica 6* se muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 17.3% y una resistencia a la compresión inconfiada de 0.09 Kg/cm² para la falla de esta muestra en el ciclo 15.

Mediante estos resultados se evidencia que cuando está sometida la muestra al ensayo de compresión inconfiada cíclica no tiene una menor deformación y no aumenta su capacidad de carga para llegar a la falla.

En la Gráfica 6 del ensayo de compresión inconfiada cíclica, muestra el comportamiento del esfuerzo durante cada ciclo descargado al 50%, en los cuales se comporta de forma ascendente llegando así a un esfuerzo máximo de 0.095 Kg/cm² en el ciclo 14, mostrando una deformación unitaria de 15.3% mientras que en el ensayo de compresión inconfiada se tiene un esfuerzo de falla máximo de 0.081 Kg/cm². Teniendo así una diferencia del esfuerzo máximo de 12.5%.

Ambas resistencias a la compresión (q_u) indican que la muestra 4 pertenece a un suelo de consistencia muy blanda (*ver tabla 2. Consistencia de las arcillas*).

Gráfica 6 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 4. Ensayo de compresión inconfiada cíclico

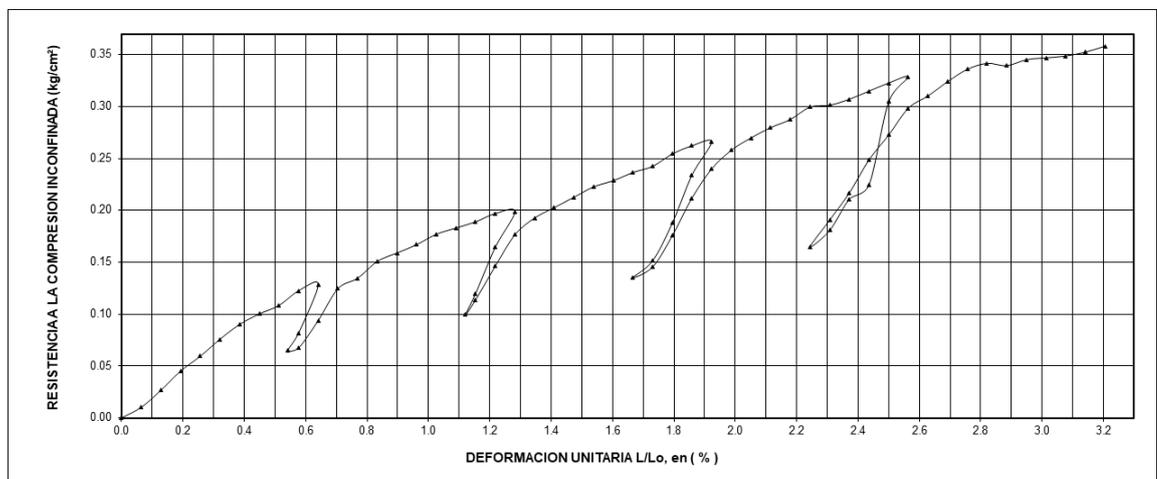


Fuente: propia

7.2.1.5. Muestra 5

La muestra número cinco extraída a una profundidad de 3.60 – 4.20 mts. Se le desarrolló solo el ensayo de compresión inconfiada cíclica, ya que no se contaba con la cantidad de muestra suficiente para realizar el ensayo de compresión inconfiada, como se observa la *Gráfica 7* el comportamiento de los ciclos de carga y descarga esfuerzo fueron atípicos, por lo cual esta muestra no se tiene en cuenta para el análisis de los módulos de elasticidad y la energía.

Gráfica 7 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 5. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



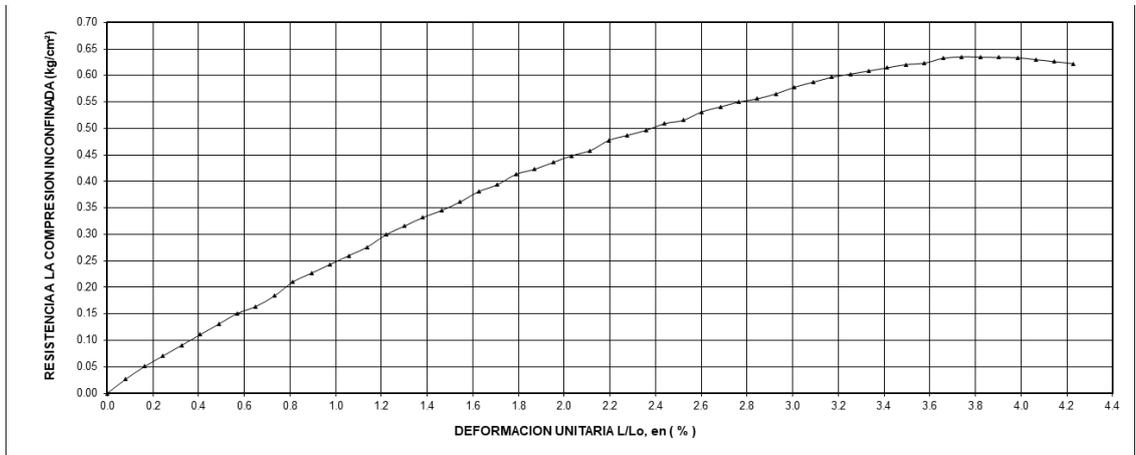
Fuente: propia

7.2.1.6. Muestra 6

La muestra número seis extraída a una profundidad de 4.50 – 5.10 mts. Se le desarrolló los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la siguiente gráfica de compresión inconfiada se obtiene que a una deformación unitaria 3.7% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.64 Kg/cm², falla la muestra.

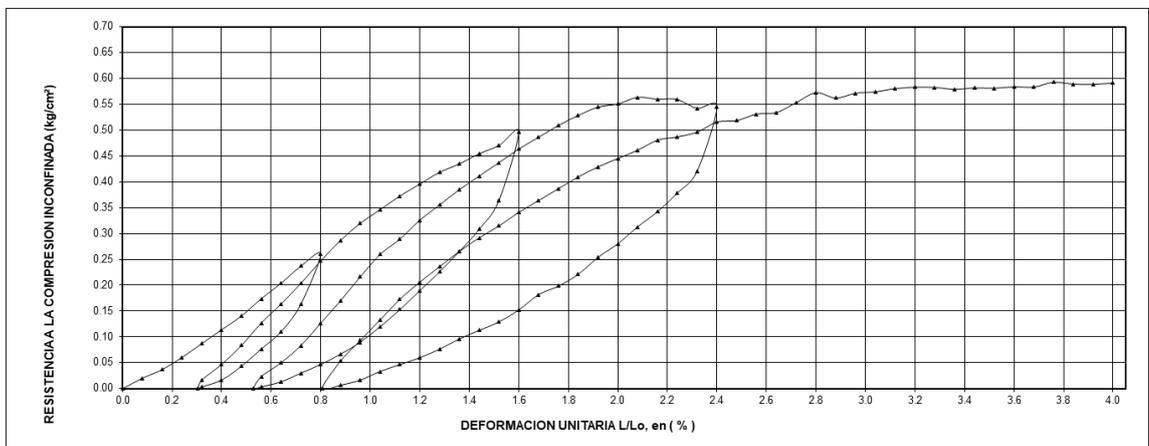
Gráfica 8 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 6. Ensayo de compresión inconfiada.



Fuente: propia

La grafica anterior muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 2.8% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.57 Kg/cm² para la falla de la muestra en el ciclo 4.

Gráfica 9 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 6. Ensayo de compresión inconfiada cíclica



Fuente: propia

Mediante estos resultados se evidencia que cuando está sometida la muestra al ensayo de compresión inconfiada cíclica tiene una menor deformación para llegar a la falla, teniendo una disminución del 10.94% en el esfuerzo máximo de acuerdo al ensayo de compresión inconfiada.

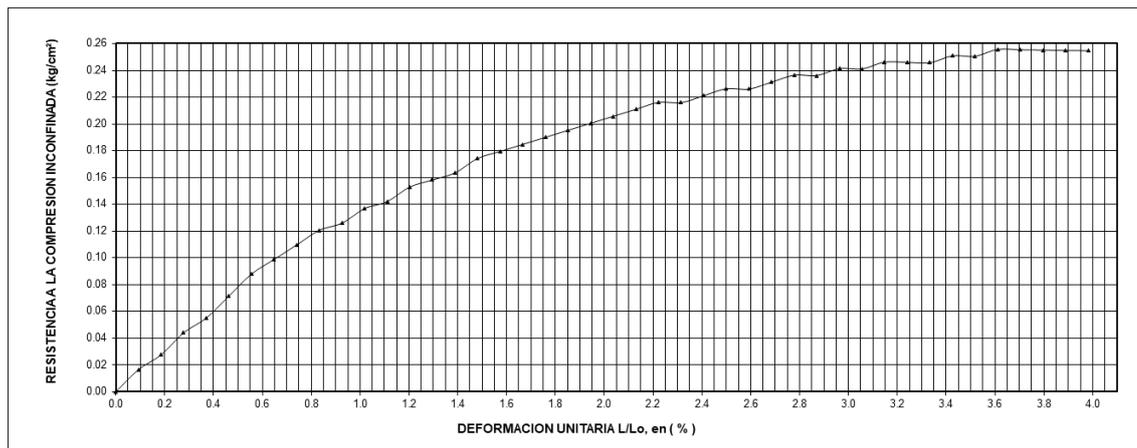
Ambas resistencias a la compresión (q_u) indican que la muestra 6 pertenece a un suelo de consistencia media (ver tabla 2. *Consistencia de las arcillas*).

7.2.1.7. Muestra 7

La muestra número siete extraída a una profundidad de 5.9 – 6.50 mts. Se le desarrollo los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la *Gráfica 10* de compresión inconfiada se obtiene que a una deformación unitaria 3.6% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.26 Kg/cm², falla la muestra.

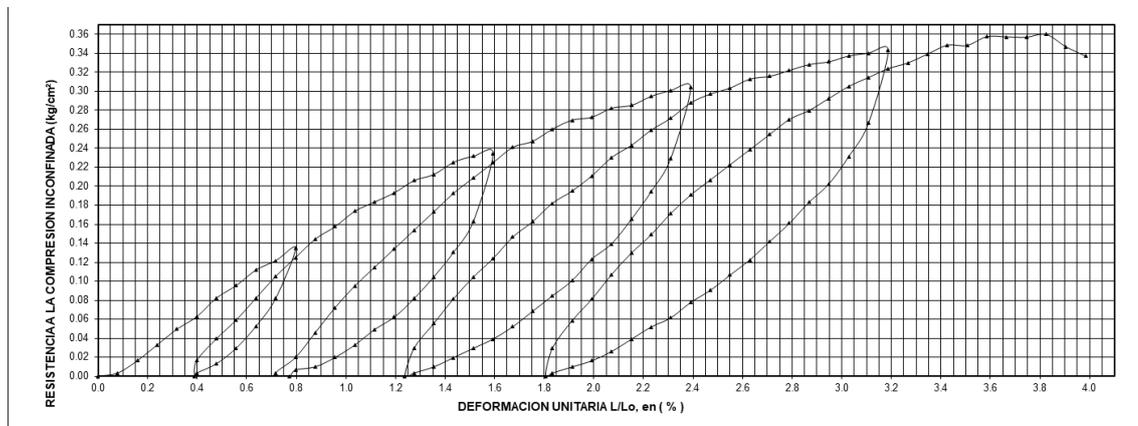
Gráfica 10 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 7. Ensayo de compresión inconfiada.



Fuente: propia

La *Gráfica 11* muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 3.7% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.36 Kg/cm² para la falla de la muestra en el ciclo 4.

Gráfica 11 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 7. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



Fuente: propia

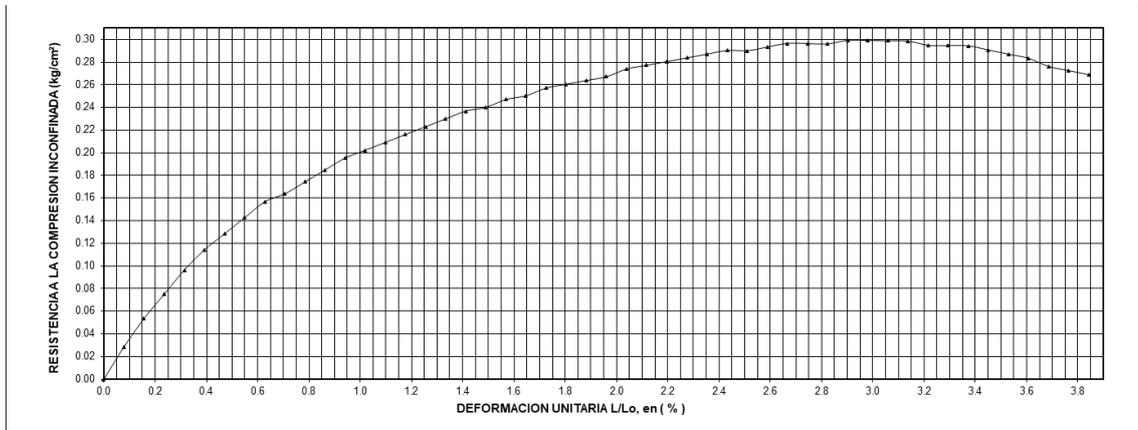
Mediante estos resultados se evidencia que cuando la muestra esta sometida al ensayo de compresión inconfiada cíclica y el ensayo de compresión inconfiada se presenta una diferencia de 0.1% en la deformación para llegar a la falla, teniendo un aumento del 38.46% en el esfuerzo máximo de acuerdo al ensayo de compresión inconfiada.

7.2.1.8. Muestra 9

La muestra número nueve extraída a una profundidad de 5.9 – 6.50 mts. Se le desarrollo los ensayos de compresión inconfiada y compresión inconfiada cíclica en los cuales se evalúa el esfuerzo de compresión inconfiada.

En la Gráfica 12 de compresión inconfiada se obtiene que a una deformación unitaria 2.9% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.30 Kg/cm², falla la muestra.

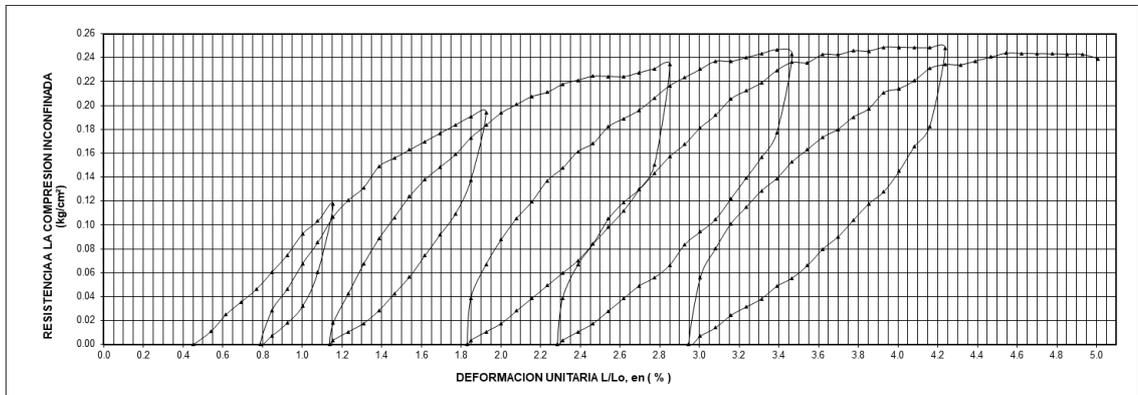
Gráfica 12 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 9. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



Fuente: propia

La Gráfica 13 muestra el resultado del ensayo compresión inconfiada cíclica con una deformación unitaria de 3.9% con una resistencia a la compresión inconfiada de 0.25 Kg/cm² para la falla de la muestra en el ciclo 5.

Gráfica 13 Esfuerzo Vs Deformación. Muestra 9. Ensayo de compresión inconfiada cíclico.



Fuente: propia.

Mediante estos resultados se evidencia que cuando está sometida la muestra al ensayo de compresión inconfiada cíclica tiene una mayor deformación para llegar a la falla, teniendo una disminución del 16.67% en el esfuerzo máximo de acuerdo al ensayo de compresión inconfiada.

Ambas resistencias a la compresión (q_u) indican que la muestra 6 pertenece a un suelo de consistencia blanda (ver tabla 2. *Consistencia de las arcillas*).

7.2.1.9. Análisis general resistencia a la compresión inconfiada (q_u) estática y cíclica.

El suelo sometido a carga cíclica tiende a tener más resistencia a la compresión inconfiada cíclica como se observa en la *Tabla 8*, en las muestras 2, 3, 4, y 7, mientras que en el caso de la muestra 6 y 9 disminuye.

Tabla 8 Diferencia porcentual de los esfuerzos de compresión de los ensayos realizados.

| MUESTRA | q_u estático | q_u cíclico | Porcentaje % |
|---------|--------------------|--------------------|--------------|
| | kg/cm ² | kg/cm ² | |
| 2 | 0.35 | 0.4 | 14.286 |
| 3 | 0.14 | 0.162 | 15.714 |
| 4 | 0.08 | 0.09 | 12.500 |
| 6 | 0.64 | 0.57 | 10.938 |
| 7 | 0.26 | 0.36 | 38.462 |
| 9 | 0.3 | 0.25 | 16.667 |

Fuente: propia

El suelo ensayado se comportó de manera diferente, no es posible afirmar a partir de los resultados del ensayo de compresión inconfiada cíclica una tendencia en el esfuerzo de compresión inconfiada y la deformación unitaria respecto a los valores del ensayo de compresión inconfiada, como se observa en la *Tabla 9* la muestra 2, 4 y 7 presentaron un aumento en el esfuerzo y la deformación respecto a el ensayo de compresión inconfiada, mientras que la muestra 3 disminuyó de la deformación y aumento el esfuerzo, y la muestra 6 la deformación y el esfuerzo disminuyeron respecto a los valores del ensayo de compresión.

Las muestras del suelo ensayadas en su mayoría presentan una consistencia muy blanda y blanda solo una muestra tuvo consistencia media.

Tabla 9 Comportamiento de la deformación unitaria y la resistencia a la compresión inconfiada cíclica respecto a la deformación unitaria y la resistencia a la compresión inconfiada.

| MUESTRA | DEFORMACION UNITARIA | RESISTENCIA A LA COMPRESION | CONSISTENCIA |
|---------|----------------------|-----------------------------|--------------|
| 2 | Aumento | Aumento | Blanda |
| 3 | Disminuyo | Aumento | Muy blanda |
| 4 | Aumento | Aumento | Muy blanda |
| 6 | Disminuyo | Disminuyo | Media |
| 7 | Aumento | Aumento | Blanda |
| 9 | Aumento | Disminuyo | Blanda |

Fuente: propia

7.2.2. Módulos de elasticidad $E_{50\%}$ en las muestras sometidas a compresión inconfiada cíclica.

A partir de las gráficas esfuerzo Vs deformación del ensayo de compresión inconfiada cíclico, se obtuvieron el módulo de elasticidad para cada ciclo, a continuación se presenta las gráficas que dan a conocer su comportamiento.

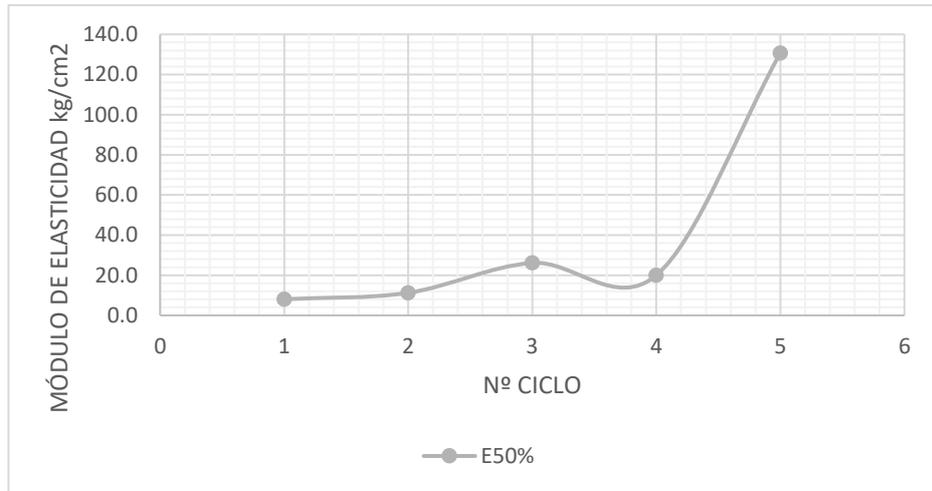
En la *gráfica 14* se observa que los módulos de elasticidad tienden a tener un comportamiento ascendente de acuerdo a cada ciclo que se realiza en el ensayo de compresión inconfiada cíclico. A partir de esto se indica que a medida que la deformación avanza en el suelo aumente su rigidez.

Tabla 10 Datos módulos de elasticidad. Muestra 2.

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------|
| | kg/cm2 |
| 1 | 8.0 |
| 2 | 11.3 |
| 3 | 26.2 |
| 4 | 20.0 |
| 5 | 130.7 |

Fuente: propia

Gráfica 14 Módulos de elasticidad muestra 2.



Fuente: propia

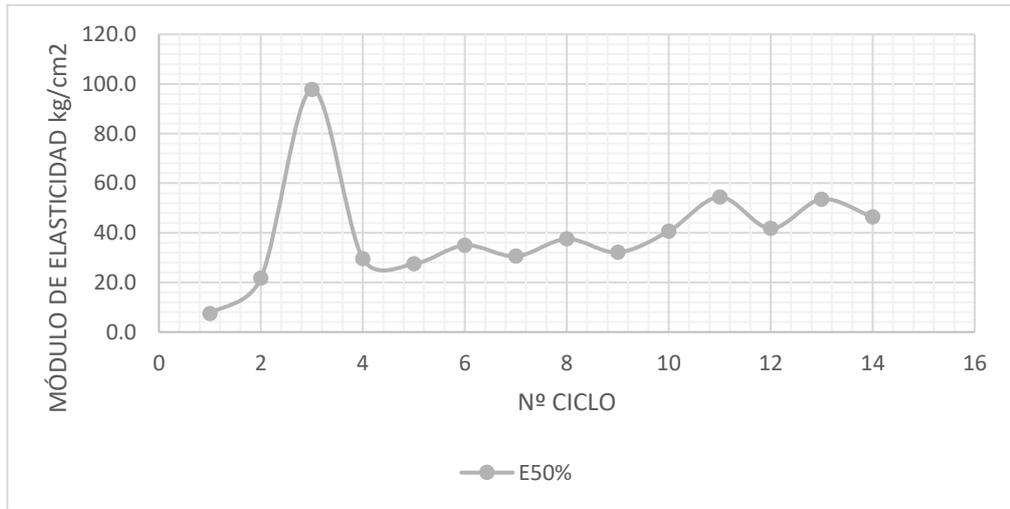
En la *gráfica 15* el módulo $E_{50\%}$ presenta un comportamiento ascendente con teniendo un valor atípico en el ciclo 3, indicand0 que a medida que aumenta el ciclo el material se vuele más rígido.

Tabla 11 Datos módulos de elasticidad. Muestra 3

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------|
| | kg/cm2 |
| 1 | 7.4 |
| 2 | 21.8 |
| 3 | 97.8 |
| 4 | 29.6 |
| 5 | 27.5 |
| 6 | 34.9 |
| 7 | 30.6 |
| 8 | 37.5 |
| 9 | 32.1 |
| 10 | 40.6 |
| 11 | 54.4 |
| 12 | 41.8 |
| 13 | 53.5 |
| 14 | 46.4 |

Fuente: propia

Gráfica 15 Módulos de elasticidad muestra 3.



Fuente: propia

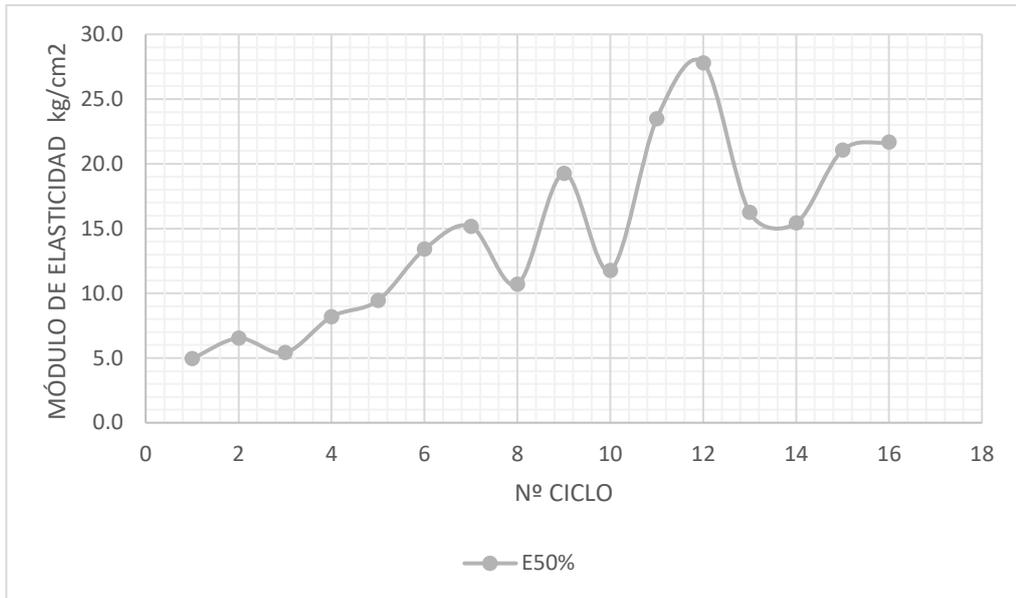
En la *gráfica 16*, se observa una tendencia ascendente, el valor más alto se encuentra en el ciclo 12, sin embargo, en los ciclos 8, 10, 13 y 14 se evidencia disminución en el módulo, pero debido a que el módulo en la mayoría de los ciclos aumenta indica que el material se vuelve más rígido.

Tabla 12 Datos módulos de elasticidad. Muestra 4.

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------------------|
| | kg/cm ² |
| 1 | 5.0 |
| 2 | 6.5 |
| 3 | 5.4 |
| 4 | 8.2 |
| 5 | 9.4 |
| 6 | 13.4 |
| 7 | 15.2 |
| 8 | 10.7 |
| 9 | 19.3 |
| 10 | 11.8 |
| 11 | 23.5 |
| 12 | 27.8 |
| 13 | 16.3 |
| 14 | 15.4 |
| 15 | 21.0 |
| 16 | 21.7 |

Fuente: propia

Gráfica 16 Módulos de elasticidad muestra 4.



Fuente: propia

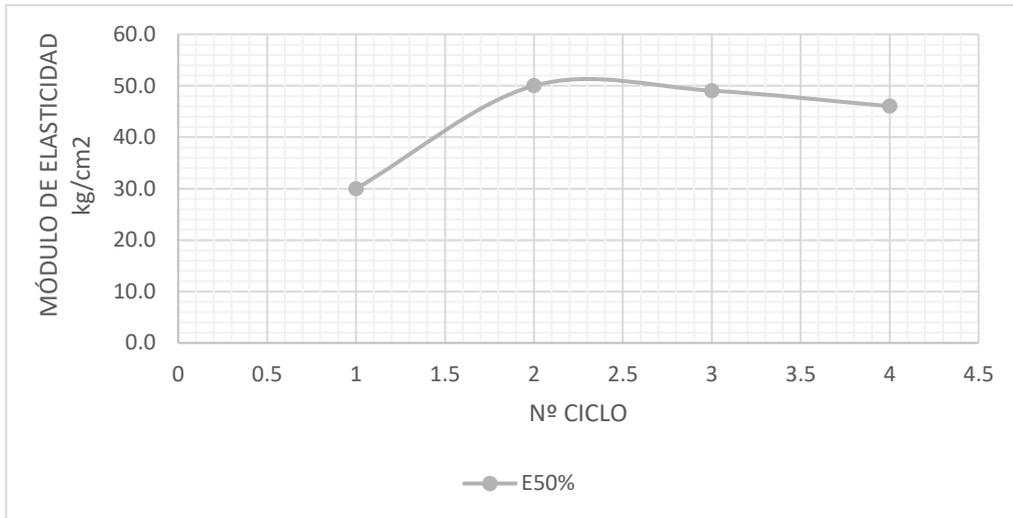
En la gráfica 17 se observa que el comportamiento del E_{50%} en los dos primeros ciclos se comporta de manera ascendente y en el último ciclo desciende. Teniendo en cuenta el primer y el último punto de los módulos este aumento indica que a medida que este crece el material se vuelve más rígido.

Tabla 13 Datos módulos de elasticidad. Muestra 6.

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------------------|
| | kg/cm ² |
| 1 | 30.0 |
| 2 | 50.0 |
| 3 | 49.1 |
| 4 | 46.0 |

Fuente: propia

Gráfica 17 Módulos de elasticidad muestra 6.



Fuente: propia

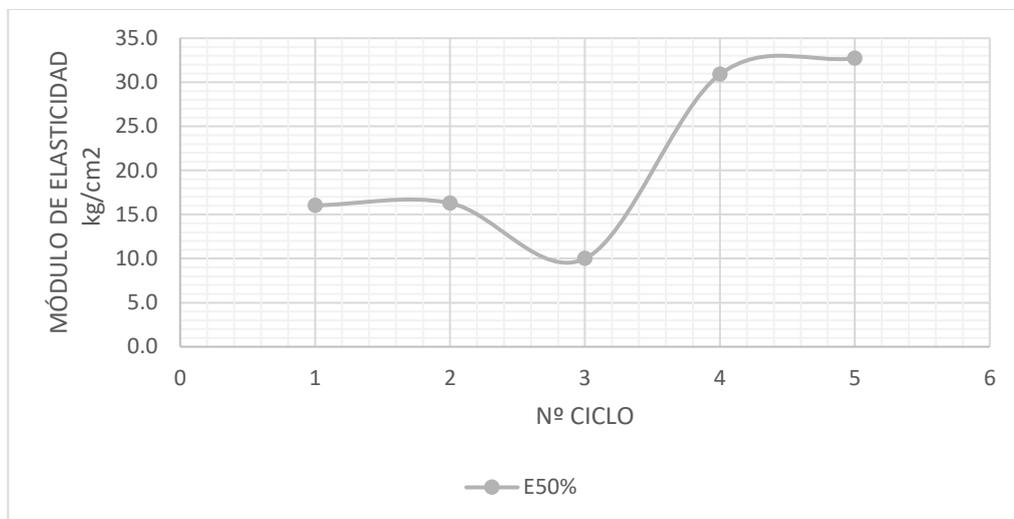
En el *grafico 18* se observa que el comportamiento del módulo $E_{50\%}$ también es ascendente, teniendo un valor atípico en el ciclo 3. El aumento de los módulos indica que a medida que este crece el material se vuelve más rígido.

Tabla 14 Datos módulos de elasticidad. Muestra 7.

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------------------|
| | kg/cm ² |
| 1 | 16.0 |
| 2 | 16.3 |
| 3 | 10.0 |
| 4 | 30.9 |
| 5 | 32.7 |

Fuente: propia

Gráfica 18 Módulos de elasticidad muestra 7.



Fuente: propia

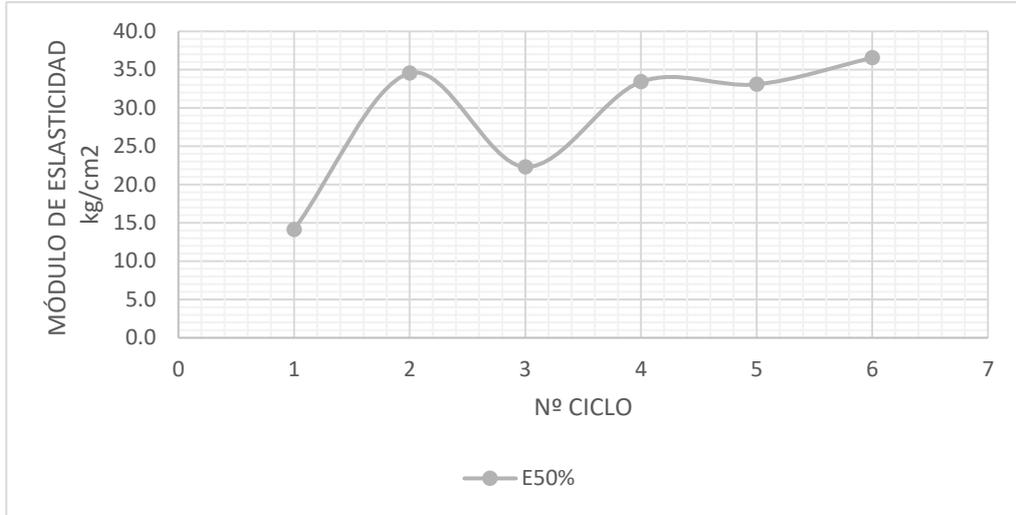
En el *grafico 19* se observa que el comportamiento del módulo $E_{50\%}$ tiene un comportamiento ascendente aumenta con pequeñas diferencias, teniendo un valor atípico en el ciclo 2. El aumento de los módulos indica que a medida que este crece el material se vuelve más rígido.

Tabla 15 Datos módulos de elasticidad. Muestra 9

| Nº CICLO | E50% |
|----------|--------------------|
| | kg/cm ² |
| 1 | 14.1 |
| 2 | 34.5 |
| 3 | 22.3 |
| 4 | 33.4 |
| 5 | 33.1 |
| 6 | 36.5 |

Fuente: propia

Gráfica 19 Módulos de elasticidad muestra 9.

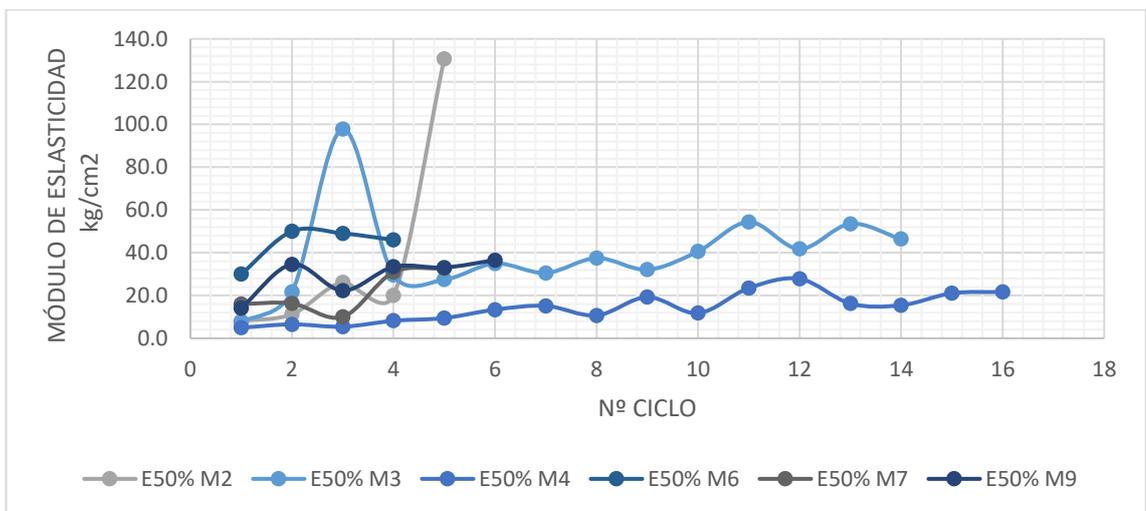


Fuente: propia

7.2.2.1. Análisis general módulos de elasticidad

El comportamiento del módulo de elasticidad en todas las muestras aumento a pesar de que en algunas muestras el modulo se comportó de manera disímil, de las muestras sometidas al ensayo de compresión inconfiada cíclica se deduce que el material tiende a aumentar su rigidez, además de mostrar deformaciones plásticas.

Gráfica 20 Comparación módulos de elasticidad de las muestras.

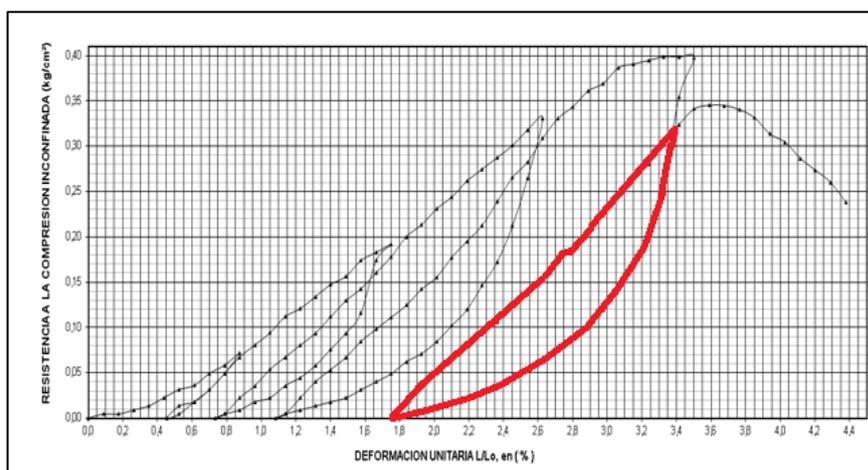


Fuente: propia

7.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LOS CICLOS DE CARGA.

La energía se halló por medio del método gráfico, esta se toma del área existente que se forma entre el ciclo de carga y descarga. Como los muestra el área seleccionada en la siguiente ilustración.

Ilustración 14 Cálculo de la energía.



Fuente: propia

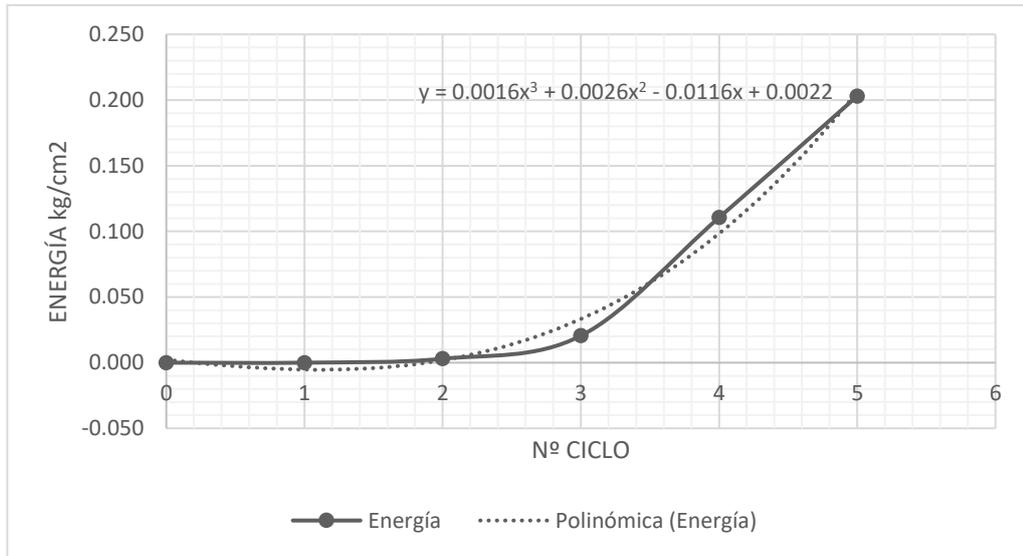
En la *tabla 16* se muestra el valor de la energía en cada ciclo y el acumulado total, se observa que cada vez avanza el ciclo la energía aumenta, y en la *gráfica 21* se analiza el comportamiento de la energía de acuerdo al ciclo mostrando así la existencia de una relación directamente proporcional ya que cada vez que aumenta el ciclo aumenta la energía.

Tabla 16 Datos energía Muestra 2

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|---------------|-------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.003 | 0.003 |
| 3 | 0.018 | 0.021 |
| 4 | 0.090 | 0.111 |
| 5 | 0.093 | 0.203 |

Fuente: propia

Gráfica 21 Curva de energía muestra 2



Fuente: propia

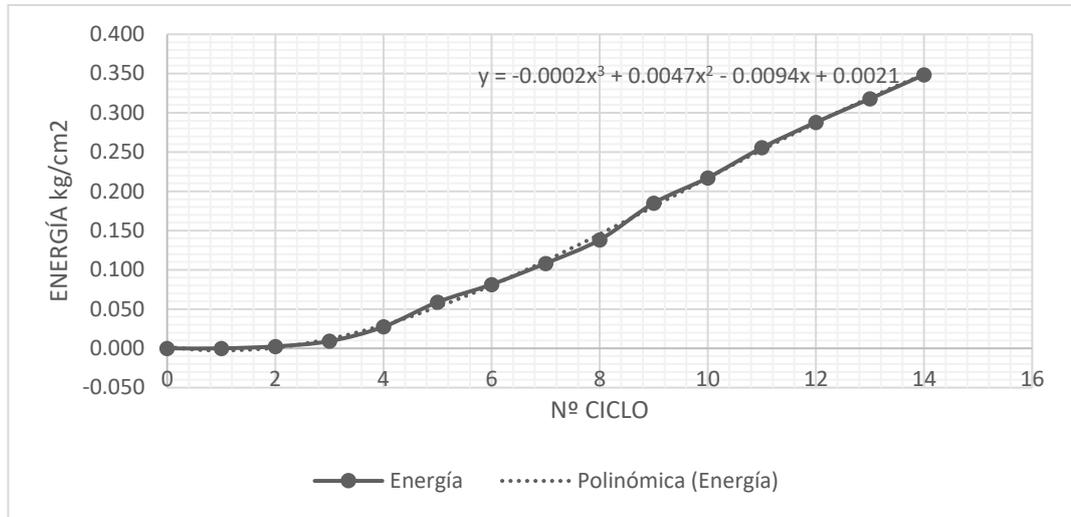
En la *tabla 17* está el valor de la energía por ciclo, estos valores indican que la energía se comporta diferente en cada ciclo. La energía total que se presente en el ensayo es 0.348 Kg/cm² como se muestra en el *grafico 22*.

Tabla 17 Datos energía Muestra 3

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|---------------|-------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.003 | 0.003 |
| 3 | 0.007 | 0.009 |
| 4 | 0.018 | 0.027 |
| 5 | 0.031 | 0.059 |
| 6 | 0.023 | 0.081 |
| 7 | 0.027 | 0.108 |
| 8 | 0.030 | 0.138 |
| 9 | 0.047 | 0.185 |
| 10 | 0.032 | 0.217 |
| 11 | 0.038 | 0.255 |
| 12 | 0.033 | 0.288 |
| 13 | 0.030 | 0.318 |
| 14 | 0.031 | 0.348 |

Fuente: propia

Gráfica 22 Curva de energía muestra 3



Fuente: propia

En la *tabla 18* se presentan los valores de energía para cada ciclo, en los dos primeros ciclos no hay energía, y en los demás ciclos la energía se comporta de manera diferente, también se observa que al ser descargados y cargados los ciclos al 50% de la carga la energía disminuye de acuerdo a lo visto en las gráficas anteriores que fueron descargadas al 100%. La energía total que maneja la muestra cuatro es de 0.031 Kg/cm².

Tabla 18 Datos energía Muestra 4

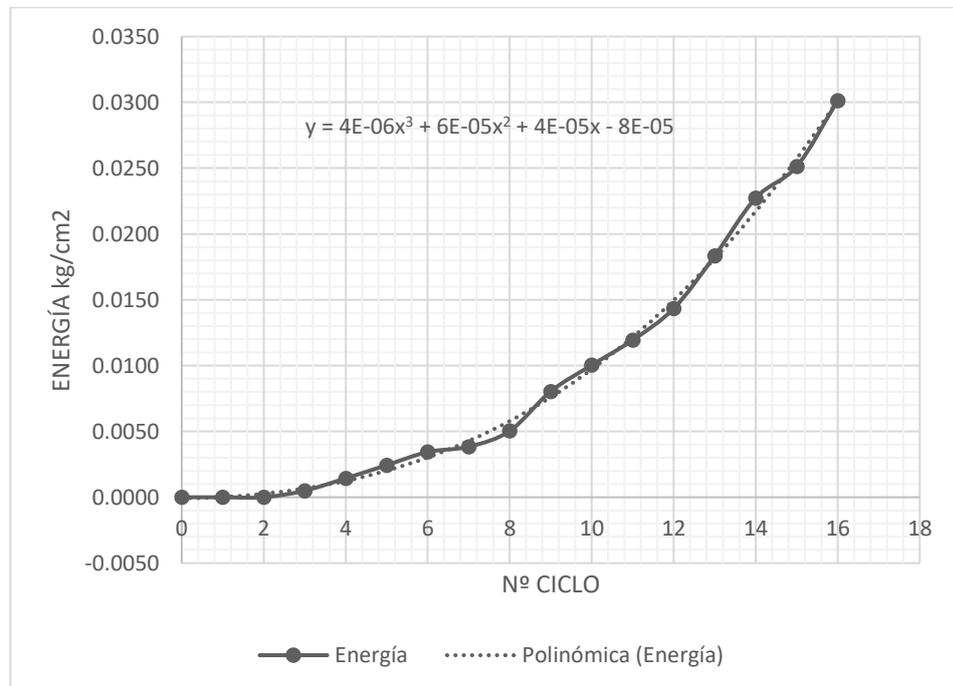
| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|---------------|-------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| 1 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 0.0000 | 0.0000 |
| 3 | 0.0005 | 0.0005 |
| 4 | 0.0009 | 0.0014 |
| 5 | 0.0010 | 0.0024 |
| 6 | 0.0010 | 0.0034 |
| 7 | 0.0004 | 0.0038 |
| 8 | 0.0012 | 0.0050 |
| 9 | 0.0030 | 0.0080 |
| 10 | 0.0020 | 0.0100 |
| 11 | 0.0019 | 0.0119 |

Continuación tabla 18

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO kg/cm2 | ENERGIA ACOMULADA kg/cm2 |
|----------|-------------------------|-----------------------------|
| 12 | 0.0024 | 0.0143 |
| 13 | 0.0040 | 0.0183 |
| 14 | 0.0044 | 0.0227 |
| 15 | 0.0024 | 0.0251 |
| 16 | 0.0050 | 0.0301 |

Fuente: propia

Gráfica 23 Curva de energía muestra 4



Fuente: propia

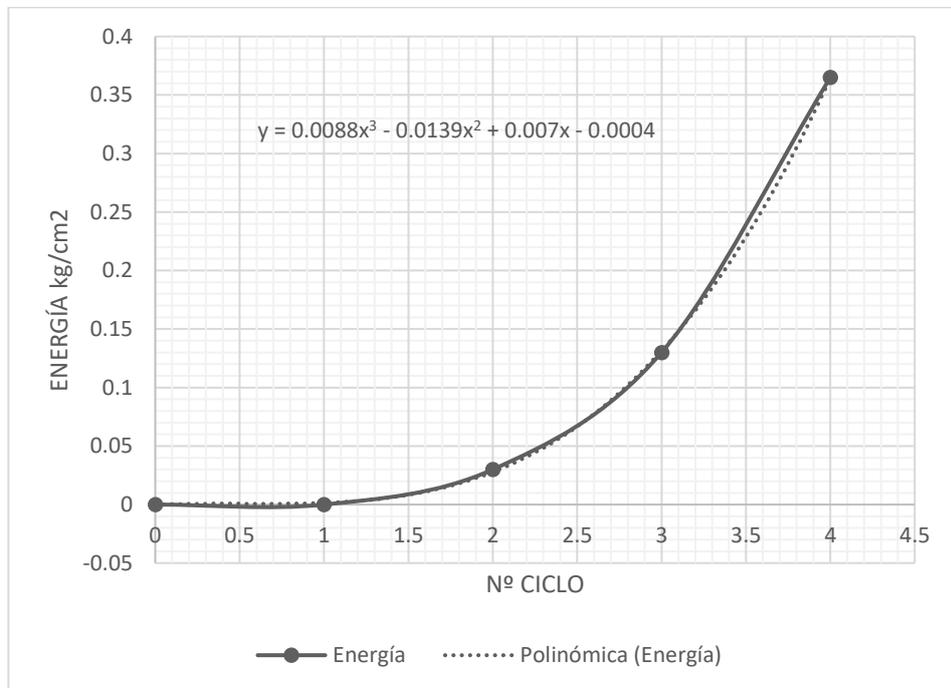
En la *tabla 19* se muestra el valor de la energía en cada ciclo, se observa que cada vez avanza el ciclo la energía aumenta, y en la *gráfica 24* se analiza el comportamiento de la energía de acuerdo al ciclo mostrando así la existencia de una relación directamente proporcional ya que cada vez que aumenta el ciclo aumenta la energía. La energía total de la muestra 6 fue de 0.365 Kg/cm².

Tabla 19 Datos energía Muestra 6

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|---------------|-------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0.03 | 0.03 |
| 3 | 0.1 | 0.13 |
| 4 | 0.235 | 0.365 |

Fuente: propia

Gráfica 24 Curva de energía muestra 6



Fuente: propia

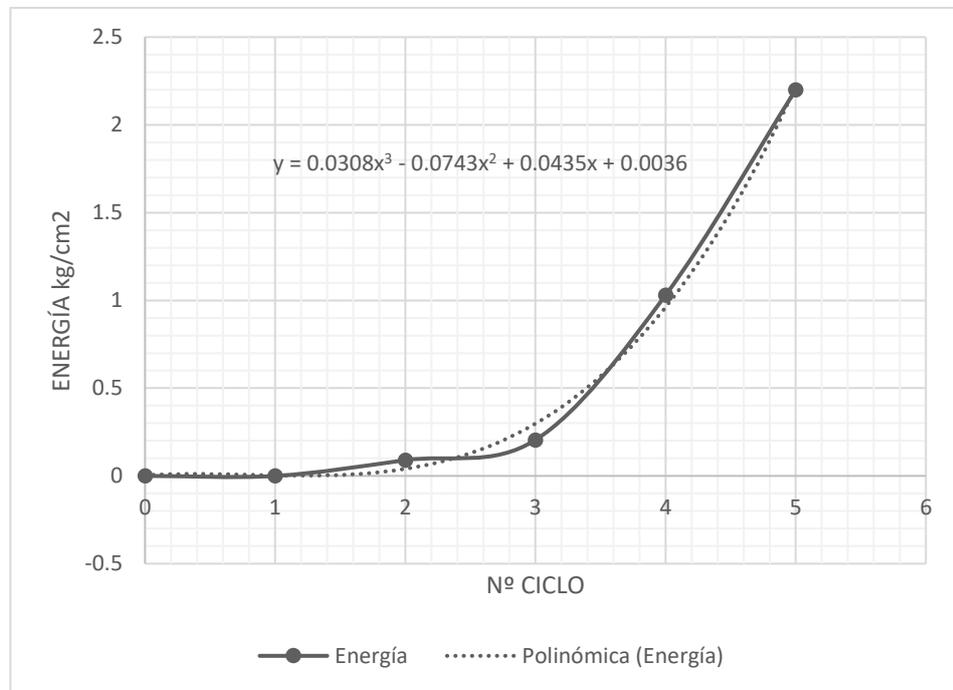
En la *tabla 20* se muestra el valor de la energía en cada ciclo, se observa que cada vez avanza el ciclo la energía aumenta, y en la *gráfica 25* se analiza el comportamiento de la energía de acuerdo al ciclo mostrando así la existencia de una relación directamente proporcional ya que cada vez que aumenta el ciclo aumenta la energía. La energía total de la muestra 6 fue de 2.2 Kg/cm².

Tabla 20 Datos energía Muestra 7

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|---------------|-------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0.09 | 0.09 |
| 3 | 0.115 | 0.205 |
| 4 | 0.825 | 1.03 |
| 5 | 1.17 | 2.2 |

Fuente: propia

Gráfica 25 Curva de energía muestra 7



Fuente: propia

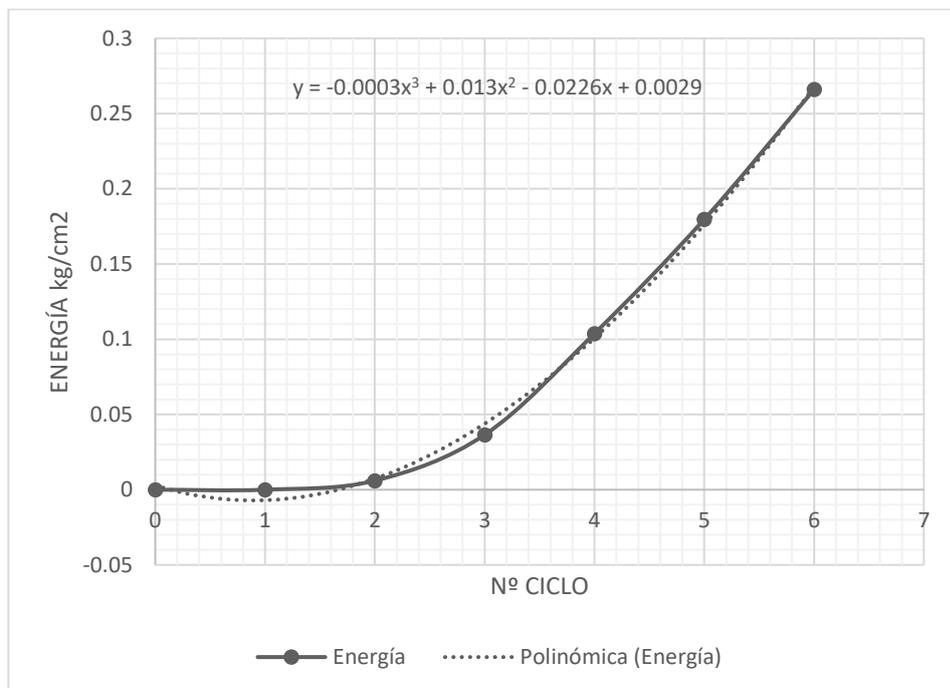
En la *tabla 21* se muestra el valor de la energía en cada ciclo, se observa que cada vez avanza el ciclo la energía aumenta, y en la *gráfica 26* se analiza el comportamiento de la energía de acuerdo al ciclo mostrando así la existencia de una relación directamente proporcional ya que cada vez que aumenta el ciclo aumenta la energía. La energía total de la muestra 6 fue de 2.2 Kg/cm².

Tabla 21 Datos energía Muestra 9

| Nº CICLO | ENERGIA CICLO | ENERGIA ACOMULADA |
|----------|------------------|----------------------|
| | kg/cm2 | kg/cm2 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0.006 | 0.006 |
| 3 | 0.0305 | 0.0365 |
| 4 | 0.0673 | 0.1038 |
| 5 | 0.0759 | 0.1797 |
| 6 | 0.0863 | 0.266 |

Fuente: propia

Gráfica 26 Curva de energía muestra 9

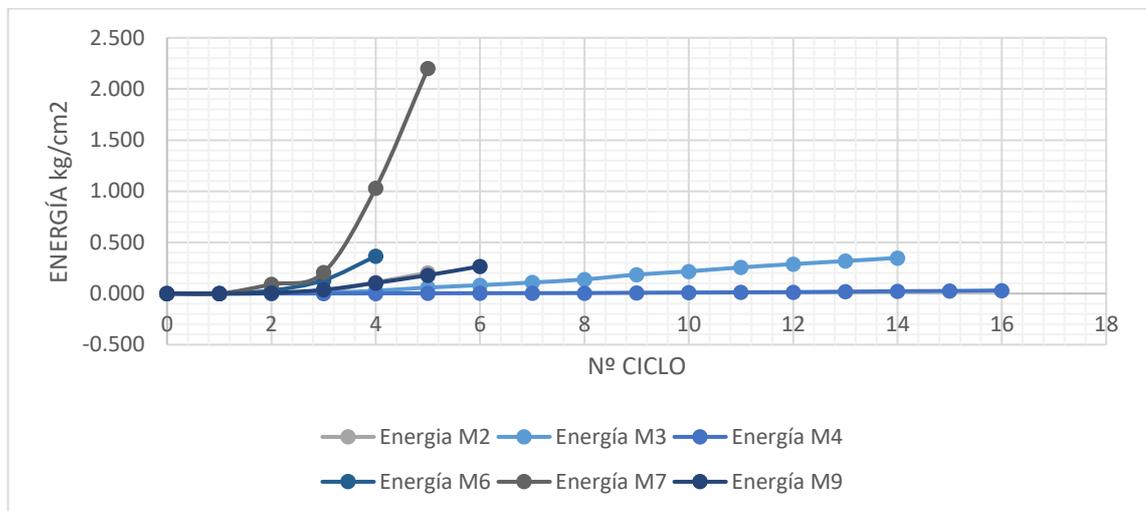


Fuente: propia

7.3.1. Análisis general de la variación de energía en función de los ciclos de carga.

En la *Gráfica 27* se observa la energía acumulada de cada muestra ensayada, de ella se deduce que la energía a medida que aumenta el ciclo tiende a aumentar, también se observó que la energía que maneja el ensayo de compresión cíclico que se carga y se descarga al 50% tiende a ser menor debido que el ciclo es más corto que las demás.

Gráfica 27 Comparación de la energía acumulada de las muestras.



Fuente: propia

7.4. ANÁLISIS DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN.

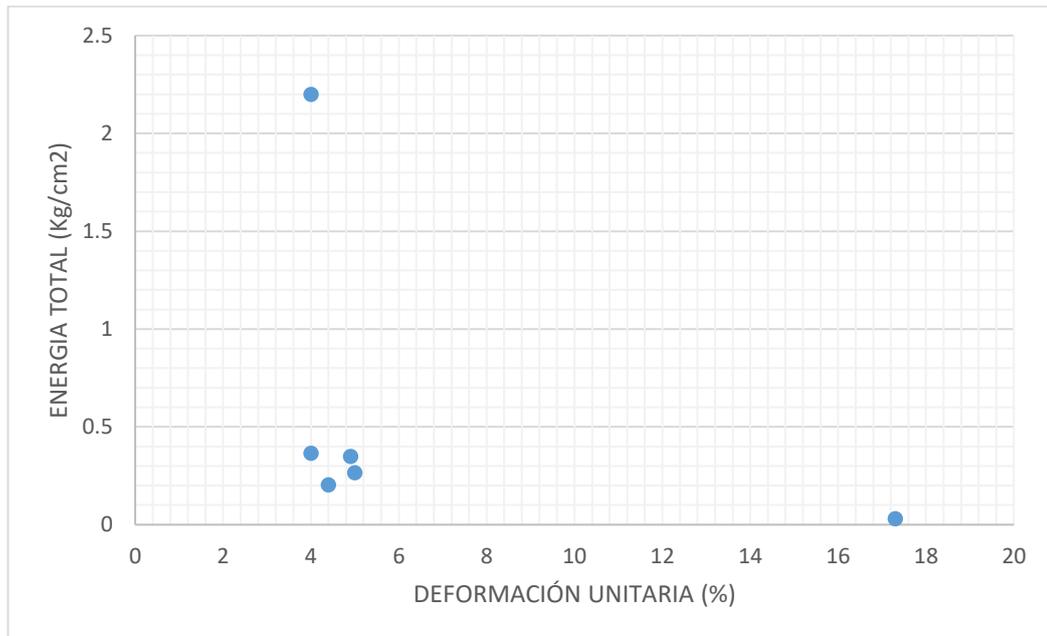
En la *Gráfica 28* se observa la energía total Vs la deformación unitaria máxima se observa que las muestras 2, 3, 6 y 9 se encuentran entre intervalos de energía de 0.203 – 0.365 Kg/cm² y deformaciones máximas entre 4 – 5 %, la muestra cuatro la cual tiene ciclos de carga y descarga al 50% presenta el menor valor de energía y la mayor deformación, y la muestra 7 presenta el valor más alto de energía a una deformación de 4%. De esta grafica se concluye que no necesariamente a mayor deformación unitaria en el ensayo de compresión confinada cíclico habrá mayor energía acumulada.

Tabla 22 Datos deformación unitaria máxima y energía total

| CICLO | DEFORMACION UNITARIA (%) | ENERGIA TOTAL (kg/cm2) |
|-------|--------------------------|------------------------|
| 2 | 4.4 | 0.203 |
| 3 | 4.9 | 0.348 |
| 4 | 17.3 | 0.0301 |
| 6 | 4 | 0.365 |
| 7 | 4 | 2.2 |
| 9 | 5 | 0.266 |

Fuente: propia

Gráfica 28 Energía total Vs deformación unitaria.



Fuente: propia

8. CONCLUSIONES

Se establecen las propiedades y características obtenidas en los ensayos de laboratorio, donde se concluye, que las muestras corresponden a un suelo arcilloso con presencia de limos de la ciudad de Bogotá.

Se comparó la magnitud del módulo de elasticidad $E_{50\%}$ en diferentes estados de carga mediante el ensayo de compresión inconfiada cíclica en laboratorio, donde se concluye que los módulos se comportan de manera ascendente mostrado durante cada ciclo de carga. Llegando así a no recuperar su forma el suelo y llevando la muestra a su máxima capacidad de carga.

Se analizó el comportamiento de la energía en función de los ciclos de carga cíclica sometidos a una descarga al 50% como evidencia en la *gráfica 6* hallando un comportamiento en la energía diferente a las muestras que se descargaron al 100% mostrando una energía en cada ciclo menor llegando así a disminuir la cantidad de energía acumulada que puede soportar el suelo llegando a la falla.

Mediante las curvas de energía obtenidas por cada una de las muestras se logra observar la cantidad de energía que puede soportar el suelo mostrado en la *gráfica 28* concluyendo que el suelo estudiado acumula una energía de 0 a 0,5 Kg/cm² para llegar a la falla mediante los ciclos de carga realizados en laboratorio.

El ensayo de compresión inconfiada cíclica, al ser un ensayo no normalizado presenta dificultad para encontrar referencias específicas sobre el tema, en esta investigación se incluyeron los antecedentes con las aplicaciones que más se acercaban al comportamiento del material.

9. RECOMENDACIONES

La extracción y el transporte de las muestras se deben realizar de la manera adecuada para no modificar sus propiedades y sigan siendo muestras inalteradas.

La velocidad aplicada al ensayo de compresión inconfiada debe ser la misma que se aplica en el ensayo de compresión inconfiada cíclica, para así no verse alterados los datos del ensayo.

Continuar esta investigación con otro grupo de muestras, para verificar el comportamiento de los valores que arrojaron los resultados además de realizar la comparación con muestras inalteradas y saturadas.

10. BIBLIOGRAFIA

ANGELONE, Silvia. Tipos de suelos: arcillas. [En línea]. Disponible en: http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Tipos%20de%20suelos_2007.pdf

ÁVILA, Guillermo. Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento. [En línea]. Agencia de noticias UN. Bogotá D.C. 2012. Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>

CHAMBI, Mamani. Ensayo de compresión confinada .slideshare LinkedIn. 2012. Disponible en: <http://es.slideshare.net/JorgeVizneyChambiMamani/30512569-informeens-ayodecompresionsimple>

DEL VECCHIO, F.J.C, REIS, J.M.L, y DA COSTA MATTOS, H.S. Elasto-viscoplastic behaviour of polyester polymer mortars under monotonic and cyclic compression.2014. En: Polymer Testing. Vol. 35. Disponible en: <http://ugc.elogim.com:2054/science/article/pii/S0142941814000440>

ESTUDIOS GEOTECNICOS. Descriptores geotécnicos (6): clasificación del suelo. [En línea]. Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-6-clasificacion-de-suelos/>

ESTUDIOS GEOTECNICOS. Descriptores geotécnicos (5): plasticidad límites de Atterberg y consistencia. [En línea]. Disponible en: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

GALINDO, Rubén, ÁNGEL. Aires. Comportamiento del suelo ante cargas cíclicas .Revista digital. Lampsaros.2013. Disponible en: <http://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/933>

GONZÁLEZ G. Álvaro. Comportamiento de excavaciones y métodos de análisis. En: Primer Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras –Escuela Colombiana de Ingeniería.4 – 6 septiembre de 1991. Disponible en: <http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros->

suelosyestructuras/documentos/1_encuentro/comportamiento_excavaciones_m
etodos_analisis.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Compresión inconfiada en muestras de
suelos. Bogotá, (I.N.V. E- 152-13). 2013.

JARDIN PLANTAS. El suelo arcilloso. [En línea]. Disponible en:
<http://jardinplantas.com/el-suelo-arcilloso/#ixzz4YrdxYH64>

LEE, Woojin, BOHRA N.C., ALTSCHAEFFI, A.G. and WHITE, T.D., (1995).
"Resilient Modulus of Cohesive Soils". Journal of Geotechnical and
Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 2., pp. 131-135.

LIANG, Fenglin, SAUCEAU, Martial, DUSSERE, Gilles y ARLABOSSE,
Patricia. A uniaxial cyclic compression method for characterizing the rheological
and textural behaviors of mechanically dewatered sewage sludge. En: Water
Research. 2017. Vol. 133. Pag 171-180. Disponible en:
<http://ugc.elogim.com:2054/science/article/pii/S0043135417300830>

MECÁNICA DE SUELOS FESAR. Exploración y muestreo. [En línea]. [Citado 16
feb. 2017]. Disponible en:
[http://mecanicadesuelosfesar.blogspot.com.co/2012/06/practica-1-exploracion-
y-muestreo.html](http://mecanicadesuelosfesar.blogspot.com.co/2012/06/practica-1-exploracion-y-muestreo.html)

SAS, Wojciechx, GŁUCHOWSKI Andrzej y SZYMAŃSKI , Alojzy. Determination
of the resilient modulus MR for de lime stabilized clay obtained from the repeated
loading CBR test. 2012. Annal of Warsaw University of Life Sciences – SGGW.
Land reclamation N° 44. Pag 143-153

SOCIALHIZO. Bogotá: Descripción geográfica. [En línea]. Disponible en:
[http://www.socialhizo.com/entretenimiento/turismo-al-dia/bogota-descripcion-
geografica](http://www.socialhizo.com/entretenimiento/turismo-al-dia/bogota-descripcion-geografica)

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. Teoría de la energía de la deformación. [En
línea]. Disponible en:
[http://www.josemec.mex.tl/images/5147/ENERGIA%20DE%20DEFORMACION
.pdf](http://www.josemec.mex.tl/images/5147/ENERGIA%20DE%20DEFORMACION.pdf)

ANEXOS

ANEXO A – DATOS ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

ANEXO B – DATOS GRAFICAS ESFUERZO Vs DEFORMACIÓN

**ANEXO C – PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN CÍCLICA
DE CARGA Y DESCARGA**

ANEXO D – REGISTRO FOTOGRAFICO.