

**EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO EN CICLOS  
DE SECADO Y HUMEDECIMIENTO: PARTE I Y TRIAXIAL ESTÁTICO**

**JOSÉ ANÍBAL SUÁREZ ROJAS  
JUAN DAVID SILVA GUTIERREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO EN CICLOS  
DE SECADO Y HUMEDECIMIENTO: PARTE I Y TRIAXIAL ESTÁTICO**

**JOSÉ ANÍBAL SUÁREZ ROJAS  
JUAN DAVID SILVA GUTIERREZ**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO  
Ph D. en Geomecanica Computacional**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A Dios y la vida por permitirme conseguir este título, a mi padre, a mi madre y hermana quienes fueron mi mayor soporte durante este proceso y siempre creyeron en mí. A ellos, principalmente gracias.

A Música y Danzas UIS por brindarme tantos momentos gratos y divertidos, y a mis compañeros con quienes compartí y viví experiencias imborrables.

*José Aníbal Suárez*

*Dedico de manera muy especial este trabajo de grado a mis padres, que desde siempre con mucho esfuerzo me han brindado el apoyo necesario, el ejemplo suficiente y su guía para alcanzar mis metas; a ustedes mil y mil gracias.*

*Juan David silva*

## CONTENIDO

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN .....   | 15          |
| 1. OBJETIVOS.....  | 17          |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....   | 17          |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 17          |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE PRUEBA. ....  | 18          |
| 2.1 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA.....   | 18          |
| 2.2 DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG O DE<br>CONSISTENCIA (LÍQUIDO Y PLÁSTICO) .....                  | 19          |
| 2.3 DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES DE HUMEDAD – MASA<br>UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (PROCTOR MODIFICADO)..... | 20          |
| 2.4 COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO TRIAXIAL.....  | 23          |
| 2.5 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE SECADO Y HUMEDECIMIENTO. ....  | 28          |
| 2.6 DESARROLLO DEL ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO.....   | 30          |
| 2.6.1 Montaje y preparación de la probeta.....   | 30          |
| 2.6.2 Saturación de la muestra .....   | 32          |
| 2.6.4 Fallo del espécimen .....  | 33          |
| 3. RESULTADOS.....   | 34          |
| 3.1 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN.....   | 34          |
| 3.2 PRESIÓN DE POROS VS DEFORMACIÓN .....  | 37          |
| 4. CONCLUSIONES. ....  | 40          |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 5. RECOMENDACIONES..... | 42 |
| BIBLIOGRAFÍA.....       | 43 |
| ANEXOS.....             | 44 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Punto extracción de la muestra de suelo. ....  | 18          |
| Figura 2. Carta de plasticidad casa grande. ....   | 20          |
| Figura 3. Molde de compactación para Proctor modificado. ....  | 20          |
| Figura 4. Gráfica de densidad seca vs % de humedad real. ....  | 22          |
| Figura 5. Molde utilizado para la compactación de las muestras a ensayar. ....   | 25          |
| Figura 6. Cilindros de suelo compactados en el molde de la figura 4. ....  | 28          |
| Figura 7. Proceso de humedecimiento. ....  | 30          |
| Figura 8. Preparación de la muestra de suelo con las dimensiones requeridas por la cámara de la máquina Triaxial. .... | 31          |
| Figura 9. Probeta montada en la cámara de ensayo. ....   | 31          |
| Figura 10. Curva de esfuerzo vs deformación unitarial. ....  | 34          |
| Figura 11. Modulo tangente de deformación. ....  | 35          |
| Figura 12. Probeta con humedad óptima de compactación después del ensayo triaxial. ....                                | 36          |
| Figura 13. Probeta con pérdida de humedad (más seca) después del ensayo triaxial. ....                                 | 36          |
| Figura 14. Probeta con ciclo de secado y humedecimiento después del ensayo triaxial. ....                              | 37          |
| Figura 15. Curva de la presión de poros vs deformación durante la etapa de falla. ....                                 | 37          |
| Figura 16. Curva presión de poros normalizada durante la etapa de falla. ....  | 38          |

## LISTA DE TABLAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1. Porcentajes de gravas, arenas y finos presentes en el material. .... | 19          |
| Tabla 2. Contenido de agua, Límites obtenidos.....                            | 19          |
| Tabla 3. Humedades del ensayo Proctor modificado.....                         | 21          |
| Tabla 4. Densidades del ensayo Proctor modificado. ....                       | 22          |
| Tabla 5. Energías de compactación.....  | 26          |

## LISTA DE ANEXOS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Anexo 1. Granulometría.....  | 44          |
| Anexo 2. Porcentajes de muestra de suelo acumulado.....                                  | 45          |
| Anexo 3. Grafica de porcentajes de suelo que pasan por el tamiz. ....                    | 46          |
| Anexo 4. Tabla límite líquido.....   | 47          |
| Anexo 5. Tabla de cálculo de contenido de agua. ....                                     | 48          |
| Anexo 6. Grafica del límite líquido de suelo con regresión lineal. ....                  | 49          |
| Anexo 7. Contenido de agua para 25 golpes según la curva ajustada en la<br>gráfica. .... | 50          |
| Anexo 8. Tabla de límite plástico. ....  | 51          |
| Anexo 9. Índice de plasticidad. ....   | 52          |
| Anexo 10. Carta de plasticidad. Clasificación del suelo. ....                            | 53          |
| Anexo 11. Proctor modificado. ....   | 54          |
| Anexo 12. Tabla de humedades; dos por cada punto.....                                    | 55          |
| Anexo 13. Gráfica humedad óptima de compactación Vs densidad seca del<br>suelo. ....     | 56          |
| Anexo 14. Energía de compactación. ....  | 58          |
| Anexo 15. Datos de compactación para las probetas elaboradas en el<br>laboratorio. ....  | 60          |
| Anexo 16. Humedad óptima de compactación de las probetas.....                            | 61          |
| Anexo 17. Ecuación para el cálculo de la humedad de las probetas. ....                   | 63          |
| Anexo 18. Humedad natural del suelo. ....  | 64          |
| Anexo 19. Datos de las muestras de suelo sometidas al ciclo de secado. ....              | 65          |
| Anexo 20. Secado de las muestras. ....   | 66          |
| Anexo 21. Gráfica de pérdida de humedad de las probetas. ....                            | 67          |

|   |    |
|---|----|
| Anexo 22. Gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria de la primera probeta (con humedad del 13.5%).  | 68 |
| Anexo 23. Gráfica de presión de poros vs deformación unitaria de la primera probeta (con humedad del 13.5%) durante la etapa de falla.              | 69 |
| Anexo 24. Gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria de la segunda probeta (con humedad del 7.5%).   | 70 |
| Anexo 25. Gráfica de presión de poros vs deformación de la segunda probeta (con humedad del 7.5%) durante la etapa de falla.                        | 71 |
| Anexo 26. Gráfica de esfuerzo vs deformación de la tercera probeta (sometida a ciclo de secado y humedecimiento).                                   | 72 |
| Anexo 27. Gráfica de presión de poros vs deformación de la tercera probeta (sometida a ciclo de secado y humedecimiento) durante la etapa de falla. | 73 |
| Anexo 28. Gráfica de esfuerzo vs deformación para los tres especímenes.   | 74 |
| Anexo 29. Gráfica de presión de poros vs deformación unitaria para los tres especímenes durante la etapa de falla.                                  | 75 |
| Anexo 30. Datos del ensayo triaxial para la primera probeta (con humedad óptima del 13.5%).   | 76 |
| Anexo 31. Datos del ensayo triaxial para la segunda probeta (ciclo seco: humedad del 7.5%).   | 77 |
| Anexo 32. Datos del ensayo triaxial para la tercera probeta (ciclo seco-húmedo).  | 78 |
| Anexo 33. Gráfica modulo tangente esfuerzo deformación.   | 79 |
| Anexo 34. Gráfica Esfuerzo de presión de poros normalizada durante la etapa de falla.   | 80 |

## RESUMEN

**Título:** Evolución de las propiedades mecánicas de un suelo en ciclos de secado y humedecimiento: Parte I y Triaxial estático\*.

**Autor:** José Aníbal Suárez Rojas  
Juan David Silva Gutiérrez\*\*

**Palabras Clave:** Ciclo climático, Ensayo Triaxial Estático, Propiedades mecánicas, Muestras compactadas.

### Descripción:

Debido al comportamiento del ciclo climático en Colombia, especialmente en la región andina donde se presenta de forma bimodal, es decir, que oscila entre lluvias y sequías intercaladas anualmente, es de esperarse que las propiedades mecánicas de los suelos cambien en diferentes épocas de acuerdo a su nivel de humedad. Dicha variación en el clima causa una serie de ciclos de secado y humedecimiento en la masa de suelo que pueden llegar a provocar cambios en el comportamiento mecánico de los mismos. Esta investigación tiene como fin analizar la evolución de las propiedades mecánicas de un suelo sometido a un ciclo de secado y humedecimiento inducido en el laboratorio por medio de un ensayo Triaxial Estático consolidado no drenado (CU) de una muestra de suelo extraída dentro de las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander. El ensayo Triaxial fue aplicado a un total de tres probetas compactadas mecánicamente por método proctor modificado y a la humedad óptima. El primer ensayo fue a la probeta de control (i.e., probeta con humedad óptima). El segundo ensayo fue de una probeta expuesta a un período de secado, la cual perdió cerca del 50% de la humedad óptima. El tercer ensayo fue de una probeta con un ciclo completo de secado y humedecimiento. Finalmente, se procesaron y analizaron los datos obtenidos para cada una de las muestras en sus diferentes estados.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph D. Jorge Alejandro Mendoza Rizo

## ABSTRACT

**Title:** Evolution of the mechanical properties of a soil in drying and wetting cycles: Part I and Static Triaxial \*.

**Authors:** José Aníbal Suárez Rojas  
Juan David Silva Gutiérrez\*\*

**Key Word:** Climatic cycle, Triaxial Static test, Mechanical Properties, Compacted samples.

### Description:

Due to the behavior of the climatic cycle in Colombia, especially in the Andina region where it occurs bimodally, that is to say, which goes from rain to draught seasons every year, it is expected that the mechanical properties of soils vary through time depending on their water content. This variation in the weather causes a sequence of drying and wetting cycles in the soil that can cause changes in its mechanical behavior. The purpose of this research is to analyze the evolution of mechanical properties of a soil sample subjected to one induced drying and wetting cycle which was extracted from the Universidad Industrial de Santander facilities using the Triaxial apparatus. The Triaxial tests were performed to three specimens compacted to their optimum water using the modified proctor compaction test. The control sample (i.e., optimum water content sample) was test first. Then, the second test was performed to a sample subjected to a drying period in which its water content decreased almost half compared to its optimum. The third test was the sample which was subjected to a drying and wetting cycle. Finally, the data obtained for each of the samples in their different states were processed and analyze.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph D. Jorge Alejandro Mendoza Rizo

## INTRODUCCIÓN

Colombia tiene regímenes de precipitación y de variabilidad climática muy significativos a lo largo y ancho del país, especialmente en nuestra región (región andina o centro del país) en donde dichos regímenes de precipitación tienen una tendencia bimodal, es decir presencia de dos periodos de lluvia a lo largo del año y dos periodos secos, esto provoca una serie de ciclos de secado y humedecimiento inducidos naturalmente en la masa de suelo. Este fenómeno bimodal no se presenta de manera regular con el paso del tiempo, o, dicho de otra forma, no se tiene periodos de ocurrencia estandarizados; por el contrario, cada año se ve afectado por fenómenos de gran importancia como el del NIÑO o la NIÑA, en cuya presencia se aprecian grandes cambios en la temperatura y humedad generando lluvias y sequías extremas. En consecuencia, es conveniente estudiar los cambios que se generan en las propiedades mecánicas de los suelos expuestos a dichos ciclos y qué tan nocivos son para el desarrollo y ejecución de proyectos ingenieriles<sup>1</sup>.

La durabilidad de la masa de suelo puede definirse como la capacidad de los materiales para conservar su estabilidad e integridad y mantener una resistencia residual adecuada a largo plazo para proporcionar resistencia suficiente a las condiciones climáticas (Dempsey y Thompson, 1968). Además de las propiedades mecánicas y mineralógicas del suelo, la durabilidad en condiciones climáticas severas, como lo es la exposición a largos periodos de humedad y posteriormente a periodos similares de sequía, es un parámetro vital para evaluar in situ el uso del suelo como material de construcción. Las condiciones climáticas, manifestadas como ciclos de secado y humedecimiento, se consideran una de las acciones más

---

<sup>1</sup> GARCÍA M., “Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia,” Volumen 36, Transcripción de la conferencia llevada a cabo en el foro “hidrología de extremos y cambio climático” realizado en la universidad de los andes, (18 de octubre de 2012); p 60-64

destructivas que pueden provocar daños a infraestructuras como autopistas, pavimentos (Allam y Sridharan, 1981) y otras estructuras geotécnicas. Durante estos ciclos, la mayoría de las propiedades mecánicas de los suelos, especialmente su resistencia, se ven gravemente afectadas<sup>2</sup>.

En este contexto, es preciso pensar que las propiedades mecánicas del suelo están sujetas a evolucionar debido a los cambios climáticos los cuales como se ha expresado anteriormente provocan directamente ciclos naturales de secado y humedecimiento en estos, aunque no se tiene claridad en qué proporción, por lo cual en esta investigación se ha sometido un suelo previamente compactado a un ciclo de secado y humedecimiento en un intento por simular el posible escenario al cual se expone, cuando sobre este actúan las variaciones del clima.

El ensayo Triaxial Estático permite obtener datos específicos y puntuales sobre el comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo. *“La prueba de ensayo Triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al cortante.”* (Oscar Valerio, Ensayos Triaxiales para suelos)<sup>3</sup>. Hay diferentes tipos de ensayos Triaxiales dentro de los cuales está el ensayo consolidado no drenado (CU) siendo esta una prueba rápida que no permite alguna consolidación adicional durante el periodo de falla donde se aplica la carga axial. Además, *“El ensayo CU (consolidado-no drenado) se realiza generalmente con medición de la presión de poros o neutra con el fin de determinar los parámetros de “C” y “φ” en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.”* (Oscar Valerio, Ensayos Triaxiales para suelos)<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> ALDAOOD.A and BOUASKER M. and AL-MUKHTAR M., “Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils,” En: Engineering Geology, Volumen 174 (23 de mayo 2014); p11-21

<sup>3</sup> VALERIO Oscar, “Ensayos triaxiales para suelos.” Disponible en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13369/8391-11758-1-SM.pdf?sequence=1> [citado 15 de Enero de 2018]

<sup>4</sup> Ibíd.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la evolución de las propiedades mecánicas del suelo expuesto a un ciclo de secado y humedecimiento, aplicando el ensayo triaxial estático.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar un protocolo de secado y humedecimiento.
- Diseñar y desarrollar ensayos de corte con la máquina triaxial estática, sobre una muestra de suelo compactada para cada ciclo.
- Analizar la evolución de los resultados obtenidos bajo las diferentes condiciones de secado y humedecimiento

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE PRUEBA.

El terreno del cual se obtuvieron las muestras alteradas de suelo se ubica en Bucaramanga (Santander), más exactamente dentro del campus de la Universidad Industrial de Santander; el apique para la extracción se realizó en la zona aledaña de las residencias universitarias entre los 50 y 70 cm de profundidad, teniendo en cuenta los lineamientos de la I.N.V E – 101 – 2007.

**Figura 1. Punto extracción de la muestra de suelo.**



Se almacenó la muestra durante un tiempo cercano a 15 días en un lugar seco y a temperatura ambiente para posteriormente seguir con la caracterización de esta.

### 2.1 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA

Para clasificar la muestra de suelos de acuerdo con su tamaño en gravas, arenas y finos (Ver tabla 1). Se empleó el ensayo de granulometría mecánica mediante el uso de tamices, procedimiento realizado siguiendo los lineamientos presentes en las normas INVE 107-2007 y la norma INV-E123-2007. (Ver anexo 1, anexo 2 y anexo3)

**Tabla 1. Porcentajes de gravas, arenas y finos presentes en el material.**

| <b>Material</b> | <b>Porcentaje %</b> |
|-----------------|---------------------|
| <b>Gravas</b>   | 0,24                |
| <b>Arenas</b>   | 45,69               |
| <b>Finos</b>    | 54,07               |

## **2.2 DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG O DE CONSISTENCIA (LÍQUIDO Y PLÁSTICO)**

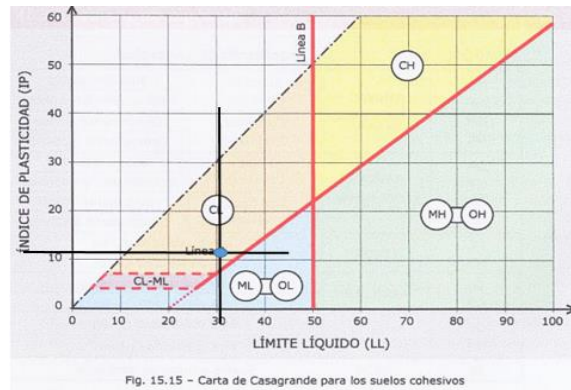
Los límites de Atterberg consisten en determinar el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), y el índice de plasticidad (IP) (ver tabla 2). El ensayo fue ejecutado siguiendo los lineamientos presentes en las normas INV-E 125-2007 y INV-E 126-2007. (Ver anexos del 4 al 10 consecutivamente).

**Tabla 2. Contenido de agua, Límites obtenidos.**

| <b>LÍMITES</b>               | <b>% Agua</b> |
|------------------------------|---------------|
| <b>LÍMITE LÍQUIDO</b>        | 30,52         |
| <b>LÍMITE PLÁSTICO</b>       | 18,49         |
| <b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD</b> | 12,03         |

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos anteriores, se clasifica el suelo como una **arcilla de baja compresibilidad (CL)**, teniendo en cuenta la carta de plasticidad (ver figura 2) y que el porcentaje de finos supera el 50 % del total de la muestra analizada.

**Figura 2. Carta de plasticidad casa grande.**



### **2.3 DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (PROCTOR MODIFICADO)**

El siguiente método de ensayo se utilizó para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en un molde de un tamaño determinado (ver figura 3) con un martillo de 4.57 kg que cae desde una altura de 457 mm, teniendo en cuenta los parámetros y lineamientos expuestos en la norma INV-E 141-2007.

**Figura 3. Molde de compactación para Proctor modificado.**



Las principales características de la compactación en los suelos es que a causa de esta se reduce el porcentaje de vacíos y mejora sus propiedades mecánicas como: la resistencia al corte, la compresibilidad y el potencial de expansión, se llevan a cabo diferentes procedimientos para compactar un suelo, logrando conseguir una estructura de máxima densidad que tenga la capacidad de presentar deformaciones mínimas cuando esta sea sometida a diferentes cargas<sup>5</sup>.

Cuando se desarrolló el ensayo la muestra estuvo almacenada alrededor de 20 días haciéndose evidente a simple vista una pérdida significativa de la humedad. Para cada punto de compactación se tomaron 2500 gr de material, adicionando al primer punto 200 ml de agua tomando en cuenta que la muestra estaba considerablemente seca, luego se adicionaron 50 ml más al siguiente punto y de esta forma para los puntos restantes. En total se concibieron 4 puntos (ver tabla 3) y por consiguiente se halló la humedad y densidad propias de cada uno estos (ver anexo11).

**Tabla 3. Humedades del ensayo Proctor modificado.**

| <b>Punto</b> | <b>HUMEDAD APARENTE (ml)</b> | <b>HUMEDAD REAL W (%)</b> |
|--------------|------------------------------|---------------------------|
| <b>1</b>     | 200                          | 10,42                     |
| <b>2</b>     | 250                          | 13,00                     |
| <b>3</b>     | 300                          | 15,05                     |
| <b>4</b>     | 350                          | 16,37                     |

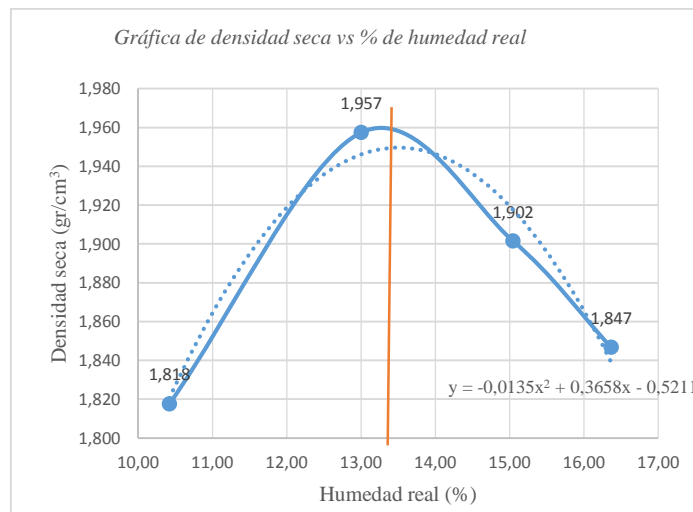
---

<sup>5</sup> CAMACHO J., REYES O., MÉNDEZ D., “Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor,” Volumen 17, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, diciembre 2007, p 67-81

**Tabla 4. Densidades del ensayo Proctor modificado.**

| Punto | DENSIDAD HUMEDA (gr/cm <sup>3</sup> ) | DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1     | 2,007                                 | 1,818                               |
| 2     | 2,212                                 | 1,957                               |
| 3     | 2,188                                 | 1,902                               |
| 4     | 2,149                                 | 1,847                               |

**Figura 4. Gráfica de densidad seca vs % de humedad real.**



Con la relación entre la densidad seca y el porcentaje de humedad propias de cada punto de compactación se construyó un gráfico (ver figura 4) del cual se obtuvo una regresión ajustada a la curva (ver anexo 13) con una ecuación tal que:

$$y = -0,0135x^2 + 0,3658x - 0,5211 \quad (1)$$

Donde:

y = Densidad seca (gr/cm<sup>3</sup>)

x = Humedad (%)

Derivando la ecuación (1) e igualando ésta a cero se obtiene el máximo punto de inflexión de la curva, el cual teóricamente será el porcentaje de humedad óptimo del material, entonces:

$$y' = -0.027x + 0.3658 \quad (2)$$

$$y' = 0$$

$$0 = -0.027x + 0.3658$$

Luego,

$$x = 13.548 \%$$

Con este proceso se tiene que la humedad óptima propia del material es de más o menos de 13.5 %, con la que a su vez puede hallarse la densidad seca máxima teórica del material reemplazando el valor x en la ecuación (1), así:

$$y = -0.0135(13.548)^2 + 0.3658(13.548) - 0.5211$$

$$y = 1.95 \text{ gr/cm}^3$$

Así obtenemos una densidad seca máxima teórica de  $1.95 \text{ gr/cm}^3$ .

En teoría, la muestra de suelo en estudio logra su mayor desempeño mecánico con un porcentaje de humedad alrededor del 13.5% y una densidad seca máxima que ronda en  $1.9 \text{ gr/cm}^3$ .

## **2.4 COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO TRIAXIAL**

Para la compactación de las probetas cilíndricas destinadas al ensayo Triaxial era necesario conocer el porcentaje de humedad óptima y la densidad seca máxima,

parámetros que en teoría aumentan o enriquecen las propiedades mecánicas del suelo expuesto a diferentes tipos de carga, puesto que para este estudio es indispensable que las probetas obtuvieran propiedades mecánicas óptimas y para ello se compactaron con el método de proctor modificado.

Antes de iniciar la compactación de las probetas necesarias para el desarrollo de la investigación, era de gran importancia en este caso conocer la humedad natural del material almacenado; para tal proceso se tomó como referencia los lineamientos descritos en la INV-E 122-07 obteniendo como resultado un porcentaje de humedad natural de 3.65% en volumen.

Como paso siguiente se utilizó un molde cilíndrico con dimensiones en el diámetro interno de 8 cm y altura 150 mm (ver figura 5), por dichas medidas fue adecuado para que fuera posible emplear en la compactación del material el mismo martillo que se usó en el ensayo de proctor, si se tiene en cuenta que las probetas se compactarían con una energía igual a la que se compactó el suelo en el ensayo de proctor, mediante la ecuación de energía de compactación (ecuación 3), donde se mantuvo constante la energía de compactación, el número de capas, peso del martillo, altura de caída del martillo, y el volumen que por obvias razones cambiaba pero era un valor conocido de  $753.98\text{cm}^3$ , en función de estos parámetros se encontró el número de golpes necesario por capa (ver anexo 14) y así las probetas contarán con un máximo desempeño en sus propiedades mecánicas.

**Figura 5. Molde utilizado para la compactación de las muestras a ensayar.**



$$Y = \frac{n*N*P*H}{V} \quad (3)$$

Donde,

Y- energía de compactación del suelo.

N- número de golpes aplicados por capa.

n- número de capas a ser compactadas en el cilindro.

P- peso del pisón o martillo.

H- altura de caída del pisón.

V- volumen del cilindro.

En la siguiente tabla se muestran los valores utilizados en la ecuación de energía de compactación para determinar el número de golpes necesarios utilizando el molde donde se crearon las probetas a ensayar en la cámara de la máquina Triaxial estática. Siendo Y1 la energía de compactación para el ensayo de proctor modificado en donde se obtuvo la humedad óptima y Y2 la energía de compactación de la muestra en el molde de la figura 4.

**Tabla 5. Energías de compactación.**

|          | <b>Proctor</b> | <b>Probetas</b> |
|----------|----------------|-----------------|
|          | Y1             | Y2              |
| <b>N</b> | 25             | 21              |
| <b>n</b> | 3              | 3               |
| <b>P</b> | 4.54 Kg        | 4.54 Kg         |
| <b>H</b> | 457 mm         | 457 mm          |
| <b>V</b> | 903.21 $cm^3$  | 753.98 $cm^3$   |

En el proceso para fabricar las probetas se tomaron 2000 gramos de muestra de suelo pasada por el tamiz No. 40. Para llegar a la humedad óptima de compactación, se calculó el porcentaje de agua que se necesitaba adicionarle en base al peso del material, para ello se tuvo en cuenta el peso del suelo que se usó en el ensayo proctor y porcentaje de humedad óptima que se obtuvo en este mismo realizando una relación de tres simple como se muestra a continuación (ver ecuación 4):

$$\frac{2500}{13.5} = \frac{2000}{x} \quad (4)$$

$$x = \frac{2000 * 13.5}{2500} = 10.8\%$$

Se obtuvo que el porcentaje de agua en relación con el peso de 2000 gr de material igual a 10.8%, suponiendo que este se encuentra totalmente seco, es decir no se tiene en cuenta aún la humedad natural, sabemos que 1 gramo de agua equivale a 1 mililitro, se calculó que:

$$2000 * \frac{10.8}{100} = 216 \text{ gr de agua} = \mathbf{216 \text{ ml}}$$

Teóricamente se tendrían que agregar 216 ml de agua a los 2000 gramos de muestra para la compactación de cada probeta. Sin embargo, en este caso si es necesario tener en cuenta el porcentaje de humedad natural que tenía el material

en ese momento, el cual era de 3.65%. Por consiguiente, se tuvo que disminuir la cantidad de agua para lograr el porcentaje de humedad óptima de compactación para las probetas de la siguiente manera (ver ecuación 5):

$$\text{humedad óptima} = 13.5 \%$$

$$\text{humedad natural del suelo} = 3.65\%$$

$$\% \text{ de humedad} = \text{humedad óptima} - \text{humedad natural} \quad (5)$$

$$13.5 - 3.65 = 9.85\%$$

Luego,

$$2000 \text{ gr} * \frac{9.85}{100} = 197 \text{ gr de agua} = \mathbf{197 \text{ ml}}$$

Entonces 197 ml de agua fue la cantidad requerida que se le agregó a los 2000 gramos de muestra de suelo para su posterior compactación. Finalmente se crearon 12 probetas con igual cantidad de agua, número de capas y golpes por capa, cada una se envolvió en papel transparente o vinipel luego fueron empacadas en bolsas herméticas, con el propósito de conservar su humedad y a la vez facilitar la estabilización del agua o uniformidad de esta en cada una de las probetas. Posteriormente, se tomaron 6 probetas con la humedad óptima de compactación más cercana a la obtenida mediante el ensayo proctor (13.5%) para así dar inicio a los ciclos de secado y humedecimiento.

## 2.5 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE SECADO Y HUMEDECIMIENTO.

De las doce probetas compactadas para ensayar (ver figura 6), se tomaron las que más se aproximaban a la humedad óptima.

**Figura 6. Cilindros de suelo compactados en el molde de la figura 4.**



Un par de estas probetas se mantuvo con la humedad óptima en un tiempo de estabilización mayor a 15 días, para posteriormente su respectivo ensayo en la máquina Triaxial Estática.

Con las 4 probetas restantes se inició un proceso de secado, donde estuvieron expuestas a temperatura ambiente durante un período de casi dos semanas con el propósito de provocar una pérdida significativa en el porcentaje de humedad inicial (ver anexo 20). Para esto se llevó un control de pérdida de humedad por días en donde se registró que las probetas sometidas al proceso de secado, perdieron un porcentaje de humedad de casi el 50% de su porcentaje inicial.

Dichas probetas pasaron de tener un porcentaje de humedad cercana al 13.5% a un porcentaje oscilante alrededor del 7.5%, posteriormente se empaquetaron en vinipel y ziploc para que estabilizaran por un período de tiempo cercano a 7 días sin pérdidas de peso considerables.

Luego de obtener una pérdida de agua significativa, dos de las probetas expuestas al periodo de secado a temperatura ambiente y cuyas humedades oscilaban entre 6.5% y 7.5% se sometieron al proceso de humedecimiento. Este consistía sencillamente en suministrar agua a cada probeta con un atomizador casero periódicamente (ver figura 7), en un transcurso de 10 horas se pudo evidenciar que cada probeta logro ganar un porcentaje de agua un poco mayor al perdido en el proceso de secado volviendo cerca de la proporción óptima de humedad. Antes de realizar el proceso de humedecimiento en las probetas hubo primero que remodelar cada una de ellas puesto que sus dimensiones eran un poco mayores a las requeridas en el ensayo triaxial. Este proceso se explica en la sección 2.6.1.

El cálculo usado para evidenciar la ganancia sustancial de humedad en las probetas expuestas al proceso de humedecimiento se presenta en esta ecuación (ecuación 6).

$$ws = \left( \frac{wh - wr}{wh} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

Ws: % de humedad necesario para llegar al punto óptimo.

Wr: peso de la probeta luego de re moldearla en gr.

Wh: peso de la probeta luego de ganar el % de humedad deseada.

La única incógnita es el peso de la probeta luego de llegar al % de humedad óptimo, entonces para el espécimen número 2 conocemos que Ws=6.78% y Wr=1140 gr, el porcentaje de humedad a ganar para la probeta es de 7% aproximadamente, luego se tiene que:

$$7\% = \left( \frac{wh - 1140 \text{ gr}}{wh} \right)$$

$$7\%wh = wh - 1140 \text{ gr}$$

$$wh = 1225.9 \text{ gr}$$

Como resultado obtenemos que la probeta tiene que llegar a un peso aproximado de 1225.9 gr, suministrándole agua con el atomizador.

### **Figura 7. Proceso de humedecimiento.**



Finalmente, la probeta numero 2 logró llegar a un peso de 1230 gr, luego se envolvió en vinipel y se almacenó en un refrigerador para su posterior proceso de estabilización y minimizar las pérdidas de humedad.

## **2.6 DESARROLLO DEL ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO.**

Antes de montar cada probeta en la máquina triaxial estática para aplicar el ensayo consolidado, no drenado (**CU**), se llevó a cabo el siguiente procedimiento para cada una de ellas.

**2.6.1 Montaje y preparación de la probeta.** Anteriormente en la sección 2.5 se manifestó que el molde usado en la fabricación de las probetas excedía un poco las medidas requeridas por la máquina del Triaxial Estático, a causa de esto se tuvo

que perfilar manualmente cada probeta (ver figura 8) de tal forma que el diámetro y la altura del cilindro cumplieran con las medidas para realizar el ensayo. Una vez moldeado el cilindro de suelo, se procedió a cubrirlo con una membrana elástica de caucho colocando dentro de ésta piedras porosas en la parte superior e inferior del cilindro de suelo; luego, se usaron aros elásticos para sellar la unión dentro del cabezal superior y el pedestal inferior de la maquina Triaxial (ver figura 9).

**Figura 8. Preparación de la muestra de suelo con las dimensiones requeridas por la cámara de la máquina Triaxial.**



**Figura 9. Probeta montada en la cámara de ensayo.**



**2.6.2 Saturación de la muestra.** En esta etapa del ensayo se llena de agua la cámara de la máquina Triaxial una vez puesta y ajustada la probeta, la muestra se deja allí hasta que el aire que se encuentran dentro de la cámara salga, al igual que en los tubos de conducción de agua, además, esto permite que los espacios vacíos en formas de burbujas de aire que hay dentro de la muestra de suelo queden completamente saturados. En adición a esto, se debe chequear el valor B o B-Skempton, para comprobar si el grado de saturación del espécimen es el adecuado antes del proceso de consolidación. *“Requiere drenaje cerrado en la contrapresión (el sistema automáticamente mantiene las llaves de drenaje cerradas), mientras que la presión de cámara tiene un incremento de aproximadamente 50 KPa, luego se mide el incremento de la presión de poros”*<sup>6</sup>. Se calcula el parámetro B así:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (6)$$

Donde,  $\Delta u$  es la variación de la presión de poros y  $\Delta \sigma_3$  es la variación en la presión de la cámara.

Finalmente, cuando B esté entre 0.91 y 1.0 se asume que la muestra está saturada y se puede dar inicio a al proceso de consolidación.

### **2.6.3 Consolidación**

*“La etapa de consolidación se lleva a cabo mediante el aumento de la presión de cámara mientras automáticamente el controlador mantiene una contrapresión constante (a menudo igual a la presión de poro alcanzado durante el B-check saturación final), hasta que la diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión sea igual al esfuerzo de consolidación efectivo requerido para la*

---

<sup>6</sup> DUARTE Erika, PAEZ Brayan. Guía Práctica Para El Ensayo Triaxial Estático Consolidado No Drenado (Cu) Con Gds Triaxial Automated System Y Gdslab V2.5.4. [Tesis de pregrado]. Bucaramanga, Universidad industrial de Santander, 2016

*prueba*<sup>7</sup>. Una vez terminada la etapa de consolidación de la muestra se inicia el fallo de esta.

**2.6.4 Fallo del espécimen** Durante esta etapa se somete la muestra de suelo a la aplicación de cargas durante un tiempo estimado, en el cual la probeta se deformará radial y axialmente. *“La etapa de corte consiste en aplicar una fuerza axial o una deformación axial a una velocidad constante en dirección hacia arriba (compresión). Esta velocidad, junto con la condición de drenaje de la muestra, depende del tipo de prueba triaxial que se realiza, en este caso la prueba triaxial consolidada no drenada (CU) requiere de una velocidad de carga axial lo suficientemente lenta para permitir la medición adecuada de las presiones de exceso de poros, evitando una sobrecarga de la presión del controlador.”*<sup>8</sup> El criterio de falla de las muestras fue obtener durante el aumento gradual de la carga una deformación del 10 % o dado el caso hasta que esta fallara. Los datos se monitorearon durante el tiempo de falla en las gráficas de esfuerzo y deformación al igual que el aumento en la presión de poros.

---

<sup>7</sup> *Ibíd.*

<sup>8</sup> *Ibíd.*

### 3. RESULTADOS

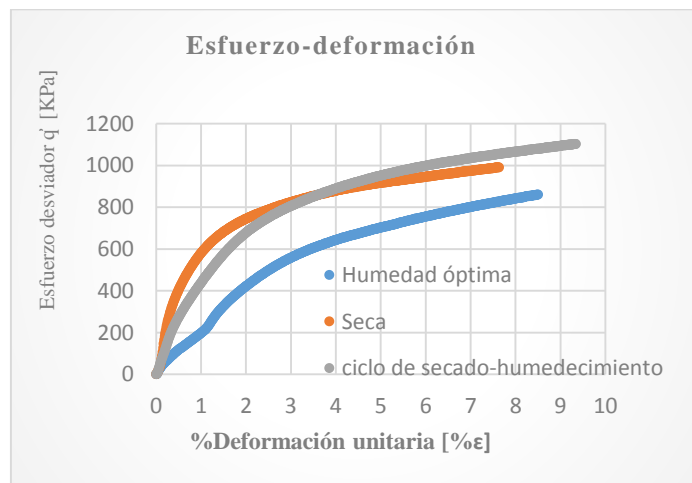
El programa utilizado para la obtención y procesamiento de los datos fue el GDSLAB. A través de este programa, se logró monitorear la ejecución del ensayo durante cada una de las etapas desde la saturación de la muestra hasta su respectivo fallo.

Una vez fallado cada cilindro de suelo, se procedió a realizar los respectivos cálculos para la obtención de la relación entre el esfuerzo y la deformación al igual que la presión de poros y la deformación. Cabe resaltar que, para esto, se hicieron correcciones a el área de las probetas y así mismo a los tipos de esfuerzos obtenidos; esto según lo estipulado en la norma INV E-153- 07.

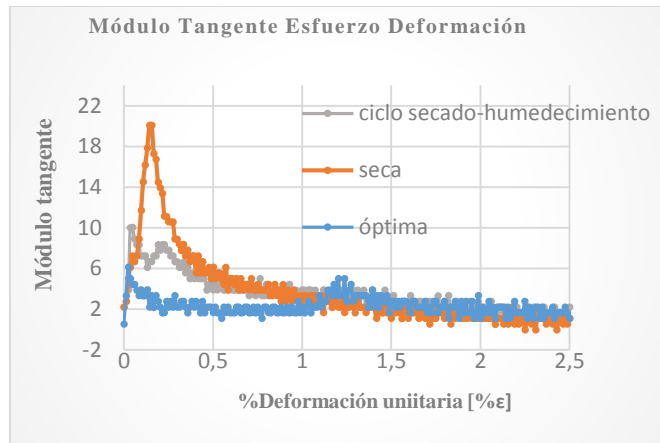
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos.

#### 3.1 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

Figura 10. Curva de esfuerzo vs deformación unitarial.



**Figura 11. Modulo tangente de deformación.**



Se observa en la figura 10 (ver el anexo 28) que a medida que aumenta el esfuerzo desviador también aumenta la deformación de cada una de las probetas. Sin embargo, el comportamiento de *esfuerzo-deformación axial* de la probeta con humedad óptima muestra una tendencia lineal, por el contrario, la probeta seca y la probeta con el ciclo completo de secado y humedecimiento tienen una tendencia exponencial inversa en sus respectivas curvas donde en deformaciones más pequeñas aumenta el esfuerzo desviador significativamente y cuando la deformación se hace más grande el mismo esfuerzo tiende a volverse constante.

Si tomamos en cuenta la concavidad de cada una de las curvas, la probeta expuesta al periodo de secado está próxima a encontrar su esfuerzo desviador máximo en tan solo un 7.63% de deformación axial, a la que corresponde un esfuerzo desviador de 990.87 [KPa], por otra parte las probetas con humedad óptima y el ciclo completo de secado-humedecimiento muestran aparentemente un comportamiento paralelo en las curvas de esfuerzo deformación con una diferencia porcentual en el esfuerzo desviador de 25.66% medido a partir del porcentaje máximo de deformación axial presentada por la probeta con grado óptimo de humedad (8.4%).

**Figura 12. Probeta con humedad óptima de compactación después del ensayo triaxial.**



En la figura 12 puede apreciarse la deformación del espécimen con humedad óptima una vez terminado el ensayo (ver anexo 22, 23 y 30).

**Figura 13. Probeta con pérdida de humedad (más seca) después del ensayo triaxial.**



En la figura 13 se observa la deformación experimentada por la probeta con pérdida de humedad (ver anexo 24,25 y 31).

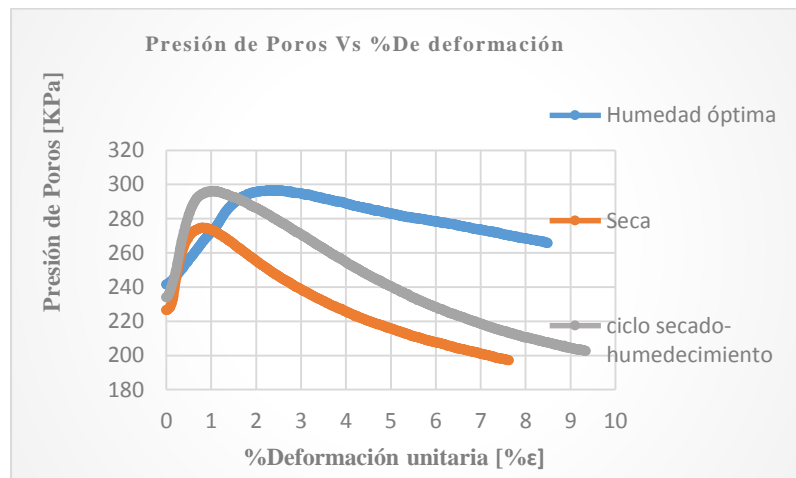
**Figura 14. Probeta con ciclo de secado y humedecimiento después del ensayo triaxial.**



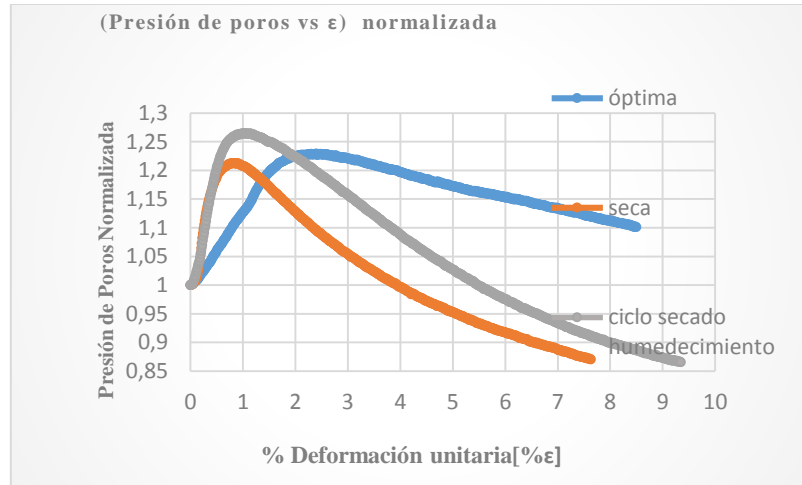
En la figura 14 se aprecia el estado de la probeta con un ciclo completo, luego del ensayo triaxial (ver anexo 26, 27 y 32)

### **3.2 PRESIÓN DE POROS VS DEFORMACIÓN**

**Figura 15. Curva de la presión de poros vs deformación durante la etapa de falla.**



**Figura 16. Curva presión de poros normalizada durante la etapa de falla.**



Al examinar la figura 15 (ver anexo 29), puede deducirse que la presión de poros en cada una de las probetas fue diferente al final de la etapa de consolidación en el ensayo Triaxial. Esto puede atribuirse a que en cada uno de los estados de humedad presentes en las probetas pudo ocurrir un cambio en la estructura porosa del suelo puesto que para todos los especímenes se mantuvieron las mismas condiciones iniciales en el ensayo. Es de notar en la gráfica que las probetas con una mayor presión de poros inicial son aquellas que su humedad es mayor, es decir, la probeta con humedad óptima y la probeta con un ciclo completo presentaron un aumento sustancial de presión de poros en las deformaciones más pequeñas estimado en un 22.8% y 26.48% con respecto a su presión al comenzar la etapa de falla (ver figura 16 y anexo 34), pero en la disminución de la misma presión hubo una variación significativa en el comportamiento de estos dos especímenes. Por ejemplo, la probeta con el ciclo completo de secado–humedecimiento presentó una disminución abrupta en la presión de poros de 31.5% en relación a la mayor presión de poros alcanzada, caso similar a lo ocurrido con la probeta de menor humedad con una disminución del 26.7%, mientras que el comportamiento de la disminución de la presión de poros en la probeta con humedad óptima tuvo una disminución de tipo lineal y del 18.6%. De acuerdo a esto se intuye que, al secarse el suelo, la presión de poros frente a cada deformación es menor. “se observa que para

*pequeñas deformaciones el suelo ensayado presenta un aumento de la presión de poros del 22% en promedio del esfuerzo efectivo debido a la tendencia de disminución del volumen (contracción), seguido de un decremento subsecuente de la presión de poros ocasionado por un aumento del volumen cuando se le somete a corte (dilatancia).”<sup>9</sup>*

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*

#### **4. CONCLUSIONES.**

Dados los resultados, se concluye que los cambios de humedad provocados por un ciclo de secado y humedecimiento inducido en el laboratorio sobre el suelo tienen un marcado efecto en el comportamiento mecánico de este frente a los diferentes tipos de carga a los que fue expuesto.

Se evidenció que, con la presencia de tan solo un ciclo completo de secado y humedecimiento inducido en el laboratorio, el material obtuvo un efecto de endurecimiento frente al esfuerzo desviador, es decir se necesitó de un aumento hasta del 134.9% en dicho esfuerzo para deformar axialmente el espécimen un 0.36%, comparando las curvas del espécimen con un ciclo y de humedad óptima en un mismo punto, esto se puede apreciar en la figura 10 y 11 (ver anexo 28 y 33).

El proceso de secado provocó un efecto de endurecimiento muy notorio en el comportamiento de la gráfica de esfuerzo deformación presentes en la figura 10, donde se puede apreciar que para las deformaciones axiales menores del 3.6% los esfuerzos desviadores más grandes fueron aplicados al espécimen con pérdida de humedad y que a su vez algo de esa dureza se conservó en el espécimen al que se le aplicó el ciclo de secado-humedecimiento, el cual en deformaciones axiales menores al mismo porcentaje tuvo una disminución del esfuerzo desviador promedio de 13.2%.

Teniendo presentes los resultados obtenidos es válido decir que los especímenes en cada uno de sus estados de humedad (óptima, con pérdida y con un ciclo), pudieron haber presentado un cambio en su estructura porosa esto fundamentado en el comportamiento que tuvieron las curvas propias de cada uno de ellos en la figura 15, donde la variación de la presión de poros después de la consolidación fue

de un 3.06% y 6.31% en disminución del espécimen con el ciclo completo y con pérdida de humedad respectivamente, con respecto a la presión de la muestra con humedad óptima.

## **5. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar una continuación de la investigación aumentando la cantidad de ciclos por espécimen, para así poder concluir qué tan nocivos pueden llegar a ser estos para las propiedades mecánicas del suelo en estudio.

Es preciso utilizar el mismo tipo de suelo para los ciclos de secado y humedecimiento dado que el objetivo principal del proyecto requiere medir las variaciones en las propiedades mecánicas, las cuales deben ser isotrópicas en las muestras de suelo utilizadas para la respectiva investigación.

Se sugiere profundizar en el proceso de humedecimiento ya que, para obtener una ganancia de humedad en una muestra de suelo, se requieren de lapsos prolongados. Además, el suelo toma largos periodos para estabilizar su humedad debido a la cantidad de agua que se le es proporcionada.

## BIBLIOGRAFÍA

ALDAOOD A. and BOUASKER M. and AL-MUKHTAR M., “Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils,” En: Engineering Geology, Volumen 174 (23 de mayo 2014); p11-21.

CAMACHO J., REYES O., MÉNDEZ D., “Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor,” Volumen 17, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, diciembre 2007, p 67-81.

DUARTE Erika, PAEZ Brayan. Guía Práctica Para El Ensayo Triaxial Estático Consolidado No Drenado (Cu) Con Gds Triaxial Automated System Y Gdslab V2.5.4. [Tesis de pregrado]. Bucaramanga, Universidad industrial de Santander, 2016.

GARCÍA M., “Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia,” Volumen 36, Transcripción de la conferencia llevada a cabo en el foro “hidrología de extremos y cambio climático” realizado en la universidad de los andes, (18 de octubre de 2012); p 60-64.

VALERIO Oscar, “Ensayos triaxiales para suelos.” Disponible en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13369/8391-11758-1-SM.pdf?sequence=1> [citado 15 de Enero de 2018].

## ANEXOS

### Anexo 1. Granulometría

Peso de la muestra (gr) =700.4

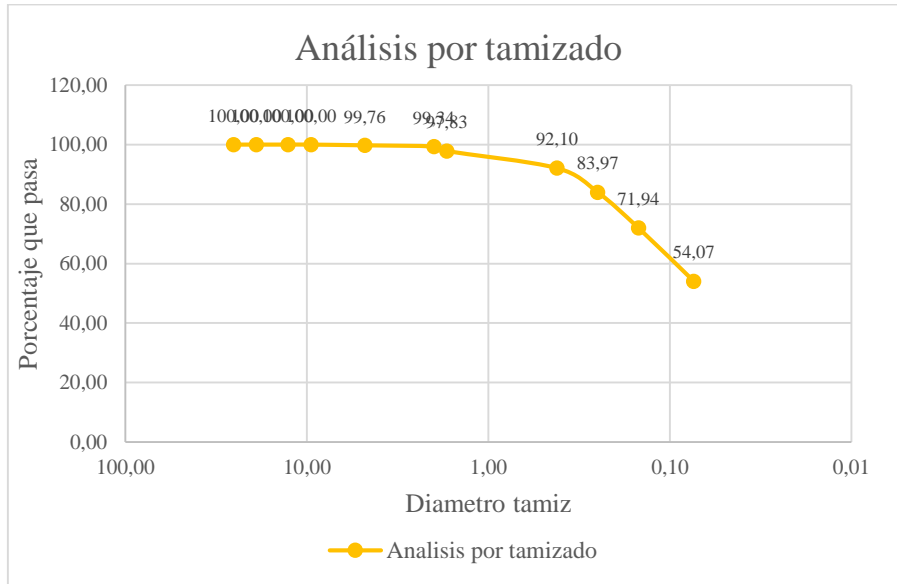
Peso de la muestra lavada por tamiz No. 200 (gr)= 329.9

| TAMIZ          | PESO          |              |            |             | PASA % |
|----------------|---------------|--------------|------------|-------------|--------|
|                | RETENIDO      |              |            |             |        |
|                | Diámetro (mm) | PARCIAL (gr) | PARCIAL %  | ACUMULADO % |        |
| <b>1"</b>      | 25,4          | 0            | 0          | 0           | 100,00 |
| <b>3/4"</b>    | 19            | 0            | 0          | 0           | 100,00 |
| <b>1/2"</b>    | 12,7          | 0            | 0          | 0           | 100,00 |
| <b>3/8"</b>    | 9,5           | 0            | 0          | 0           | 100,00 |
| <b>No. 4</b>   | 4,8           | 1,7          | 0,24271845 | 0,242718447 | 99,76  |
| <b>No. 10</b>  | 2             | 2,9          | 0,41404911 | 0,656767561 | 99,34  |
| <b>No. 20</b>  | 1,7           | 10,6         | 1,5134209  | 2,170188464 | 97,83  |
| <b>No. 40</b>  | 0,42          | 40,1         | 5,72529983 | 7,895488292 | 92,10  |
| <b>No. 60</b>  | 0,25          | 57           | 8,13820674 | 16,03369503 | 83,97  |
| <b>No. 100</b> | 0,149         | 84,2         | 12,0217019 | 28,05539692 | 71,94  |
| <b>No. 200</b> | 0,074         | 125,2        | 17,8754997 | 45,93089663 | 54,07  |
| <b>fondo</b>   |               | 378,7        | 54,0691034 | 100         | 0,00   |

## **Anexo 2. Porcentajes de muestra de suelo acumulado**

|               |              |
|---------------|--------------|
| <b>GRAVAS</b> | <b>0,24</b>  |
| <b>ARENAS</b> | <b>45,69</b> |
| <b>FINOS</b>  | <b>54,07</b> |

**Anexo 3. Grafica de porcentajes de suelo que pasan por el tamiz.**



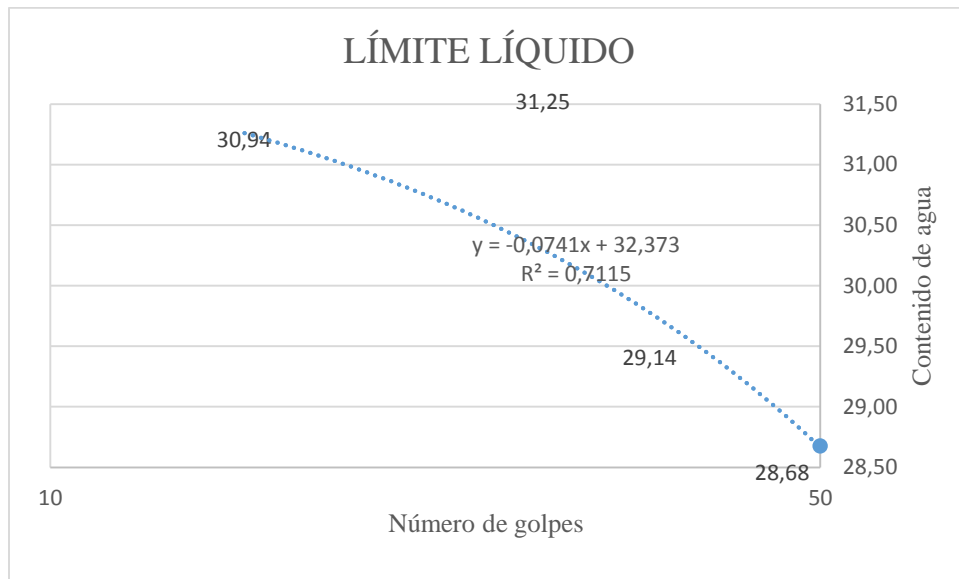
**Anexo 4. Tabla límite líquido.**

| <b>LÍMITE LÍQUIDO</b> |                    |                   |                                    |                                  |                           |
|-----------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| <b>Prueba No</b>      | <b>Cápsula No.</b> | <b>No. Golpes</b> | <b>peso cápsula + suelo húmedo</b> | <b>peso cápsula + suelo seco</b> | <b>peso de la cápsula</b> |
| <b>1</b>              | 1                  | 50                | 23                                 | 19,1                             | 5,5                       |
| <b>2</b>              | 2                  | 35                | 25                                 | 20,6                             | 5,5                       |
| <b>3</b>              | 3                  | 28                | 22                                 | 18                               | 5,2                       |
| <b>4</b>              | 4                  | 15                | 23,5                               | 19,2                             | 5,3                       |

**Anexo 5. Tabla de cálculo de contenido de agua.**

| <b>Prueba No</b> | <b>Cápsula No.</b> | <b>No. Golpes</b> | <b>peso cápsula + suelo húmedo</b> | <b>peso cápsula + suelo seco</b> | <b>peso del agua (gr)</b> | <b>peso de la cápsula (gr)</b> | <b>peso del suelo seco (gr)</b> | <b>Contenido de agua (%)</b> |
|------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1                | 1                  | 50                | 23                                 | 19,1                             | 3,9                       | 5,5                            | 13,6                            | 28,68                        |
| 2                | 2                  | 35                | 25                                 | 20,6                             | 4,4                       | 5,5                            | 15,1                            | 29,14                        |
| 3                | 3                  | 28                | 22                                 | 18                               | 4                         | 5,2                            | 12,8                            | 31,25                        |
| 4                | 4                  | 15                | 23,5                               | 19,2                             | 4,3                       | 5,3                            | 13,9                            | 30,94                        |

**Anexo 6. Grafica del límite líquido de suelo con regresión lineal.**



**Anexo 7. Contenido de agua para 25 golpes según la curva ajustada en la gráfica.**

$$y = -0.0741x + 32.373$$

$$y = 0.0741 * 25 + 32.373$$

$$y = 30.52$$

Luego, el contenido de agua es del **30.52 %**, siendo este el límite líquido del suelo en estudio.

$$**LL = 30.52%**$$

Anexo 8. Tabla de límite plástico.

| LÍMITE PLÁSTICO |             |            |                             |                           |                    |                         |                          |                       |
|-----------------|-------------|------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Prueba No       | Cápsula No. | No. Golpes | peso cápsula + suelo húmedo | peso cápsula + suelo seco | peso del agua (gr) | peso de la cápsula (gr) | peso del suelo seco (gr) | Contenido de agua (%) |
| 1               | 5           |            | 19,9                        | 18,1                      | 1,8                | 4,8                     | 13,3                     | 13,5338346            |
| 2               | 6           |            | 20,5                        | 17,5                      | 3                  | 4,7                     | 12,8                     | 23,4375               |

Según los datos obtenidos, el límite plástico es:

$$\frac{13.53 + 23.44}{2} = 18.49\%$$

$$LP = 18.49\%$$

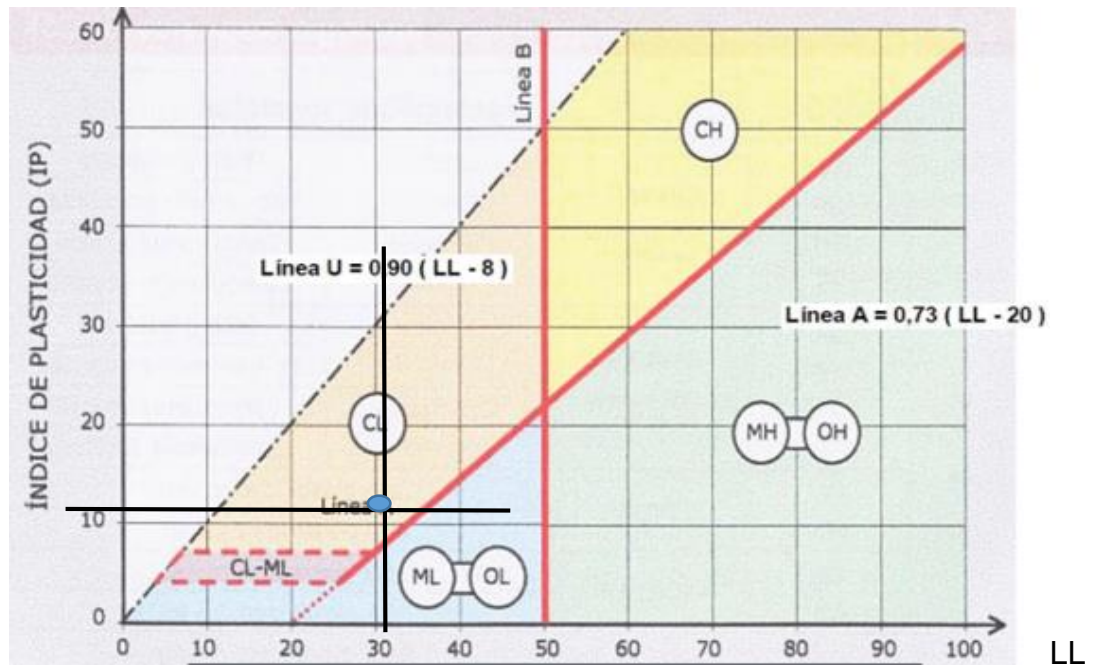
## Anexo 9. Índice de plasticidad.

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 30.52 - 18.49$$

$$IP = \mathbf{12.03\%}$$

Anexo 10. Carta de plasticidad. Clasificación del suelo.



Obteniendo como resultado final una **arcilla de baja compresibilidad (CL)**.

### Anexo 11. Proctor modificado.

Se tomó una muestra inicial de suelo de 2500 gramos pasados por el tamiz No. 40 para el desarrollo del ensayo.

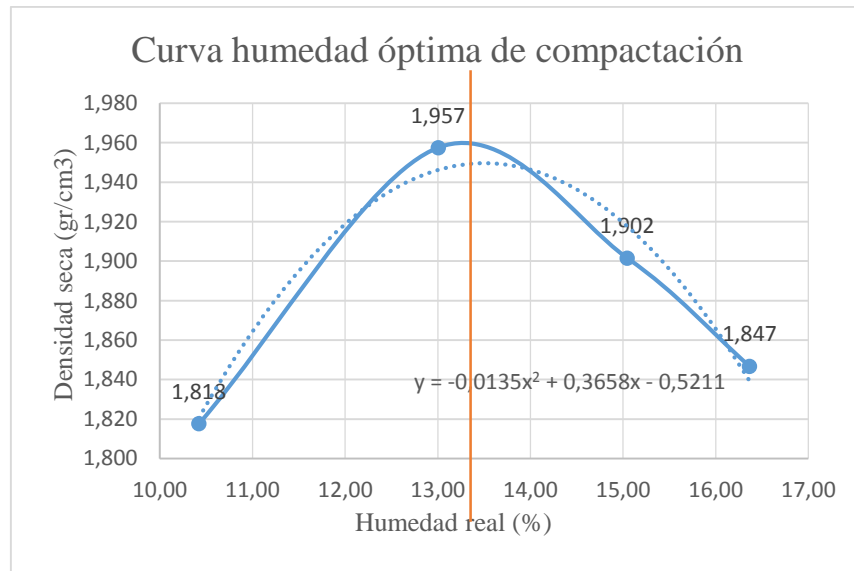
| PUNTO | VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ) | HUMEDAD APARENTE (ml) | HUMEDAD REAL W (%) | W MOLDE + SUELO (gr) | W MOLDE | W SUELO COMPACTADO | DENSIDAD HUMEDA (gr/cm <sup>3</sup> ) | DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|----------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|---------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1     | 903,21                     | 200                   | 10,42              | 6217,7               | 4404,9  | 1812,8             | 2,007                                 | 1,818                               |
| 2     | 903,21                     | 250                   | 13,00              | 6402,8               | 4404,9  | 1997,9             | 2,212                                 | 1,957                               |
| 3     | 903,21                     | 300                   | 15,05              | 6380,8               | 4404,9  | 1975,9             | 2,188                                 | 1,902                               |
| 4     | 903,21                     | 350                   | 16,37              | 6345,9               | 4404,9  | 1941               | 2,149                                 | 1,847                               |

**Anexo 12. Tabla de humedades; dos por cada punto.**

$$\text{humedad (\%)} = \frac{(\text{Peso tara + suelo Húmedo}) - (\text{Peso tara + suelo Seco})}{(\text{Peso tara + Suelo seco}) - (\text{Peso de la tara})} * 100$$

| <b>COPA</b> | <b>PESO TARA (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO HUM (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO SECO (gr)</b> | <b>HUMEDAD (%)</b> | <b>W AGUA (gr)</b> |
|-------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| <b>1</b>    | 5,4                   | 44,5                             | 40,8                              | 10,45              | 3,70               |
| <b>2</b>    | 4,5                   | 38,5                             | 35,3                              | 10,39              | 3,20               |
| <b>3</b>    | 5,5                   | 44,5                             | 40                                | 13,04              | 4,50               |
| <b>4</b>    | 8,3                   | 51                               | 46,1                              | 12,96              | 4,90               |
| <b>5</b>    | 8,3                   | 58,8                             | 52,3                              | 14,77              | 6,50               |
| <b>6</b>    | 5,3                   | 45,2                             | 39,9                              | 15,32              | 5,30               |
| <b>7</b>    | 5,7                   | 61,7                             | 53,9                              | 16,18              | 7,80               |
| <b>8</b>    | 8,3                   | 73,8                             | 64,5                              | 16,55              | 9,30               |

**Anexo 13. Gráfica humedad óptima de compactación Vs densidad seca del suelo.**



Según los resultados obtenidos y gráficamente se puede observar que la humedad óptima de compactación de la muestra es de aproximadamente 13.5 %. No obstante, aritméticamente con la ecuación de la curva se obtuvo el siguiente resultado para el punto máximo de inflexión.

$$y = -0.0135x^2 + 0.3658x - 0.5211 \quad (1)$$

Derivando (1)

$$y' = -0.027x + 0.3658$$
$$y' = 0 \rightarrow -0.027x + 0.3658 = 0 \quad (2)$$

Despejando  $x$  de (2)

$$x = 13.548\%$$

Finalmente se tomó como humedad óptima para el suelo el valor de 13.55%.

## Anexo 14. Energía de compactación.

Dado que los moldes utilizados para la compactación del Proctor modificado y de las muestras respectivamente diferían en sus dimensiones, se calculó la energía de compactación con el propósito de tener una humedad óptima para las probetas erigidas previamente a ser sometidas a los ciclos de secado y humedecimiento.

Los resultados se muestran a continuación:

Ecuación de energía de compactación:

$$Y = \frac{n * N * P * H}{V} \quad (3)$$

Energía de compactación del ensayo Proctor modificado.

$$Y1 = \frac{n1 * N1 * P1 * H1}{V1}$$

Y- energía de compactación del suelo.

N- número de golpes aplicados por capa.

n- número de capas a ser compactadas en el cilindro.

P- peso del pisón o martillo.

H- altura de caída del pisón.

V- volumen del cilindro.

$$Y1 = \frac{3 * 25 * 4.57 * 457}{903.81} = 173.3\%$$

Dado que, se mantuvieron constantes las variables  $n$ ,  $P$  y  $H$ ; se igualó la ecuación de energía obteniendo lo siguiente:

Energía de compactación para el molde donde se erigieron las probetas.

$$Y_2 = \frac{n_2 * N_2 * P_2 * H_2}{V_2}$$

$$Y_1 = Y_2$$

Como  $n$ ,  $P$  y  $H$  no cambiaron, entonces,

$$\frac{n * N_1 * P * H}{V_1} = \frac{n * N_2 * P * H}{V_2}$$

$$\frac{n + 25 * P_1 * H_1}{903.21} = \frac{n * N_2 * P_2 * H_2}{753.98}$$

$$N_2 = \frac{753.98 * 25}{903.21} = 20.87 \text{ golpes} \cong 21 \text{ golpes.}$$

Luego, para la compactación de los cilindros de suelo que se iban a ensayar, se le aplicaron 21 golpes dentro del molde de las dimensiones requeridas por la cámara de la máquina Triaxial.

**Anexo 15. Datos de compactación para las probetas elaboradas en el laboratorio.**

| <b>PROBETA</b> | <b>VOLUMEN<br/>(cm<sup>3</sup>)</b> | <b>HUMEDAD<br/>APARENTE<br/>(ml)</b> | <b>HUMEDAD<br/>REAL W<br/>(%)</b> | <b>W MOLDE<br/>+ SUELO<br/>(gr)</b> | <b>W<br/>MOLDE</b> | <b>W SUELO<br/>COMPACTADO</b> | <b>DENSIDAD<br/>HUMEDA<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>DENSIDAD<br/>SECA<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> |
|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--|--|
| <b>1</b>       | 753,98                              | 197                                  | 13,94                             | 4071                                | 2446,6             | 1624,4                        | 2,154  | 1,891  |
| <b>2</b>       | 753,98                              | 197                                  | 14,19                             | 4071,9                              | 2446,6             | 1625,3                        | 2,156  | 1,888  |
| <b>3</b>       | 753,98                              | 197                                  | 14,56                             | 4070,3                              | 2446,6             | 1623,7                        | 2,153  | 1,880  |
| <b>4</b>       | 753,98                              | 197                                  | 13,54                             | 4051,9                              | 2446,6             | 1605,3                        | 2,129  | 1,875  |
| <b>5</b>       | 753,98                              | 197                                  | 14,51                             | 4047,4                              | 2446,6             | 1600,8                        | 2,123  | 1,854  |
| <b>6</b>       | 753,98                              | 197                                  | 14,08                             | 4066,5                              | 2446,6             | 1619,9                        | 2,148  | 1,883  |
| <b>7</b>       | 753,98                              | 197                                  | 12,83                             | 4061,8                              | 2446,6             | 1615,2                        | 2,142  | 1,899  |
| <b>8</b>       | 753,98                              | 197                                  | 13,97                             | 4075,8                              | 2446,6             | 1629,2                        | 2,161  | 1,896  |
| <b>9</b>       | 753,98                              | 197                                  | 14,69                             | 4058,7                              | 2446,6             | 1612,1                        | 2,138  | 1,864  |
| <b>10</b>      | 753,98                              | 197                                  | 15,05                             | 4068                                | 2446,6             | 1621,4                        | 2,150  | 1,869  |
| <b>11</b>      | 753,98                              | 197                                  | 14,69                             | 4068,9                              | 2446,6             | 1622,3                        | 2,152  | 1,876  |
| <b>12</b>      | 753,98                              | 197                                  | 14,43                             | 4071,8                              | 2446,6             | 1625,2                        | 2,155  | 1,884  |

**Anexo 16. Humedad óptima de compactación de las probetas**

|                   | <b>COPA</b> | <b>PESO TARA (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO HUM (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO SECO (gr)</b> | <b>HUMEDAD (%)</b> | <b>W AGUA (gr)</b> |
|-------------------|-------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| <b>PROBETA 1</b>  | 15          | 5,8                   | 32,6                             | 29,3                              | 14,04              | 3,3                |
|                   | 3           | 5,4                   | 34,2                             | 30,7                              | 13,83              | 3,5                |
| <b>PROBETA 2</b>  | 1           | 8,5                   | 38,4                             | 34,6                              | 14,56              | 3,8                |
|                   | 4           | 5,8                   | 37,9                             | 34                                | 13,83              | 3,9                |
| <b>PROBETA 3</b>  | 5           | 8,3                   | 46,3                             | 41,5                              | 14,46              | 4,8                |
|                   | 21          | 5,8                   | 41                               | 36,5                              | 14,66              | 4,5                |
| <b>PROBETA 4</b>  | 4           | 5,7                   | 41,4                             | 37,1                              | 13,69              | 4,3                |
|                   | 15          | 5,6                   | 34,4                             | 31                                | 13,39              | 3,4                |
| <b>PROBETA 5</b>  | 5           | 8,3                   | 54,1                             | 48,4                              | 14,21              | 5,7                |
|                   | 21          | 5,8                   | 36,8                             | 32,8                              | 14,81              | 4                  |
| <b>PROBETA 6</b>  | 1           | 8,5                   | 41,2                             | 37,2                              | 13,94              | 4                  |
|                   | 15          | 5,6                   | 32,1                             | 28,8                              | 14,22              | 3,3                |
| <b>PROBETA 7</b>  | 4           | 5,7                   | 41,1                             | 37                                | 13,10              | 4,1                |
|                   | 3           | 5,3                   | 29,5                             | 26,8                              | 12,56              | 2,7                |
| <b>PROBETA 8</b>  | 14          | 5,6                   | 39,9                             | 35,7                              | 13,95              | 4,2                |
|                   | 12          | 5,2                   | 44,3                             | 39,5                              | 13,99              | 4,8                |
| <b>PROBETA 9</b>  | 3           | 5,5                   | 32,3                             | 28,9                              | 14,53              | 3,4                |
|                   | 16          | 5,5                   | 43,4                             | 38,5                              | 14,85              | 4,9                |
| <b>PROBETA 10</b> | 14          | 5,5                   | 36,4                             | 32,4                              | 14,87              | 4                  |
|                   | 15          | 5,6                   | 35,1                             | 31,2                              | 15,23              | 3,9                |

|                   | <b>COPA</b> | <b>PESO TARA (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO HUM (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO SECO (gr)</b> | <b>HUMEDAD (%)</b> | <b>W AGUA (gr)</b> |
|-------------------|-------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| <b>PROBETA 11</b> | 1           | 5,3                   | 40,3                             | 35,8                              | 14,75              | 4,5                |
|                   | 4           | 5,5                   | 33,7                             | 30,1                              | 14,63              | 3,6                |
| <b>PROBETA 12</b> | 12          | 5,2                   | 38,5                             | 34,3                              | 14,43              | 4,2                |
|                   | 16          | 5,6                   | 42,9                             | 38,2                              | 14,42              | 4,7                |

**Anexo 17. Ecuación para el cálculo de la humedad de las probetas.**

$$\text{humedad (\%)} = \frac{(W \text{ tara} + \text{suelo Húmedo}) - (W \text{ tara} + \text{suelo Seco})}{(W \text{ tara} + \text{Suelo seco}) - (\text{Peso de la tara})} * 100$$

Calculo tipo para la primera probeta:

$$\text{humedad (\%)} = \frac{32.6 - 29.3}{29.3 - 5.8} * 100 = 14.04$$

**Anexo 18. Humedad natural del suelo.**

| <b>COPA</b> | <b>PESO TARA (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO HUM (gr)</b> | <b>PESO TARA+ SUELO SECO (gr)</b> | <b>HUMEDAD (%)</b> | <b>W AGUA (gr)</b> |
|-------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| <b>1</b>    | 8,3                   | 104,2                            | 100,8                             | 3,67567568         | 3,4                |
| <b>2</b>    | 8,2                   | 105,6                            | 102,2                             | 3,61702128         | 3,4                |

$$\text{humedad natural (\%)} = \frac{3.675 + 3.617}{2} = 3.646\%$$

**Anexo 19. Datos de las muestras de suelo sometidas al ciclo de secado.**

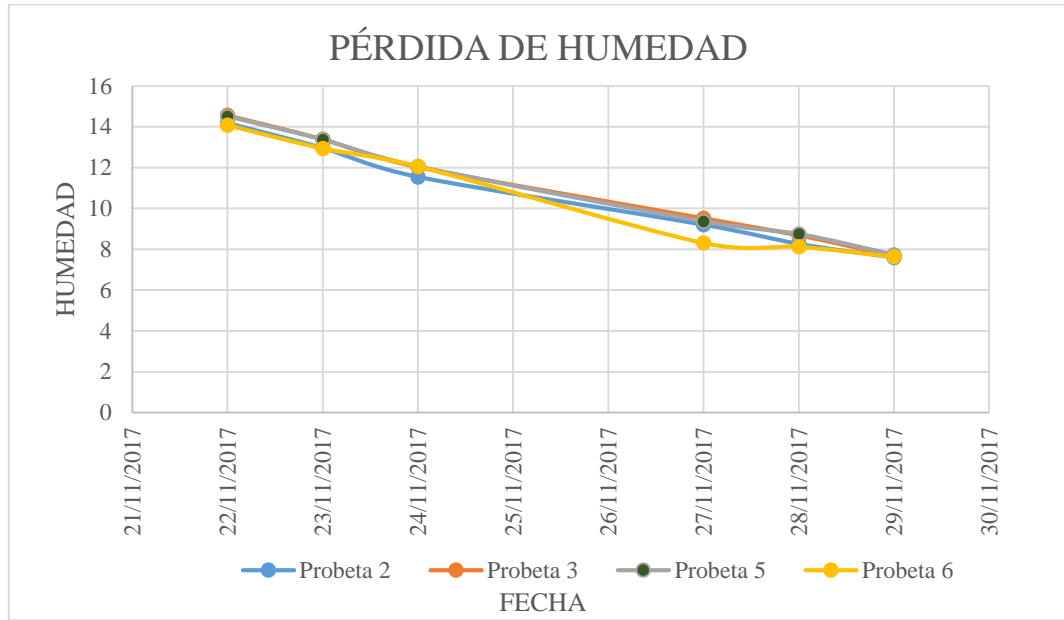
| <b>PROBETA</b> | <b>HUMEDAD</b> | <b>FECHA</b> | <b>HORA</b> | <b>PESO gr</b> |
|----------------|----------------|--------------|-------------|----------------|
| <b>2</b>       | 14,19          | 22/11/2017   | 16:00       | 1614           |
| <b>3</b>       | 14,56          |              |             | 1610,8         |
| <b>5</b>       | 14,51          |              |             | 1600,5         |
| <b>6</b>       | 14,08          |              |             | 1619,2         |

**Anexo 20. Secado de las muestras.**

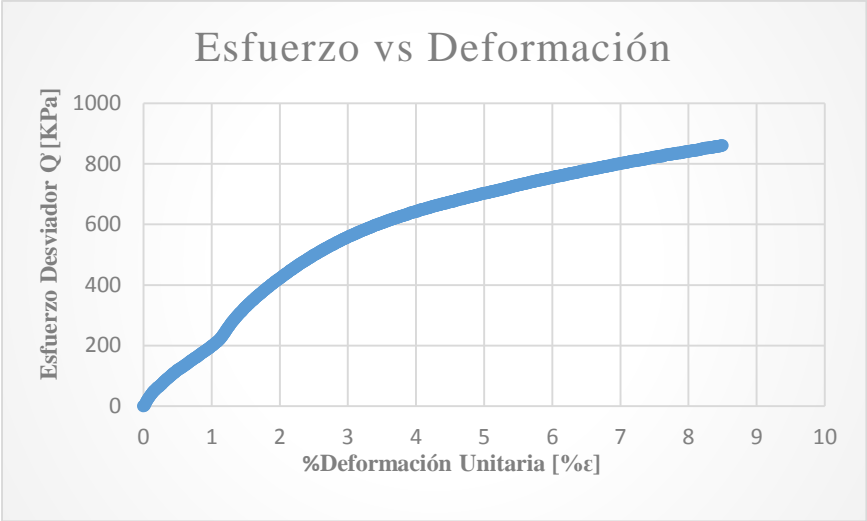
| <b>PROBETA</b> | <b>FECHA</b> | <b>HORA</b> | <b>PESO gr</b> | <b>PERDIDA HUMEDAD</b> | <b>NUEVA HUMEDAD</b> |
|----------------|--------------|-------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 2              | 23/11/2017   | 15:45       | 1594,5         | 1,22                   | 12,97                |
| 3              |              |             | 1592,1         | 1,17                   | 13,39                |
| 5              |              |             | 1582,5         | 1,14                   | 13,37                |
| 6              |              |             | 1601           | 1,14                   | 12,94                |
| 2              | 24/11/2017   | 16:15       | 1572,2         | 1,42                   | 11,55                |
| 3              |              |             | 1570,7         | 1,36                   | 12,02                |
| 5              |              |             | 1562           | 1,31                   | 12,06                |
| 6              |              |             | 1580,2         | 1,32                   | 11,63                |
| 2              | 27/11/2017   | 9:30        | 1536,2         | 2,34                   | 9,21                 |
| 3              |              |             | 1533,4         | 2,43                   | 9,59                 |
| 5              |              |             | 1524,3         | 2,47                   | 9,59                 |
| 6              |              |             | 1540           | 2,61                   | 9,02                 |
| 2              | 27/11/2017   | 15:54       | 1529,4         | 0,44                   | 8,76                 |
| 3              |              |             | 1532,2         | 0,08                   | 9,51                 |
| 5              |              |             | 1520,9         | 0,22                   | 9,36                 |
| 6              |              |             | 1536,7         | 0,21                   | 8,80                 |
| 2              | 28/11/2017   | 9:10        | 1524,5         | 0,32                   | 8,44                 |
| 3              |              |             | 1522,3         | 0,65                   | 8,86                 |
| 5              |              |             | 1514,6         | 0,42                   | 8,95                 |
| 6              |              |             | 1529,2         | 0,49                   | 8,31                 |
| 2              | 28/11/2017   | 9:10        | 1521,8         | 0,18                   | 8,26                 |
| 3              |              |             | 1519,5         | 0,18                   | 8,68                 |
| 5              |              |             | 1511,6         | 0,20                   | 8,75                 |
| 6              |              |             | 1526,4         | 0,18                   | 8,13                 |
| 2              | 29/11/2017   | 9:30        | 1514,1         | 0,51                   | 7,75                 |
| 3              |              |             | 1512,7         | 0,45                   | 8,23                 |
| 5              |              |             | 1505           | 0,44                   | 8,31                 |
| 6              |              |             | 1518,9         | 0,49                   | 7,63                 |
| 2              | 29/11/2017   | 9:30        | 1511,7         | 0,16                   | 7,59                 |
| 3              |              |             | 1504,3         | 0,56                   | 7,67                 |
| 5              |              |             | 1496,4         | 0,57                   | 7,54                 |
| 6              |              |             | 1518,9         | 0,00                   | 7,63                 |

La probeta No. 5 resaltada en color, fue la que se tomó para el ensayo del primer ciclo.

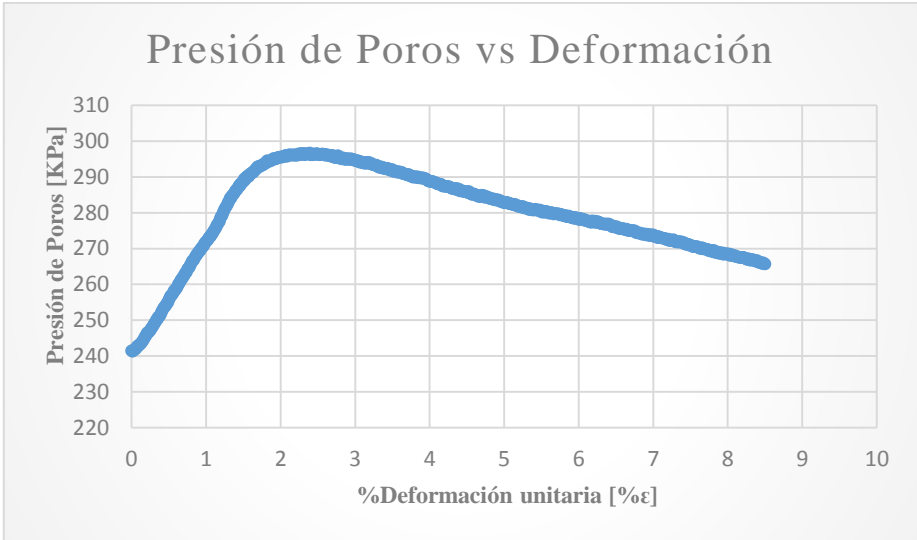
**Anexo 21. Gráfica de pérdida de humedad de las probetas.**



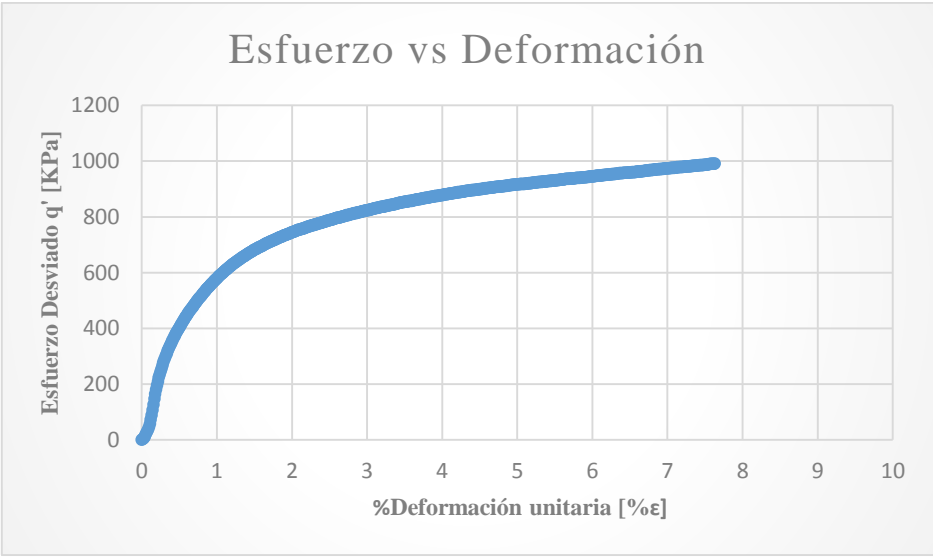
**Anexo 22. Gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria de la primera probeta (con humedad del 13.5%).**



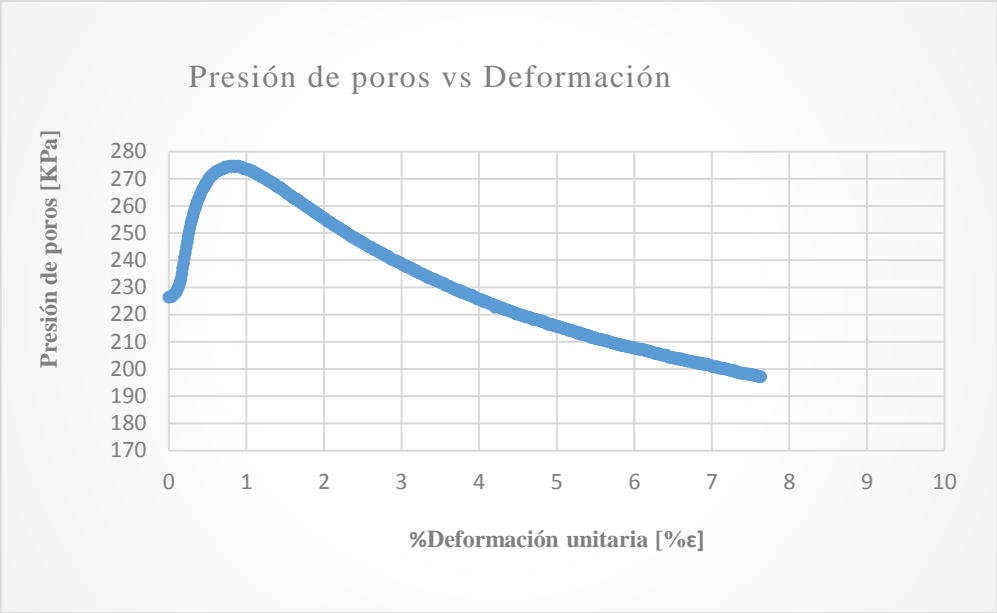
**Anexo 23. Gráfica de presión de poros vs deformación unitaria de la primera probeta (con humedad del 13.5%) durante la etapa de falla.**



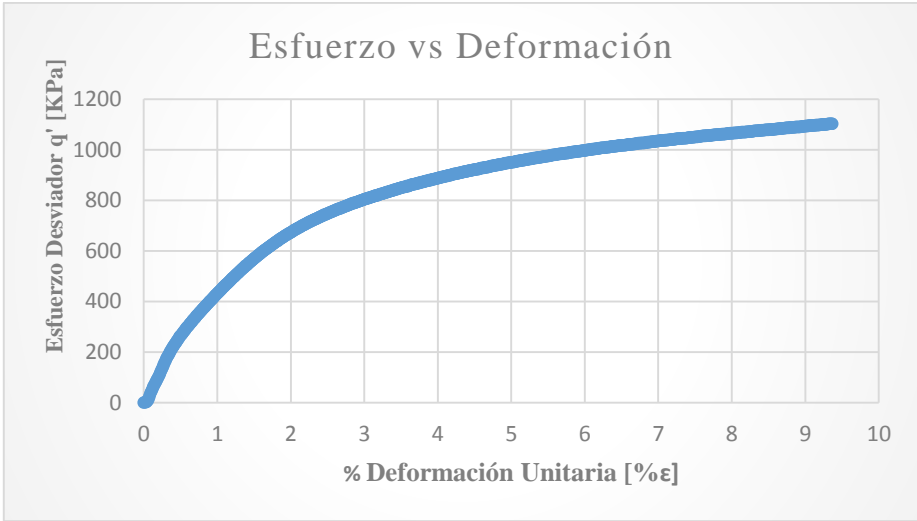
**Anexo 24. Gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria de la segunda probeta (con humedad del 7.5%).**



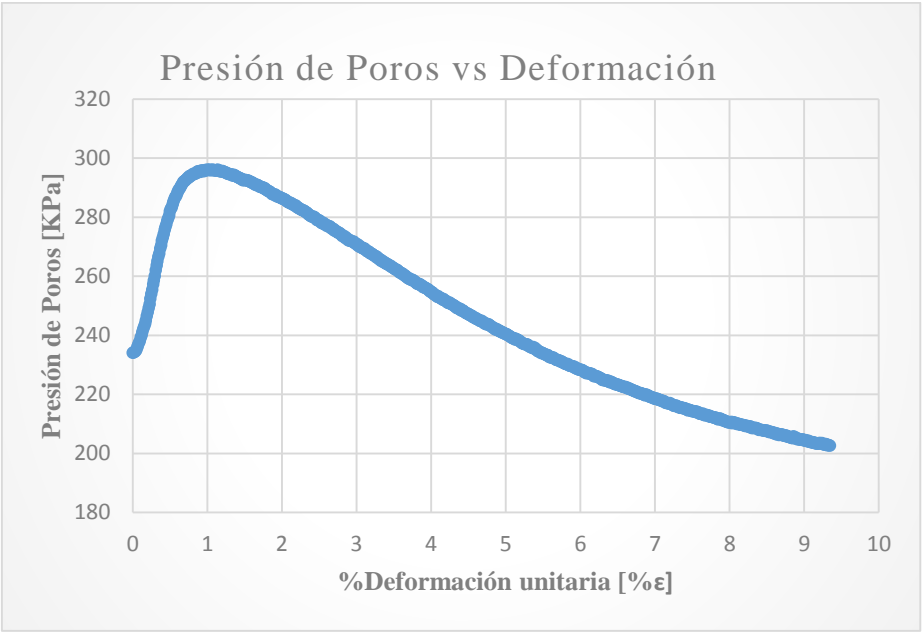
**Anexo 25. Gráfica de presión de poros vs deformación de la segunda probeta (con humedad del 7.5%) durante la etapa de falla.**



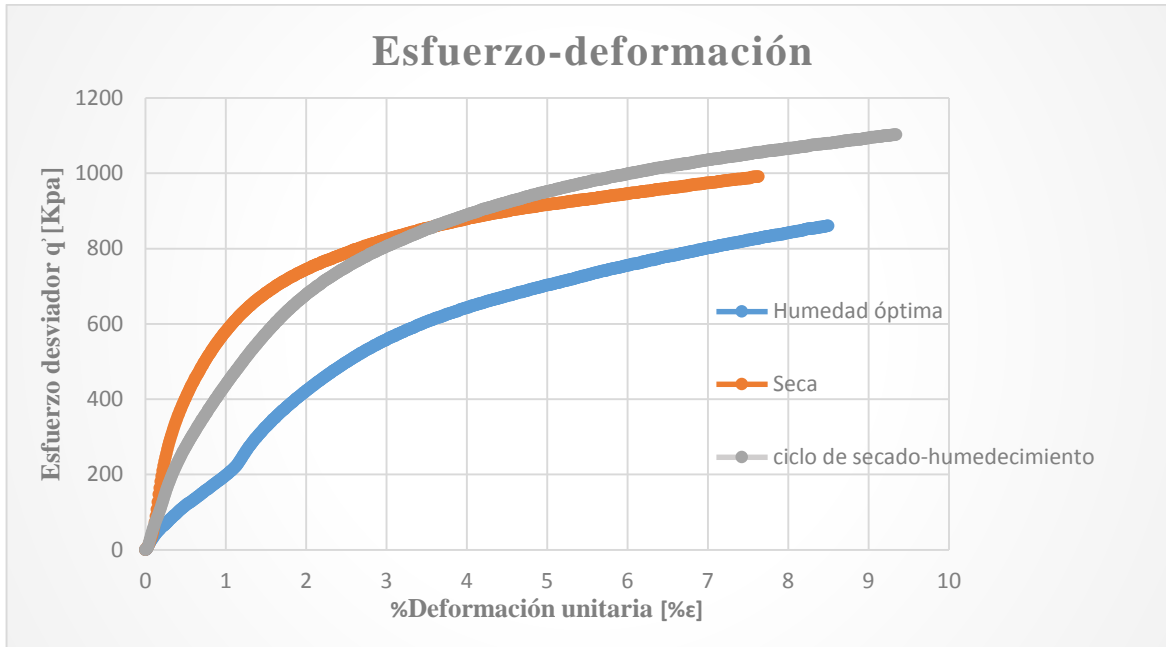
**Anexo 26. Gráfica de esfuerzo vs deformación de la tercera probeta (sometida a ciclo de secado y humedecimiento).**



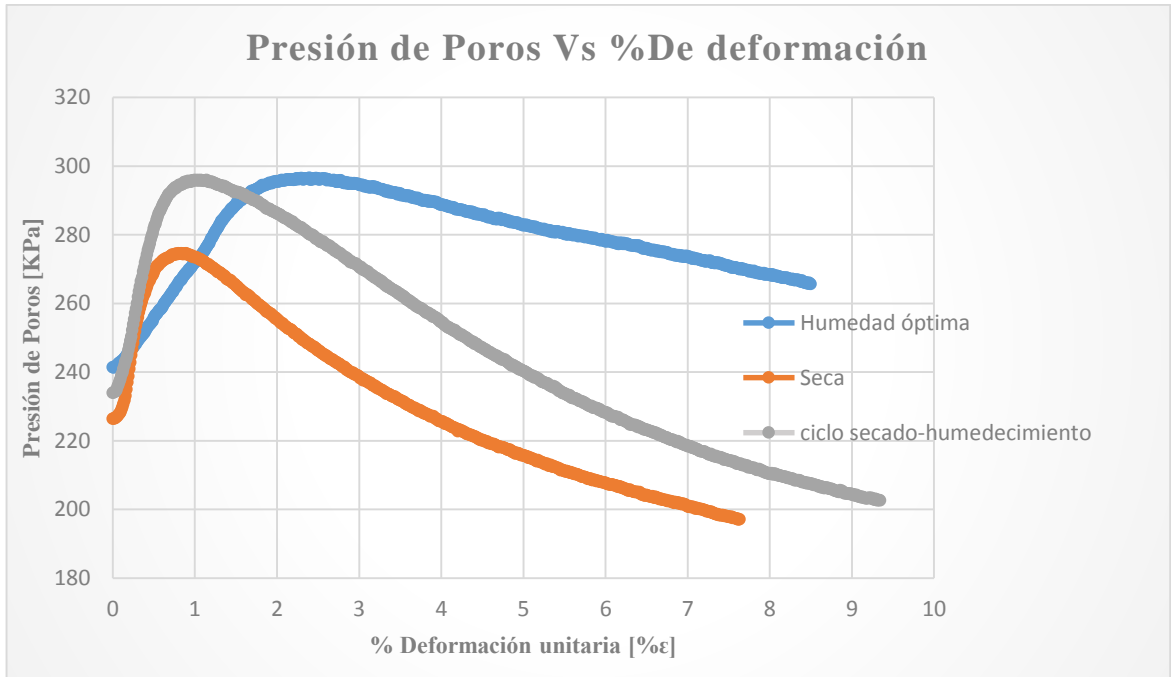
**Anexo 27. Gráfica de presión de poros vs deformación de la tercera probeta (sometida a ciclo de secado y humedecimiento) durante la etapa de falla.**



Anexo 28. Gráfica de esfuerzo vs deformación para los tres especímenes.



**Anexo 29. Gráfica de presión de poros vs deformación unitaria para los tres especímenes durante la etapa de falla.**



**Anexo 30. Datos del ensayo triaxial para la primera probeta (con humedad óptima del 13.5%).**

| <b>ENSAYO TRIAXIAL HUMEDAD ÓPTIMA</b>         |         |                    |  |
|---|---------|--------------------|--|
| TIPO DE ENSAYO: Consolidado no drenado (CU)   |         |                    |  |
| TIPO DE MUESTRA: Alterada                     |         |                    |  |
| DURACIÓN TOTAL DEL ENSAYO: 43.66 [hr]         |         |                    |  |
| CONDICIONES DEL ESPÉCIMEN                     |         |                    |  |
| Condiciones iniciales                         |         |                    |  |
| Altura  | 140     | [mm]               |  |
| Diámetro                                      | 70      | [mm]               |  |
| Área  | 3848.36 | [mm <sup>2</sup> ] |  |
| Condiciones Después de Etapa De Saturación    |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 300     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 282     | [KPa]              |  |
| $\Delta\sigma_3$                              | 50      | [KPa]              |  |
| $\Delta U$                                    | 45.8    | [KPa]              |  |
| Parámetro B                                   | 0.916   | [%]                |  |
| Condiciones Después de Etapa de Consolidación |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 344     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 240.87  | [KPa]              |  |
| Esfuerzo de consolidación efectivo            | 100     | [KPa]              |  |
| Etapa de Falla                                |         |                    |  |
| Presión de cámara inicial                     | 344     | [KPa]              |  |
| Presión de poros inicial                      | 241.49  | [KPa]              |  |
| Velocidad de falla                            | 0.1     | [mm/min]           |  |
| Esfuerzo desviador máximo                     | 860.2   | [KPa]              |  |
| Deformación axial                             | 8.49    | [%]                |  |
| Tiempo de falla                               | 2.33    | [hr]               |  |

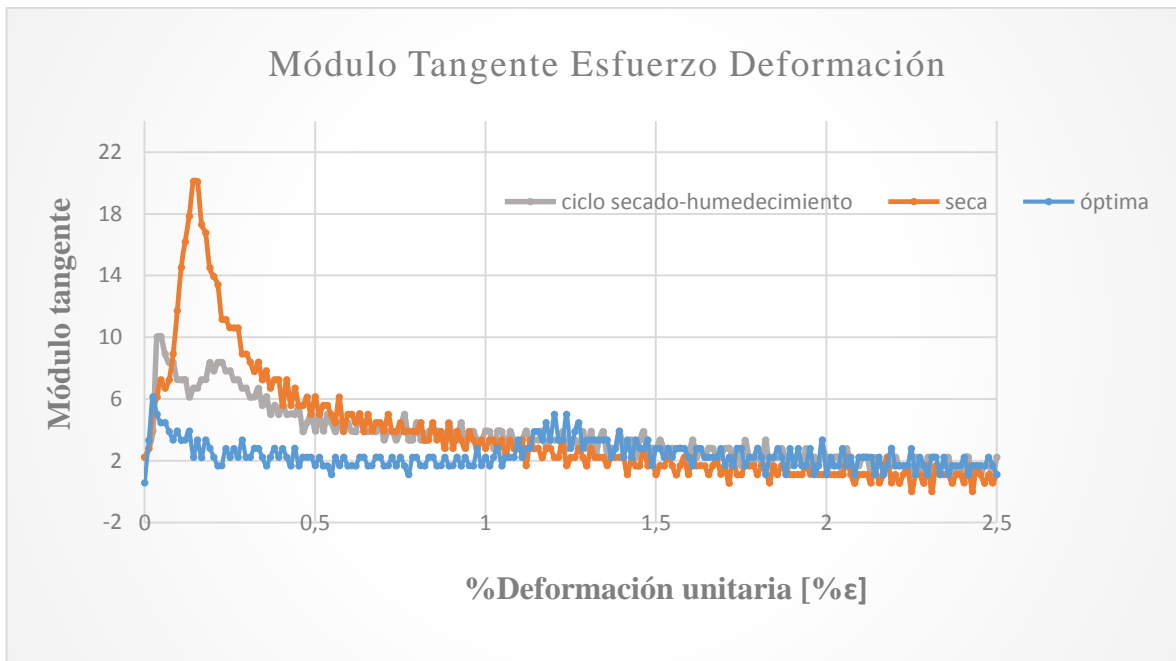
**Anexo 31. Datos del ensayo triaxial para la segunda probeta (ciclo seco: humedad del 7.5%).**

| <b><u>ENSAYO TRIAXIAL SECA</u></b>            |         |                    |  |
|---|---------|--------------------|--|
| TIPO DE ENSAYO: Consolidado no drenado (CU)   |         |                    |  |
| TIPO DE MUESTRA: Alterada                     |         |                    |  |
| DURACIÓN TOTAL DEL ENSAYO: 48.13 [hr]         |         |                    |  |
| <b>CONDICIONES DEL ESPÉCIMEN</b>              |         |                    |  |
| Condiciones iniciales                         |         |                    |  |
| Altura  | 140     | [mm]               |  |
| Diámetro                                      | 70      | [mm]               |  |
| Área  | 3848.36 | [mm <sup>2</sup> ] |  |
| Condiciones Después de Etapa De Saturación    |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 350     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 332     | [KPa]              |  |
| $\Delta\sigma_3$                              | 50      | [KPa]              |  |
| $\Delta U$                                    | 46.2    | [KPa]              |  |
| Parámetro B                                   | 0.924   | [%]                |  |
| Condiciones Después de Etapa de Consolidación |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 324     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 223.4   | [KPa]              |  |
| Esfuerzo de consolidación efectivo            | 100     | [KPa]              |  |
| Etapa de Falla                                |         |                    |  |
| Presión de cámara inicial                     | 324     | [KPa]              |  |
| Presión de poros inicial                      | 226.4   | [KPa]              |  |
| Velocidad de falla                            | 0.1     | [mm/min]           |  |
| Esfuerzo desviador máximo                     | 990.87  | [KPa]              |  |
| Deformación axial                             | 7.63    | [%]                |  |
| Tiempo de falla                               | 2.33    | [hr]               |  |

**Anexo 32. Datos del ensayo triaxial para la tercera probeta (ciclo seco-húmedo)**

| <b><u>ENSAYO TRIAXIAL SECA</u></b>            |         |                    |  |
|---|---------|--------------------|--|
| TIPO DE ENSAYO: Consolidado no drenado (CU)   |         |                    |  |
| TIPO DE MUESTRA: Alterada                     |         |                    |  |
| DURACIÓN TOTAL DEL ENSAYO: 48.94 [hr]         |         |                    |  |
| CONDICIONES DEL ESPÉCIMEN                     |         |                    |  |
| Condiciones iniciales                         |         |                    |  |
| Altura  | 140     | [mm]               |  |
| Diámetro                                      | 70      | [mm]               |  |
| Área  | 3848.36 | [mm <sup>2</sup> ] |  |
| Condiciones Después de Etapa De Saturación    |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 299     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 280     | [KPa]              |  |
| $\Delta\sigma_3$                              | 50      | [KPa]              |  |
| $\Delta U$                                    | 47.03   | [KPa]              |  |
| Parámetro B                                   | 0.9406  | [%]                |  |
| Condiciones Después de Etapa de Consolidación |         |                    |  |
| Presión de cámara                             | 340     | [KPa]              |  |
| Contrapresión                                 | 241     | [KPa]              |  |
| Esfuerzo de consolidación efectivo            | 100     | [KPa]              |  |
| Etapa de Falla                                |         |                    |  |
| Presión de cámara inicial                     | 341     | [KPa]              |  |
| Presión de poros inicial                      | 234.01  | [KPa]              |  |
| Velocidad de falla                            | 0.1     | [mm/min]           |  |
| Esfuerzo desviador máximo                     | 1102.53 | [KPa]              |  |
| Deformación axial                             | 9.36    | [%]                |  |
| Tiempo de falla                               | 2.33    | [hr]               |  |

**Anexo 33. Gráfica modulo tangente esfuerzo deformación.**



**Anexo 34. Gráfica Esfuerzo de presión de poros normalizada durante la etapa de falla.**

