

**Efectos en la resistencia de muestras estabilizadas sometidas a un ciclo de secado-  
humedecimiento**

**Daniel Camilo Jaramillo Sánchez, Nidia Alejandra Carreño Moncada**

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

**Director:**

**Jorge Alejandro Mendoza Rizo**

**Doctor en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2019**

### **Agradecimientos**

A DIOS, el autor, el gestor y quien hizo posible la culminación de forma satisfactoria de mi proceso académico.

Todo lo que soy se lo debo a Él y le agradezco por estar ahí conmigo para ayudarme a sortear las adversidades que hubo en el camino, a ser mejor en todos los aspectos de mi vida y hoy por hoy ser un orgullo para mi familia.

Agradezco y pongo en alto su nombre, gracias a mi madre, la señora Gloria Elsa Carreño Moncada, mi motor, mi gran amor, a mis hermanos, a mi director y codirector de tesis quien creyó en mí, a mi trabajo que me permitió de una forma u otra cumplir con mis obligaciones, al exceso de madres y ángeles que Dios me cruzó en el camino, la señora Patricia Vásquez, Nicole Silva Vásquez, a la señora Melba Sánchez y a todos los que de una u otra forma han aportado a mí crecimiento personal, académico y profesional.

***Nidia Alejandra Carreño Moncada***

## Contenido

|                                                             | Pág. |
|-------------------------------------------------------------|------|
| Introducción .....                                          | 12   |
| 1. Marco teórico .....                                      | 16   |
| 1.1 Ensayo triaxial .....                                   | 16   |
| 1.1.1 Procedimiento. ....                                   | 17   |
| 1.1.2 Tipos de ensayo Triaxial. ....                        | 17   |
| 1.1.3 Fase de consolidación. ....                           | 18   |
| 1.2 Criterio de Falla Mohr-Coulomb .....                    | 19   |
| 1.3 Bentonita .....                                         | 21   |
| 1.3.1 Bentonita sódica. ....                                | 21   |
| 2. Objetivos .....                                          | 22   |
| 2.1 Objetivo general .....                                  | 22   |
| 2.2 Objetivos específicos .....                             | 22   |
| 3. Metodología .....                                        | 23   |
| 3.1 Fundamentación del proyecto .....                       | 23   |
| 3.2 Selección del material .....                            | 24   |
| 3.3 Caracterización del material .....                      | 25   |
| 3.3.1 Caracterización geotécnica del suelo sin tratar. .... | 25   |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 3.4 Elaboración de las probetas. ....        | 26 |
| 3.5 Ciclo de secado-humedecimiento. ....     | 30 |
| 3.6 Ejecución de ensayos triaxiales. ....    | 33 |
| 4. Resultados .....                          | 34 |
| 4.1 Comportamiento Esfuerzo-Deformación..... | 34 |
| 4.2 Variación volumétrica.....               | 40 |
| 5. Conclusiones .....                        | 41 |
| Referencias bibliográficas.....              | 44 |

**Lista de figuras**

|                                                                                                          | <b>Pág.</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Diagrama de flujo de estabilización de suelos.....                                      | 14          |
| <i>Figura 2.</i> Ensayo triaxial. ....                                                                   | 16          |
| <i>Figura 3.</i> Ensayo Consolidado- no Drenado (CU). ....                                               | 18          |
| <i>Figura 4.</i> Envolvente de falla de Mohr.....                                                        | 20          |
| <i>Figura 5.</i> Bentonita. ....                                                                         | 21          |
| <i>Figura 6.</i> Composición mineralógica de la bentonita.....                                           | 24          |
| <i>Figura 7.</i> Propiedades de la bentonita. ....                                                       | 24          |
| <i>Figura 8.</i> Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico.....                             | 25          |
| <i>Figura 9.</i> Resultados del ensayo líquido.....                                                      | 25          |
| <i>Figura 10.</i> Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico del presente proyecto.....      | 26          |
| 3.4 Elaboración de las probetas. ....                                                                    | 26          |
| <i>Figura 11.</i> Masas de bentonita, cal y agua usadas para la elaboración de las probetas. ....        | 27          |
| <i>Figura 13.</i> Cantidad de arcilla bentonita, previamente secada en horno.....                        | 27          |
| <i>Figura 14.</i> Elementos combinados entre sí de forma manual, en busca de homogenizar la muestra..... | 28          |
| <i>Figura 15.</i> Mezcla homogénea sometida a 7 días de curado.....                                      | 28          |
| <i>Figura 16.</i> Dimensiones de la probeta.....                                                         | 29          |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 17.</i> Etapa de secado de la probeta 1. ....                                                                                                                                                    | 30 |
| <i>Figura 18.</i> Etapa de humedecimiento de la probeta 1. ....                                                                                                                                            | 31 |
| <i>Figura 19.</i> Etapa de secado de la probeta 2. ....                                                                                                                                                    | 31 |
| <i>Figura 20.</i> Etapa de humedecimiento probeta 2. ....                                                                                                                                                  | 32 |
| <i>Figura 21.</i> Etapa de secado de la probeta 3. ....                                                                                                                                                    | 32 |
| <i>Figura 22.</i> Etapa de humedecimiento de la probeta 3. ....                                                                                                                                            | 33 |
| <i>Figura 23.</i> Montaje de la máquina triaxial (CU). ....                                                                                                                                                | 34 |
| <i>Figura 24.</i> Resultado experimental del ensayo triaxial CU con muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento. a) $\sigma_3=50$ [kPa], b) $\sigma_3=100$ [kPa], c) $\sigma_3=150$ [kPa]. .... | 36 |
| <i>Figura 25.</i> Resultado experimental del ensayo triaxial CU sin cambios de humedad. .a) $\sigma_3=20$ [kPa], b) $\sigma_3=50$ [kPa], c) $\sigma_3=150$ [kPa]. ....                                     | 37 |
| <i>Figura 26.</i> Envolvente de falla de muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento. ..                                                                                                        | 38 |
| <i>Figura 27.</i> Envolvente de falla de muestras sin cambios de humedad. ....                                                                                                                             | 38 |
| <i>Figura 28.</i> Diferencia entre envolventes de falla. Envolvente de falla 1: Sin cambios de humedad. Envolvente de falla 2: Con ciclo secado-humedecimiento .....                                       | 39 |
| <i>Figura 29.</i> Comparativa de la cohesión y el ángulo de fricción antes y después del ciclo secado-humedecimiento. ....                                                                                 | 40 |
| <i>Figura 30.</i> Cambio volumétrico de las muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento. ....                                                                                                   | 41 |

### Resumen

**Título:** Efectos en la resistencia de muestras estabilizadas sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento\*

**Autores:** Daniel Camilo Jaramillo Sánchez\*\*  
Nidia Alejandra Carreño Moncada

**Palabras Clave:** Arcillas expansivas, efectos de la humedad, resistencia al corte, cohesión, ángulo de fricción.

### Descripción

En este artículo se presentan los resultados de la investigación del comportamiento de muestras de arcillas bentónicas estabilizadas con cal, sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento cuyo objetivo consiste en evaluar su influencia en la resistencia al corte y observar los cambios producidos en sus propiedades físicas y mecánicas. Este estudio se basa en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, que afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y cortante, que representados mediante el círculo de Mohr permita la determinación de esfuerzos principales que, confinado a diferentes estados sea posible obtener distintos valores de resistencia en la falla y así establecer gráficamente una envolvente de resistencia. Se realizó un chequeo de los límites de Atterberg para posteriormente someter tres muestras estabilizadas a ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado con medición de poros. De resultados obtenidos en ensayos de las muestras anteriormente nombradas se realizó una comparación cuantitativa con información proporcionada en estudios anteriores de muestras que no fueron sometidas a cambios de humedad. De la información obtenida experimentalmente, recopilada y posteriormente analizada se evidenció una disminución considerable en la resistencia de las muestras que se sometieron a ciclos secado-humedecimiento con respecto a las que han sido estabilizadas pero que no han sufrido tal proceso.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

### Abstract

**Title:** Effects on resistance of stabilized samples subjected to a drying-wetting cycle\*

**Authors:** Daniel Camilo Jaramillo Sánchez\*\*  
Nidia Alejandra Carreño Moncada

**Keywords:** Expansive clays, moisture effects, cutting resistance, cohesion, friction angle.

### Description

This article presents the results of the investigation of the behavior of samples of benthic clays stabilized with lime, subjected to a drying-wetting cycle whose objective is to evaluate their influence on cut resistance and observe the changes produced in their physical properties and mechanical. This study is based on the Mohr-Coulomb failure criterion, which states that a material fails due to a critical combination of normal and shear stress, which, represented by the Mohr circle, allows the determination of principal efforts that, confined to different states it is possible to obtain different resistance values in the fault and thus graphically establish a resistance envelope. A check of the Atterberg limits was performed to subsequently submit three stabilized samples to tests of consolidated undrained triaxial compression with pore measurement. From the results obtained in tests of the aforementioned samples, a quantitative comparison was made with information provided in previous studies of samples that were not subjected to changes in humidity. From the information obtained experimentally, collected and subsequently analyzed, there was a considerable decrease in the resistance of the samples that were subjected to drying-wetting cycles with respect to those that have been stabilized but have not undergone such a process.

---

\* Degree work

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

## Introducción

Los suelos son materiales de mezcla compleja en los que es posible identificar diferentes tipos: arenosos, calizos, limosos, arcillosos, pedregosos entre otros.

Los suelos expansivos constan de agregados a una variedad de materiales los cuales mayoritariamente no son expandibles en presencia de humedad. Las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad, adquirida por capilaridad y/o por infiltración. Cualquier construcción ligera asentada sobre este tipo de suelos experimentará deformaciones causadas por la expansión de la arcilla, dichos movimientos se traducen en grietas sobre muros y el levantamiento de pisos.

Cuando los suelos se componen de una gran cantidad de minerales expansivos, estos suelen adoptar alto potencial de dilatación significativa, su contenido de humedad debe mantenerse constante con la finalidad de mitigar los impactos negativos a largo plazo, por lo que es fundamental mantener los suelos con humedad estable o aislar el terreno ante cualquier cambio de volumen del suelo que pueda ocurrir.

Intuitivamente en ingeniería civil, los terrenos rocosos son sinónimo de solidez, firmeza y resistencia, debido a que encontrar un sustrato de suelo con mayor proximidad que aporte estas características evitará que requiera cimentar a gran profundidad y esto resulta siendo un factor positivo a la hora de reducir costos de cimentación y construcción. Los suelos con altos contenidos de gravas son aptos en la construcción de cimientos con capacidad de carga que brinden estabilidad considerable y un estado de confort para el usuario. Es por ello que pensar en un suelo fino se ha descartado con fuertes argumentos, debido a los problemas que presenta en cambios volumétricos

y de resistencia.

Los suelos arcillosos están compuestos por un conjunto de partículas minerales muy pequeñas con diámetros  $<2\ \mu$ , aunque pueden contener porciones de limos y arenas, siempre predominan las arcillas. (García & Suárez, 2009)

En la actualidad la presencia de este tipo de suelos se ha convertido en algo difícil de eludir aun cuando representan un sin fin de problemas de estabilidad. Las arcillas son materiales geológicamente hablando que poseen grandes propiedades ingenieriles, sin embargo, al hacer uso de este tipo de suelos es necesario implementar soluciones en los que se involucren cambios en las propiedades físicas y químicas del sustrato en busca de mejorar propiedades físico-mecánicas tales como la resistencia. Las acciones previas a la estabilización de un suelo se presentan en la **Figura 1**. (Higuera Sandoval, 2010)

Por otra parte, en el transcurso de los últimos años, las arcillas han cobrado un interés especial y por ello se hace importante conocer la forma en la que se comporta el suelo desde el punto de vista de lo microestructural antes de tomar una decisión que involucre geotecnia adecuada.

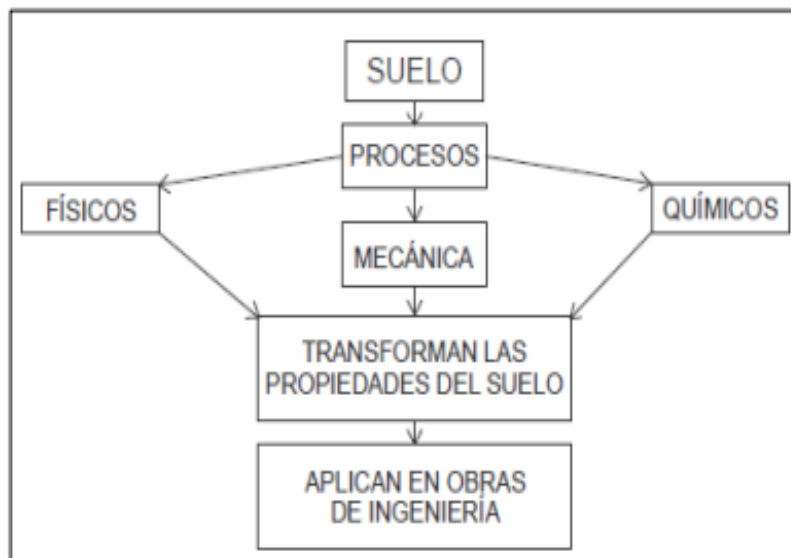
El siguiente proyecto establece una serie de respuestas a hipótesis en las que apoyados en premisas facilitan el entendimiento de los efectos causados por los ciclos ambientales humedecimiento-secado en virtud de la resistencia, comprender el manejo que se le ha venido dando y las posibles soluciones a inconvenientes que se presenten, establecer y resolver preguntas tales como: ¿Qué sucede cuando este tipo de suelo se someta a cambios en condiciones medioambientales si se sabe que anteriormente ya ha sido estabilizado?

Toda construcción ligera que se encuentre asentada sobre un suelo arcilloso experimentará deformaciones causadas por su expansión si hay interacción con el agua, una solución muy común es modificar las propiedades físico-químicas agregando un material que mejore su estabilidad, sin

embargo, cuando la solución de dicha problemática se encuentra establecida, existen razones para pensar que en el estudio de los suelos estabilizados no se le da importancia a las afectaciones que puedan llegar a generarse al estar expuestos a ciertos cambios de humedad.

Un suelo compactado ha soportado el proceso en el cual una tensión aplicada genera una densificación a medida que el aire recorre a través de los poros entre los granos del suelo, al aplicar una tensión que causa la densificación debido al desplazamiento del fluido (por lo general agua) entre los granos de suelo produciendo la consolidación y no la compactación.

La compactación del suelo se produce por la combinación de la ingeniería de compactación y la consolidación, por lo que se puede ver reflejado la falta de agua en el suelo, siendo el esfuerzo aplicado la succión interna debido a la evaporación del agua.



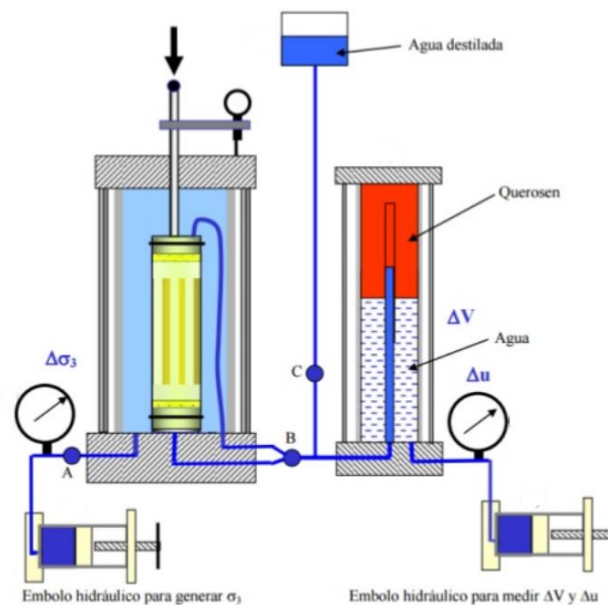
*Figura 1.* Diagrama de flujo de estabilización de suelos. Adaptado de Higuera Sandoval, C. H. (2010) Estabilización de suelos. Popayán.

El presente estudio se basa en anteriores investigaciones sobre la estabilización con cal de muestras de arcilla bentonita, donde mediante ensayos triaxiales no drenados se halló la curva de esfuerzo-deformación determinando así la envolvente de falla.

## 1. Marco teórico

### 1.1 Ensayo triaxial

Este ensayo tiene como finalidad obtener parámetros del suelo y la relación esfuerzo-deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante de una muestra cilíndrica de suelo



*Figura 2.* Ensayo triaxial. Adaptado de Sánchez Albornoz, Indira Luz. (13 de dic. de 2015). Ensayo triaxial consolidado no drenado. Disponible en: <https://es.slideshare.net/Tsukimira/ensayo-triaxial-consolidado-no-drenado>

**1.1.1 Procedimiento.** Consiste en colocar la muestra de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, que se introduce en una cámara especial y se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección. Alcanzado ese estado de equilibrio, se aumenta la presión normal o axial, sin modificar la presión lateral aplicada, hasta que se produzca la falla.

**1.1.2 Tipos de ensayo Triaxial.** Los métodos descritos son: el ensayo no consolidado no drenado (UU), el ensayo de compresión triaxial consolidado drenado (CD) y el ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU). Los parámetros obtenidos son la cohesión no drenada del suelo o el ángulo de fricción interna y la cohesión. (Instituto Nacional de Vías., 2007)

**1.1.2.1 Ensayo Consolidado- no Drenado (CU):** Este método cubre la determinación de los esfuerzos y de las relaciones esfuerzo- deformación de una muestra cilíndrica de suelo compactada o remoldeada. Las muestras son sujetas a un confinamiento por la presión que ejercerá un fluido en una cámara del triaxial. El drenaje de la muestra no se permite durante la prueba y ni en el corte por compresión, el cual se realizará a una velocidad constante de deformación axial (deformación controlada). (Instituto Nacional de Vías., 2007)

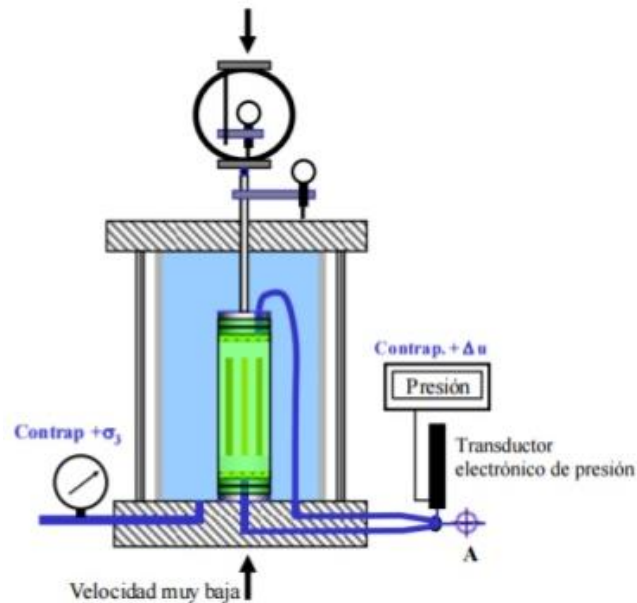


Figura 3. Ensayo Consolidado- no Drenado (CU). Adaptado de Sánchez Alborno, Indira Luz. (13 de dic. de 2015). Ensayo triaxial consolidado no drenado. Disponible en: <https://es.slideshare.net/Tsukimira/ensayo-triaxial-consolidado-no-drenado>

**1.1.3 Fase de consolidación.** Tan pronto como la muestra se encuentre en estado de saturación, la probeta de suelo se procede a consolidar. Seguidamente se aplica en ella una presión de confinamiento durante pequeños intervalos con el fin de no alterar la muestra, se incrementa la presión progresivamente hasta alcanzar la presión de confinamiento requerida en cada caso. Una vez la presión solicitada alcance el confinamiento total, la muestra se dejará consolidar el tiempo que sea necesario.

Una vez sea alcanzado la consolidación, se determinará la variación de volumen a la que ha sido sometida por efectos de la consolidación, debido a la presión que se ejerció sobre la probeta. A dicho valor es necesario adicionar las respectivas deformaciones las cuales se obtendrán de manera acumulativa

## 1.2 Criterio de Falla Mohr-Coulomb

Es una teoría de ruptura que afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o de un esfuerzo máximo cortante. Por lo cual, la relación entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla se expresa en la siguiente ecuación.

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1)$$

Donde:

$\tau_f$  = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

$\sigma$  = esfuerzo normal sobre el plano de falla

La envolvente de falla definida por la ecuación es una línea curva. Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal, lo cual se conoce como el criterio de falla Mohr-Coulomb como se presenta en la ecuación 2. (Braja, 2001)

$$\tau_f = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (2)$$

Donde:

$c$  = Cohesión

$\phi$  = Ángulo de fricción interna

$\sigma$  = Tensión normal

$\tau$  = Esfuerzo cortante

En la Figura 4 se observa que, si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A, entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto B (sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla de cortante a lo largo de ese plano. Un estado de esfuerzo ubicado en el punto C no existe, porque queda por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habría ocurrido en el suelo. (Valerio, 2011)

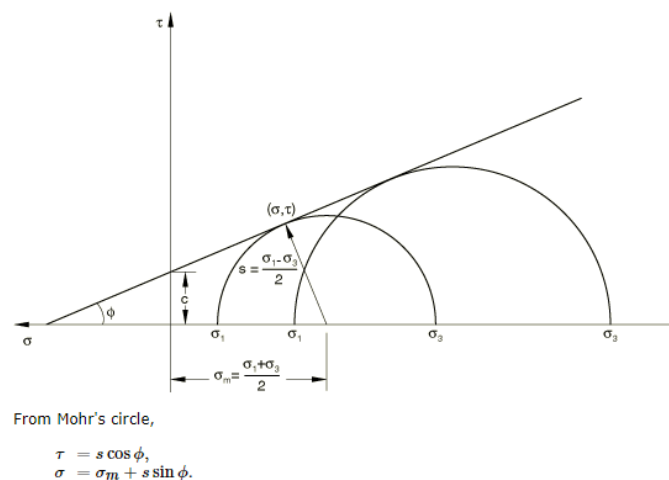


Figura 4. Envolvente de falla de Mohr

### 1.3 Bentonita

La bentonita es una arcilla de filosilicato de aluminio que consiste principalmente en montmorillonita, generalmente se forma a partir de la intemperie de las cenizas volcánicas, la mayoría de las veces en presencia de agua. Su principal característica es una gran capacidad de absorción y adsorción. Para fines industriales, existen dos clases principales de bentonita: bentonita de sodio y calcio. (Hosterman & Patterson, 1992)



*Figura 5.* Bentonita. Adaptado de Ecured. Bentonit. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Bentonita>

**1.3.1 Bentonita sódica.** La bentonita sódica al tener grandes cantidades de sodio puede llegar a expandirse hasta 15 veces su volumen cuando se humedece. Debido a sus excelentes propiedades coloidales, a menudo se utiliza en la perforación de lodos para pozos de petróleo y gas, perforaciones para investigaciones geotécnicas y ambientales. La propiedad de la hinchazón también hace que la bentonita de sodio sea útil como sellador, ya que proporciona un auto-sellado creando una barrera de baja permeabilidad. (Theng, 1979)

## 2. Objetivos

El objetivo de este proyecto consistió en evaluar la resistencia y el cambio volumétrico de muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento con ensayos triaxiales consolidados no drenados en busca de establecer la envolvente de falla y poder comparar los resultados obtenidos con muestras anteriormente analizadas sin dicho ciclo. De igual forma, evaluar afectaciones en la resistencia que sufren las arcillas que contienen agentes estabilizadores cuando están siendo afectadas por cambios fuertes de humedad, de lo anterior se establecen los siguientes objetivos, uno general y tres específicos.

### 2.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de un ciclo de secado-humedecimiento sobre la resistencia y cambio volumétrico de muestras de arcilla bentónica estabilizada con cal (CaO).

### 2.2 Objetivos específicos

- Establecer una envolvente de resistencia para muestras estabilizadas sometidas a un proceso de secado al aire y posterior saturación en el equipo triaxial.
- Analizar el comportamiento volumétrico de las muestras durante la fase de saturación y consolidación.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados en términos de resistencia con muestras

saturadas y parcialmente saturadas sin procesos de secado.

### **3. Metodología**

La metodología a utilizar se plantea y divide en cuatro partes principales pensadas para el óptimo desarrollo del siguiente estudio

#### **3.1 Fundamentación del proyecto**

El presente estudio continúa la línea de investigación planteada en los trabajos de grado, Arias, Cordero, (2018) y Durán, Pinzón, (2017), de donde se obtuvo parámetros e información relevante, tales como el porcentaje óptimo de cal, asimismo dimensiones de la probeta a elaborar. Se extrajo resultados que seguidamente permitió la respectiva comparación numérica con el proyecto que se elaboró y desarrolló en el presente documento.

De los trabajos de Arias, Cordero, (2018) y Durán, Pinzón, (2017), se toma como referencia: el diseño de la mezcla suelo-cal, el tiempo de curado y las dimensiones de las probetas, con la diferencia radicada en que las muestras del presente serán sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento.

### 3.2 Selección del material

Para la elaboración de las probetas se utiliza Bentonita sódica. Este es un material arcilloso que en presencia de agua se expande a causa de su alta composición mineralógica de montmorillonita.

Algunas de las propiedades relevantes del material se adjuntan en la **Tabla 2**.

| Sustancia                           | Cantidad (%) |
|-------------------------------------|--------------|
| Sílice ( $\text{SiO}_2$ )           | 56.06        |
| Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) | 22.27        |
| Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  | 3.81         |
| Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_3$ )  | 0.17         |
| Calcio ( $\text{CaO}$ )             | 2.4          |
| Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )    | 1.12         |
| Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )     | 6.2          |
| Pérdidas a $100^\circ\text{C}$      | 7.94         |
| Total                               | 99.96        |

*Figura 6.* Composición mineralógica de la bentonita. Adaptado de: Durán J., Pinzón P.

Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

| Color                          | Amarillo<br>Claro |
|--------------------------------|-------------------|
| Humedad                        | ~12               |
| Volumen hinchamiento<br>mínimo | 25                |

*Figura 7.* Propiedades de la bentonita. Adaptado de: Durán J., Pinzón P. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

### 3.3 Caracterización del material

**3.3.1 Caracterización geotécnica del suelo sin tratar.** En Durán, Pinzón, (2017) se realizó la caracterización de los límites líquido y plástico, los cuales pueden observarse en la Tabla 3. Sin embargo, se decidió realizar de nuevo dichos ensayos, dado que los proyectos de referencia fueron realizados con aproximadamente un año de diferencia a este estudio y se optó por comprobar la similitud del material usado en dichos proyectos con el material del actual proyecto, dado que fue imposible dar uso a un material del mismo lote, y por causa de lo anterior podrían hallarse diferencias en su caracterización geotécnica generando errores en las comparaciones finales.

| LÍMITE             | %   |
|--------------------|-----|
| Líquido [ $W_L$ ]  | 130 |
| Plástico [ $W_p$ ] | 56  |

Figura 8. Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico. Adaptado de: Durán J., Pinzón P.

Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

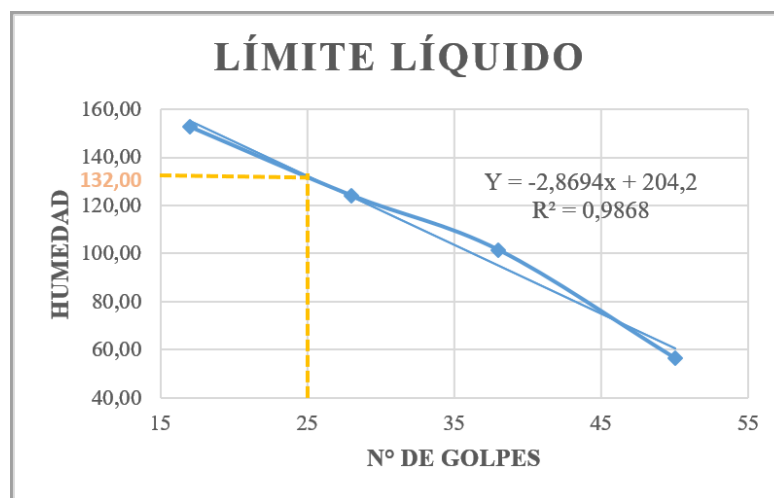


Figura 9. Resultados del ensayo líquido.

| LÍMITE             | %   |
|--------------------|-----|
| Líquido [ $W_L$ ]  | 132 |
| Plástico [ $W_p$ ] | 52  |

Figura 10. Resultados de los ensayos de límite líquido y plástico del presente proyecto.

De los datos observados del proyecto anterior (Durán & Pinzón, 2017) y los calculados para el presente proyecto se puede observar que, en efecto los materiales a usar tienen características muy similares. Haciendo uso de la norma **INV. E-132-13**, cuyo objetivo consiste en hacer uso de un método que ayude a determinar si un suelo es potencialmente expansivo, así como a los métodos para predecir la magnitud del hinchamiento que se pueda producir en el sustrato. De los datos hallados con anterioridad se prosigue con la elaboración de las probetas.

### 3.4 Elaboración de las probetas.

El diseño de las mezclas utilizadas para la elaboración de las probetas, busca asemejarse en la medida de lo posible a las probetas realizadas y elaboradas en Arias y Cordero (2018), pero analizadas y tratadas en condiciones diferentes. Sin embargo, mantener la similitud permitirá realizar una buena comparación, por lo tanto, se usan las mismas características las cuales corresponden:

- Porcentaje óptimo de cal de 9%.
- Tiempo de curado de la mezcla de siete días.
- Compactación con humedad del 28%.
- Dimensiones de las probetas cilíndricas de 7 centímetros de diámetro y 14 centímetros de

alto.

En primera instancia, se toman **1200 [g]** de arcilla bentonita. Haciendo uso de un horno a  $110^{\circ}\text{C}$ , se seca la muestra durante 12 horas, pasado dicho tiempo se dispone de los materiales.

De igual manera cada probeta se hizo con las cantidades de agua, cal y bentonita sódica,

|        |       |   |
|--------|-------|---|
| Ws+20% | 789.6 | g |
| Ww+20% | 201.6 | g |
| Wcal   | 71.0  | g |

*Figura 11.* Masas de bentonita, cal y agua usadas para la elaboración de las probetas. Adaptado de Durán J., Pinzón P. Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.



*Figura 13.* Cantidad de arcilla bentonita, previamente secada en horno.

En un recipiente se vierten los elementos sólidos y haciendo uso de una espátula se homogeniza la mezcla, en el instante en que la mezcla se encuentra lo más homogénea posible se agrega agua con un atomizador con el objetivo de no contribuir a la formación de coágulos en la mezcla.



*Figura 14.* Elementos combinados entre sí de forma manual, en busca de homogenizar la muestra

Inmediatamente se haya concluido la mezcla de los sólidos junto con el agua, se procede a cubrir el recipiente con vinipel y se deja curar durante los siguientes siete días a partir de la formación completa de la mezcla.



*Figura 15.* Mezcla homogénea sometida a 7 días de curado.



*Figura 16.* Dimensiones de la probeta

Se ensambla el molde de la probeta que se va a fallar en el equipo triaxial, se agrega una ligera capa de aceite en las paredes de este en busca de que el material no se adhiera a las mismas y al momento de retirar el molde exista un posible desprendimiento de la mezcla.

Pasados los 7 de curado se procede a la realización de la compactación, la cual cuenta con dimensiones: Altura: 14 [cm], diámetro: 7 [cm].

Una vez el molde esté montado, se procede a la debida compactación por impacto, utilizando una maza para triaxial de 0.5 [kg] de peso y dejándola caer 15 [cm], realizando 5 capas de 30 golpes por capa, habiendo realizado esto, se obtiene la probeta con las dimensiones establecidas, seguidamente se toma la masa y se envuelve en vinipel para evitar la pérdida abrupta de humedad.

### 3.5 Ciclo de secado-humedecimiento.

Seguidamente, al momento en el que la muestra se encuentra terminada en su totalidad, se expone al ambiente, a una temperatura controlada de 23° C, y se monitorea la pérdida de humedad. El control se realiza cada 30 [min]. Cuatro horas después se evidencia una pérdida de humedad aproximada de 5 %, además, la muestra presenta agrietamiento significativo (**Ver Tabla 6**). Al observar la pérdida de humedad, se procede a recuperar la humedad original con la ayuda de un atomizador, de forma tal que el procedimiento de humedecimiento se realice de manera homogénea, seguidamente se envuelve en vinipel y se mantiene a temperatura controlada en busca de obtener la estabilización, proceso que toma 15 días y cuyo objetivo consiste en recuperar la pérdida de masa de agua cada vez que la balanza demuestre una disminución de la misma. El seguimiento consiste en observar el cambio de humedad que presente y de forma inmediata humedecer, haciendo uso de la recuperación de la masa con la ayuda del atomizador (**Ver Figura 17**). Sin embargo, parte del agua con la que se recuperó la pérdida de humedad, no fue posible que se alcanzara a absorber antes de envolverla en el vinipel, lo que ocasiona el hecho que al aplicar 5 [gr] de agua la muestra sólo logre absorber 2 o 3 [gr] es decir, que a la cantidad de humedad perdida se le proporcionó 2 o 3 gramos por encima teniendo en cuenta lo que se perdía en el proceso.

| Probeta N° 1 |        |        |          |
|--------------|--------|--------|----------|
| Fecha        | Etapas | Tiempo | Peso [g] |
| 22-ene-19    | Inicio | 1 hrs  | 755      |
|              |        | 2 hrs  | 754      |
|              |        | 3 hrs  | 752      |
|              | Final  | 4 hrs  | 748      |

Figura 17. Etapa de secado de la probeta 1.

| Fecha     | Etapas | Peso [g] |
|-----------|--------|----------|
| 22-ene-19 | 1      | 755      |
| 22-ene-19 | 2      | 752      |
| 23-ene-19 | 1      | 755      |
| 23-ene-19 | 2      | 753      |
| 24-ene-19 | 1      | 755      |
| 24-ene-19 | 2      | 753      |
| 25-ene-19 | 1      | 755      |
| 25-ene-19 | 2      | 754      |
| 26-ene-19 | 1      | 755      |
| 26-ene-19 | 2      | 755      |
| 10-feb-19 | Final  | 755      |

Figura 18. Etapa de humedecimiento de la probeta 1.

Una vez la muestra haya superado los 15 días de estabilización se procede a someterlas a los ensayos triaxiales consolidados no drenados, sometidos a presiones efectivas de 50, 100 y 150 [kPa].

| Probeta N° 2 |        |        |          |
|--------------|--------|--------|----------|
| Fecha        | Etapas | Tiempo | Peso [g] |
| 30-ene-18    | Inicio | 1 hrs  | 766      |
|              |        | 2 hrs  | 764      |
|              |        | 3 hrs  | 760      |
|              | Final  | 4 hrs  | 758      |

Figura 19. Etapa de secado de la probeta 2.

| Fecha     | Etapas | Peso [g] |
|-----------|--------|----------|
| 30-ene-18 | 1      | 768      |
| 30-ene-18 | 2      | 765      |
| 31-ene-18 | 1      | 767      |
| 31-ene-18 | 2      | 765      |
| 1-feb-18  | 1      | 767      |
| 1-feb-18  | 2      | 766      |
| 2-feb-18  | 1      | 766      |
| 2-feb-18  | 2      | 765      |
| 3-feb-18  | 1      | 766      |
| 3-feb-18  | 2      | 766      |
| 14-feb-18 | Final  | 766      |

Figura 20. Etapa de humedecimiento probeta 2.

| Probeta N° 3 |        |        |          |
|--------------|--------|--------|----------|
| Fecha        | Etapas | Tiempo | Peso [g] |
| 8-mar-19     | Inicio | 1 hrs  | 772      |
|              |        | 2 hrs  | 771      |
|              |        | 3 hrs  | 768      |
|              | Final  | 4 hrs  | 765      |

Figura 21. Etapa de secado de la probeta 3.

| Fecha     | Etapas | Peso [g] |
|-----------|--------|----------|
| 8-mar-19  | 1      | 774      |
| 8-mar-19  | 2      | 772      |
| 9-mar-19  | 1      | 773      |
| 9-mar-19  | 2      | 771      |
| 10-mar-19 | 1      | 772      |
| 10-mar-19 | 2      | 771      |
| 11-mar-19 | 1      | 772      |
| 11-mar-19 | 2      | 772      |
| 12-mar-19 | 1      | 772      |
| 12-mar-19 | 2      | 772      |
| 23-mar-19 | Final  | 772      |

Figura 22. Etapa de humedecimiento de la probeta 3.

### 3.6 Ejecución de ensayos triaxiales.

Haciendo uso de la norma **INV. E-153-07**, se realizan los ensayos con un equipo triaxial estático ubicado en el laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la Escuela de Ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, teniendo en cuenta fases de saturación cercana al 100% y consolidación, una fase de rotura rápida sin drenar, puesto que, una rotura lenta en un suelo arcilloso puede demandar una gran cantidad de tiempo. Estos ensayos se miden con presión de poros, lo que permite obtener parámetros de esfuerzo efectivos, ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ). Las muestras se sometieron a presiones de confinamiento de 50 [kPa], 100 [kPa] y 150 [kPa], a una velocidad y tiempo de falla de 0.5 [mm/min] y 28 [min] respectivamente.



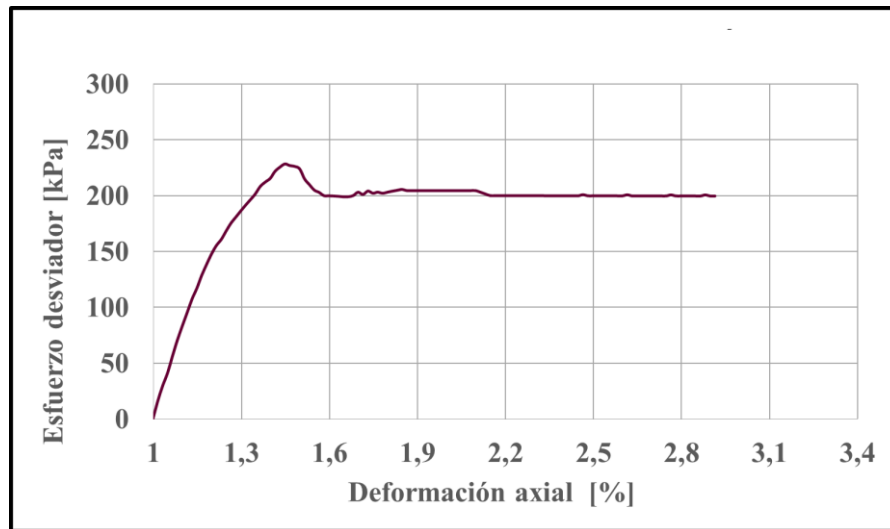
*Figura 23.* Montaje de la máquina triaxial (CU).

## **4. Resultados**

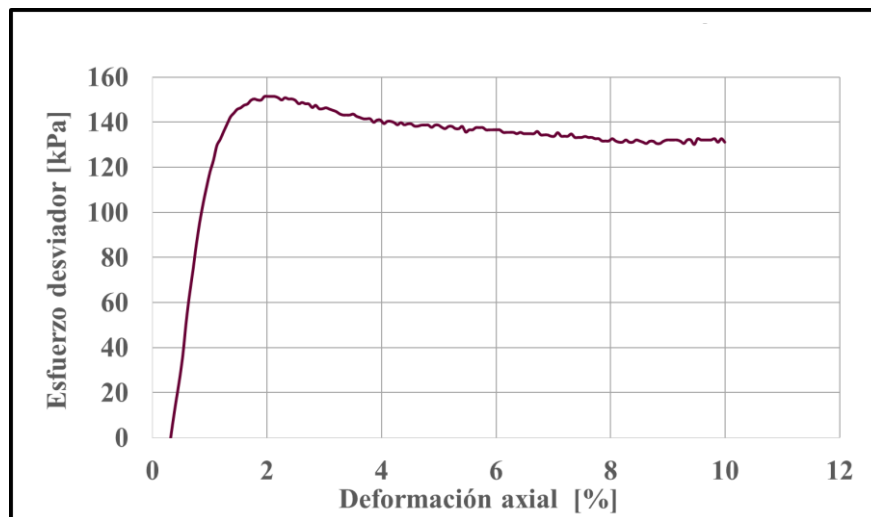
### **4.1 Comportamiento Esfuerzo-Deformación.**

De resultados obtenidos en los ensayos triaxiales se hicieron las siguientes representaciones gráficas de esfuerzo desviador vs. deformación axial de cada probeta estabilizada.

a)



b)



c)

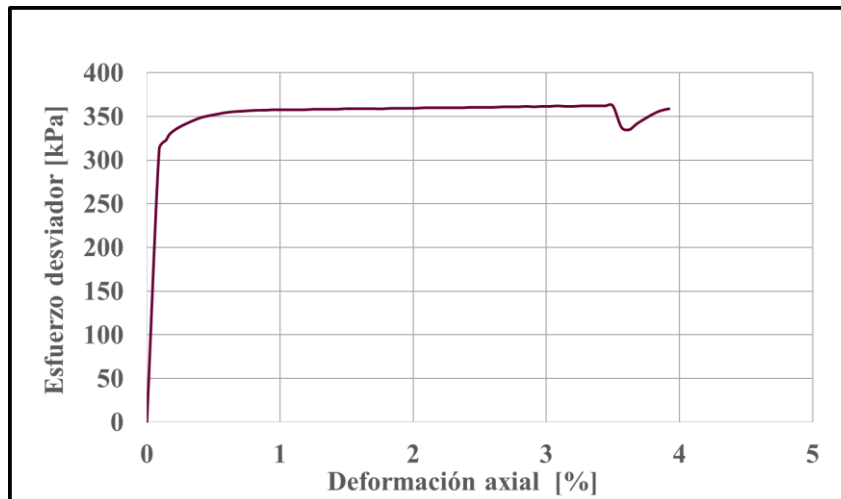
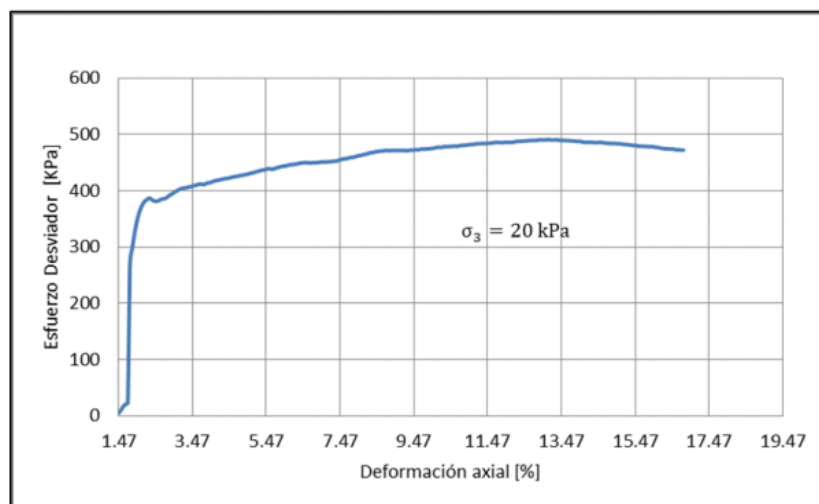
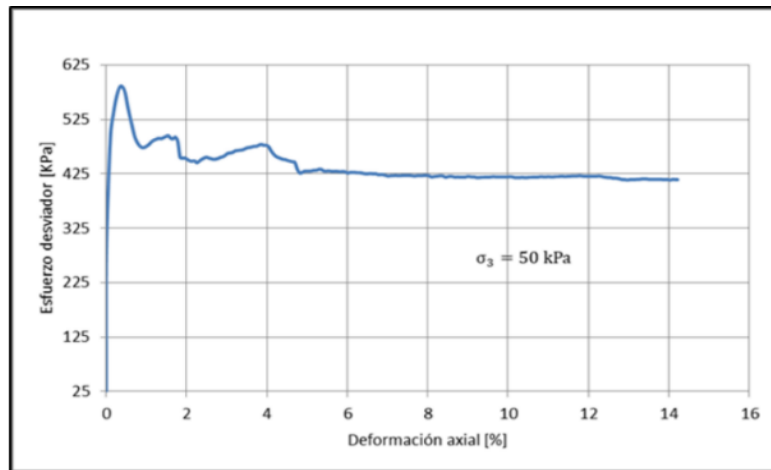


Figura 24. Resultado experimental del ensayo triaxial CU con muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento. a)  $\sigma_3=50$  [kPa], b)  $\sigma_3=100$  [kPa], c)  $\sigma_3=150$  [kPa].

a)



b)



c)

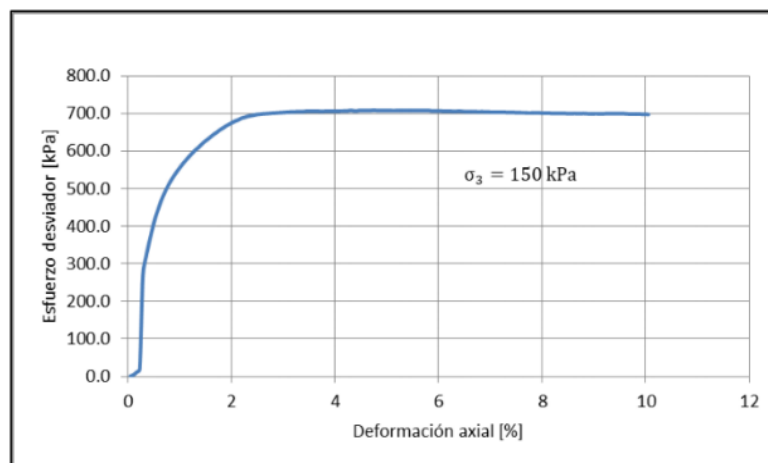


Figura 25. Resultado experimental del ensayo triaxial CU sin cambios de humedad. .a)  $\sigma_3=20$  [kPa], b)  $\sigma_3=50$  [kPa], c)  $\sigma_3=150$  [kPa]. Adaptado de Arias O., Cordero V. Estudio del comportamiento experimental de muestras de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

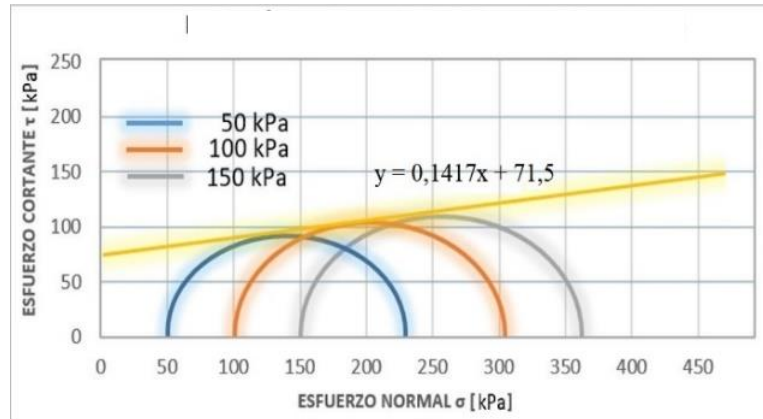


Figura 26. Envolvente de falla de muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento.

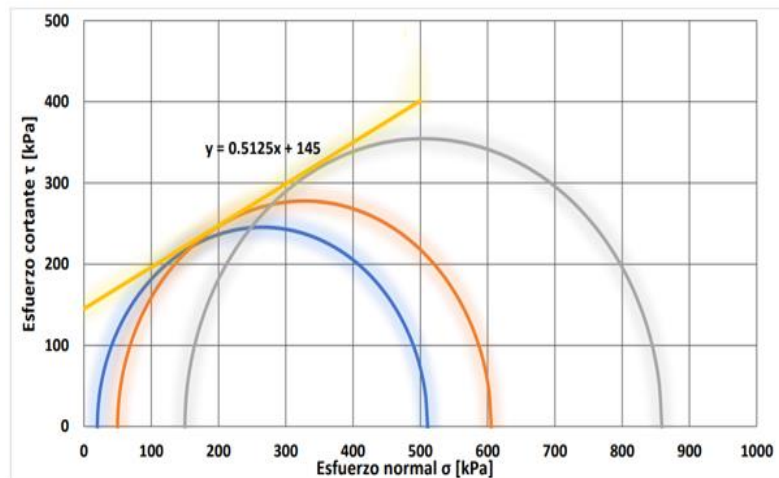


Figura 27. Envolvente de falla de muestras sin cambios de humedad. Adaptado de Arias O., Cordero V. Estudio del comportamiento experimental de muestras de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio.

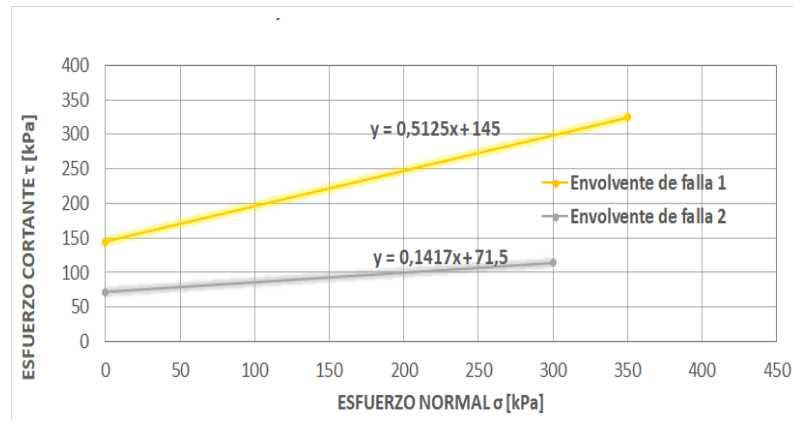


Figura 28. Diferencia entre envolventes de falla. Envolvente de falla 1: Sin cambios de humedad.

Envolvente de falla 2: Con ciclo secado-humedecimiento

Con estos resultados se pudo obtener los parámetros principales con resistencia, el ángulo de fricción y la cohesión, con base de la envolvente de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c' + (\sigma - u) * \tan(\phi')$$

$$\tau = 71.5 \text{ kPa} + \sigma' * \tan(8^\circ)$$

Al construir el círculo de Mohr, y establecer la envolvente de falla, se nota una clara disminución del ángulo de fricción; este parámetro hace referencia a la resistencia cortante debido a la fricción mecánica entre las partículas del suelo. La cohesión, que es la fuerza que cementa las partículas del suelo (Budhu, 2007), también disminuye considerablemente.

|                                   | Sin ciclo secado-humedecimiento | Con ciclo secado-humedecimiento |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Cohesión<br>[kg/cm <sup>2</sup> ] | 145                             | 72                              |
| Ángulo de<br>fricción             | 27                              | 8                               |

Figura 29. Comparativa de la cohesión y el ángulo de fricción antes y después del ciclo secado-humedecimiento.

#### 4.2 Variación volumétrica

La arcilla bentonita sódica se caracteriza por poder aumentar varias veces su volumen. Con la estabilización óptima de 9% de cal se logra controlar la expansividad y la contracción de las muestras tal como se muestra a continuación.

La **Figura 30** presenta la variación volumétrica de una muestra tipo ( $\sigma_3=100$  [kPa]) a través del tiempo, donde se puede evidenciar el cambio volumétrico en la etapa de saturación. La expansión fue de aproximadamente entre 6% y 10% del volumen inicial. Luego en la etapa de consolidación se muestra que vuelve a retraerse hasta que su variación se detiene, que es cuando comienza la etapa de falla.

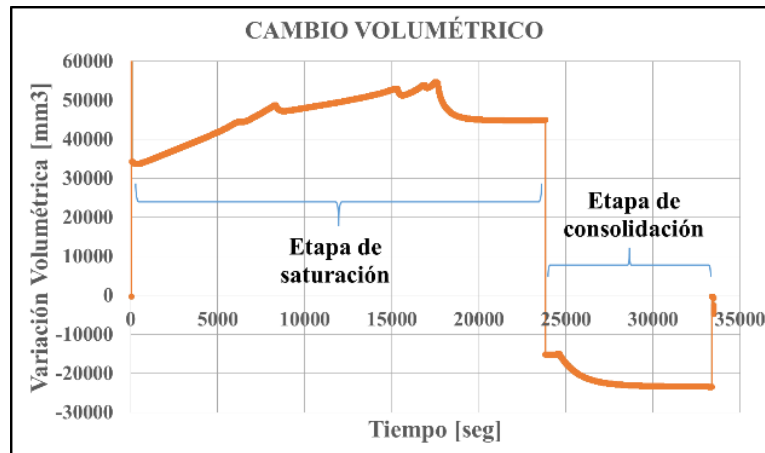


Figura 30. Cambio volumétrico de las muestras sometidas a un ciclo de secado-humedecimiento.

## 5. Conclusiones

1. En este proyecto se siguieron los protocolos de preparación de las muestras estabilizadas, desarrollados por Durán, Pinzón, (2017). En particular, hay que notar que a pesar de preparar las muestras con un contenido de material estabilizante (cal) del 9%, durante la fase de saturación en el ensayo triaxial, una vez generado el ciclo hidráulico, se observó un incremento en el volumen de la muestra. Lo cual, sugiere que o bien, durante el proceso de mezcla no se logró completa homogenización del material estabilizante o deben revisarse los tiempos de curado una vez agregada la cal.

Una sugerencia consiste en analizar las causas desde el punto de vista microestructural de los cambios de los parámetros de resistencia por efectos de los ciclos de humedecimiento y secado.

2. Los resultados experimentales durante la fase de corte en el ensayo triaxial -a diferentes esfuerzos de confinamiento- sugieren que el ciclo de humedecimiento-secado y posterior saturación de las muestras, afectan los parámetros de resistencia de forma importante. En particular, llama la atención la reducción en un parámetro intrínseco como la fricción del suelo. El valor del ángulo obtenido está dentro de valores correspondientes a materiales netamente arcillosos en condición de resistencia residual. Esto sugiere, que la trayectoria hidráulica afecta la estructura del material, conllevando a modificaciones en la rugosidad de los agregados del suelo estabilizado. Por otra parte, la reducción de la cohesión, puede estar asociada a fenómenos de fisuración por retracción durante el secado del suelo estabilizado, no recuperados durante las fases de humedecimiento y saturación.

3. Según los resultados obtenidos en los ensayos realizados, se correlacionan los datos y se puede concluir que se reduce la resistencia al someter las muestras a un ciclo de secado-humedecimiento.

El proceso que establece la mezcla del suelo arcilloso con la cal, produce una reacción exotérmica que ayuda a la absorción de agua reduciendo drásticamente la humedad del suelo a tratar. La disminución de dicha humedad dada por evaporación variará en función de la dosificación de cal agregada a la mezcla y de las condiciones ambientales (controladas), la cual será recuperada por hidratación de forma manual. En presencia de muestras que no han sido humedecidas, la resistencia del suelo se potencia a diferencia de aquellas que se someten a ciclos de secado-humedecimiento. **Ver Figura 14.**

4. La arcilla analizada y estabilizada en el presente proyecto corresponde a una arcilla plástica, la cual puede presentar grandes cambios de volumen debido a la absorción agua. Lo cual supone que durante el proceso de mezcla agregando cal en busca de evitar el cambio volumétrico al interactuar con el agua existe hinchamiento y es allí donde se pueden establecer grandes probabilidades que el proceso de mezclado no haya sido completamente efectivo y ello se evidencia durante la fase de saturación, mientras que en la etapa de consolidación es la aplicación del esfuerzo confinante y esa aplicación lo que dice en el tiempo es el equilibrio después de la aplicación de la carga se disipa la presión de agua y se estabiliza, con estos se resultados se hace notables que, a pesar, de la estabilización con cal, luego del ciclo de secado-humedecimiento, la muestra vuelve a tener una gran deformación volumétrica por lo que se puede suponer que el suelo volvió a sufrir un decremento en sus propiedades mecánicas y físicas, evidenciando así el gran problema inicial de no darle la suficiente importancia a lo que pase con un suelo estabilizado cuando en determinado momento se vea afectado con cambios grandes de humedad.

### Referencias bibliográficas

- Arias, O., & Cordero, V. (2018). *Estudio del comportamiento experimental de muestras de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio. Tesis de pregrado*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil .
- Braja, M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. . México: Thomson Learning.
- Budhu, M. (2007). *Soil mechanics and foundations*, . 2 ed.: John Wiley & Sons.
- Durán, J., & Pinzón, P. (2017). *Comportamiento esfuerzo deformación de arcillas estabilizadas con carbonato de calcio. Tesis de pregrado*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.
- García, E., & Suárez, M. (2009). *Arcillas: Propiedades y usos. Texto Universitario* . Madrid, España: Universidad Complutense.
- Higuera Sandoval, C. H. (2010). *Estabilización de Suelos. Guías de clase*. . Popayán: Universidad del Cauca.
- Higuera, C., Gómez, J., & Pardo, O. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Publicación técnica [PhD Tesis]*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Transportes y Vías.
- Hosterman, J., & Patterson, S. (1992). *Bentonite and Fuller's earth resources of the United States. U.S. Geological Survey Professional. Oficina de Imprenta del Gobierno de los Estados Unidos*., Washington DC, EE. UU.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial*. Bogotá D.C. : I.N.V.E – 153 – 07. .

Theng, B. (1979). *Formation and Properties of Clay Polymer Complexes*. Amsterdam: Developments in Soil Science 9. Elsevier.

Valerio, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Revista Métodos y Materiales*. , vol. 1,, 14-24