

# Analysis of Strength Development in Organic-Bearing Clays Under Thixotropic Aging Using a Vapor–Liquid Equilibrium Climate Chamber.

## Análisis de la Resistencia en Arcillas Con Componente Orgánico Bajo Envejecimiento Tixotrópico Utilizando una Cámara Climática Basada en Equilibrio Vapor–Líquido.

Nicolas Steven Faustino Murcia <sup>a</sup> & Santiago Madero Vargas <sup>a</sup> & Ing. Henry Giovanni Martínez Mendoza <sup>a</sup> & Ing. Camilo Ernesto Herrera Cano <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. nicolas-faustino@upc.edu.co; santiago-madero@upc.edu.co; henry-martinez5@unipiloto.edu.co

Received: Month Day, Year. Received in revised form: Month Day, Year. Accepted: Month Day, Year.

### Abstract

From a geotechnical engineering perspective, understanding the mechanical behavior of geomaterials under applied stresses is essential. This study investigates the phenomenon of thixotropic aging and its influence on the recovery of soil strength. Particular emphasis is placed on the progressive reestablishment of interparticle interactions under controlled environmental conditions, leading to measurable increases in undrained shear strength ( $S_u$ ). The experimental program involved the characterization of a soil mixture composed of bentonite, kaolin, and diatomaceous earth, including the determination of the optimum moisture content and maximum dry density through compaction testing. In addition, unconfined compression tests were performed at different stages of the aging process to evaluate the evolution of strength over time. All laboratory procedures were conducted in accordance with current Colombian technical standards. To ensure the proper assessment of thixotropic behavior, temperature and relative humidity were maintained under stable conditions using a custom-built climatic chamber based on vapor–liquid equilibrium principles. The findings indicate that the increase in strength is predominantly governed by internal microstructural rearrangement and energy dissipation mechanisms, with minimal influence from external environmental factors.

**Keywords:** thixotropic aging, strength, moisture, diatomaceous earth, climatic chamber.

### Resumen

Desde una perspectiva de la ingeniería geotécnica, comprender el comportamiento mecánico de los geomateriales bajo esfuerzos aplicados es esencial. Este estudio investiga el fenómeno del envejecimiento tixotrópico y su influencia en la recuperación de la resistencia del suelo. Se hace especial énfasis en el restablecimiento progresivo de las interacciones interparticulares bajo condiciones ambientales controladas, lo que conduce a incrementos medibles en la resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ). El programa experimental incluyó la caracterización de una mezcla de suelo compuesta por bentonita, caolín y diatomeas, incluyendo la determinación del contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima mediante ensayos de compactación. Adicionalmente, se realizaron ensayos de compresión inconfiada en diferentes etapas del proceso de envejecimiento para evaluar la evolución de la resistencia con el tiempo. Todos los procedimientos de laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con las normas técnicas colombianas vigentes. Para garantizar una adecuada evaluación del comportamiento tixotrópico, la temperatura y la humedad relativa se mantuvieron bajo condiciones estables mediante una cámara climática de construcción propia basada en principios de equilibrio vapor–líquido. Los resultados indican que el incremento de la resistencia está gobernado predominantemente por mecanismos de reordenamiento microestructural interno y disipación de energía, con una influencia mínima de los factores ambientales externos.

**Palabras clave:** envejecimiento tixotrópico, resistencia, humedad, diatomeas, cámara climática.

## 1 Introducción

En el contexto ingenieril y en la geotecnia en específico es crucial tener en cuenta la resistencia de un suelo y el tipo de este, para implementar construcciones e infraestructuras de alto impacto, ya sea un puente vehicular, una vía que facilite el flujo vehicular en una zona en particular, una edificación de fines comerciales o residenciales, en fin. Para desarrollar cualquiera de estas infraestructuras es necesario establecer las condiciones de resistencia del suelo, para ello se plantean varios parámetros que afectan dicha magnitud, como lo son el tipo de suelo el porcentaje de humedad en dicha superficie.

Uno de los tipos de suelo más común es el arcilloso. La estructura de la arcilla se observa, en primer lugar, en suelos intactos, remodelados y secados al horno, y, en segundo lugar, en suelos consolidados a varios niveles en compresión unidimensional [1]. En estos existe una característica principal, la cual es que los suelos remodelados con el paso del tiempo y con unas condiciones de humedad y temperatura controladas tienden a recuperar la resistencia inicial perdida a causa del acomodamiento de partículas y al cambio en su estructura inicial. En muchos suelos arcillosos depositados naturalmente, la resistencia a la compresión simple es mucho menor cuando se analizan tras ser remodelados sin cambios en el contenido de humedad [2]. Sin embargo, existen evidencias que a media del tiempo o envejecimiento del suelo

remoldeado esta resistencia tiende a aumentar dicho fenómeno se le denomina Tixotropía. El fenómeno tixotrópico del suelo se ha investigado desde hace mucho tiempo en el campo de la ingeniería geológica y geotécnica. Excepto las arenas gruesas y limpias y la grava, se ha demostrado que todos los sedimentos presentan tixotropía [3]. La tixotropía es un fenómeno importante, especialmente a velocidades de corte relativamente bajas (Perret y otros, 1996), porque influye en el comportamiento reológico del material durante los movimientos de masa [4].

La tixotropía de la arcilla se refiere al fenómeno por el cual, cuando el suelo se altera, su estructura original se destruye y su resistencia mecánica disminuye drásticamente. Tras el cese de la alteración, parte de la resistencia mecánica del suelo se recupera gradualmente con el paso del tiempo [5]. Dicho comportamiento de los suelos arcillosos debe implementarse en un ambiente donde la temperatura y principalmente la humedad estén controlados y sean constantes, para el suelo pueda recuperar su resistencia gradualmente. En estado inalterado, la resistencia al corte inicial es  $Su_0$ . Debido al remoldeo, la resistencia disminuirá a  $S_{ur}$ . En condiciones de contenido y volumen de agua constantes, la resistencia, tras un período  $t$ , aumentará a  $S_{ut}$ , donde  $S_{ut} > S_{ur}$ . Para un material ideal puramente tixotrópico, si se le da suficiente tiempo, la resistencia volverá a su valor inicial,  $Su_0$  [3].

Dentro del fenómeno tixotrópico es importante entender no solo lo que implica dicho proceso de forma externa, a su vez entender cómo funcionan las fuerzas intermoleculares en dicho procedimiento es crucial para comprender por completo este fenómeno. La atracción entre partículas varía con la potencia negativa del espaciamiento; por lo tanto, una pequeña disminución en el espaciamiento entre partículas produce un efecto pronunciado en la recuperación de la resistencia. La disminución en la distancia entre partículas durante el envejecimiento tixotrópico contribuye al aumento de la tensión desviatoria. Con el aumento de la deformación axial, se puede observar que la rigidez aumenta [6]. El fenómeno de tensión a macroescala corresponde a una distribución interna de los contactos interpartículas y de las fuerzas normales y cortantes interpartículas. Por lo tanto, la tixotropía debería causar cambios en las fuerzas interpartículas o ser el resultado de estos [7]. Añadiendo a lo anterior en el reacomodo de partículas del suelo la energía interna también varía en una proporción sustancial que promueve junto con el envejecimiento al aumento de la resistencia en este material. También es evidente que, a medida que el período de envejecimiento aumentó de 1 a 42 días, la tensión desviatoria aumentó. Este aumento se debe a la condición de equilibrio buscada por el exceso de energía interna que permanece en el sistema durante el remodelado [8].

Así, como es importante comprender el efecto de la tixotropía en el material arcilloso, tanto en mayor como en menor escala, es indispensable entender los factores externos que pueden afectar el correcto desarrollo del fenómeno, por ende, incurrir en el erróneo resultado en la resistencia del suelo, dichos factores que influyen directamente son: la humedad presente en la muestra en sí y el porcentaje de salinidad de esta. En suelos con mayor contenido de agua, como lodos de perforación, suspensiones de bentonita, pastas

o lodos de arcilla, la tixotropía se considera un fenómeno reológico especial [3]. Mientras que, a alta concentración de sal, las dobles capas eléctricas alrededor de las plaquetas de arcilla se contraen y las partículas se acercan para formar agregados de mayor tamaño, con una estructura de borde a cara y cara a cara debido a las fuerzas de atracción de Van der Waals de largo alcance. En este caso, la reorganización de partículas se vuelve débil o incluso imposible, y como resultado menor efecto tixotrópico [9]. Es importante resaltar dicha salinidad del agua porque la naturaleza de algunas arcillas implica tener este parámetro. Las arcillas bentoníticas presentan una alta plasticidad y están muy influenciadas por la salinidad del agua intersticial [10].

No obstante, no se puede obviar la aplicación de este tema dentro del campo de la ingeniería civil, en el entorno de las cimentaciones el cambio de la resistencia del suelo, puede determinar cómo se puede comportar una infraestructura. Durante la instalación de pilotes, la tensión y la relación de vacíos que los rodean cambian significativamente debido a la perturbación. Sin embargo, con el paso del tiempo (envejecimiento tixotrópico), los suelos circundantes ganan resistencia, lo cual puede atribuirse a la consolidación y a los efectos tixotrópicos [11]. En este contexto surge la siguiente pregunta ¿Cuál es la influencia de la temperatura y la humedad en el fenómeno tixotrópico sobre suelos arcillosos con composición orgánica?

## 2 Metodología

En primera instancia es indispensable, antes de pensar en la composición de la muestra y la resistencia de esta, plantear un modelo o espacio donde se garanticen condiciones ambientales controladas, para que el fenómeno tixotrópico se desarrolle de forma correcta, es por ello, que se adoptó un modelo de cámara climática a partir de un proceso químico denominado efecto equilibrio vapor líquido. El montaje consiste de un contenedor hermético de acrílico que contiene las soluciones salinas saturadas en el fondo [12]. Las muestras se disponían en uno de los recipientes alternos que contaba con la solución salina a imponer para reducir el tiempo de exposición de las muestras a la condición ambiental del laboratorio. Posteriormente, se procedía a hacer el cambio de la solución en el contenedor principal y se retornaban los especímenes a este [12].

El equilibrio de las dos fases genera un ambiente en donde la temperatura y la humedad se mantienen teóricamente constantes. El equilibrio líquido-vapor de sistemas en los que una fase líquida está en equilibrio con su vapor [13]. Si se considera el equilibrio de las fases líquida y vapor de un sistema de varios componentes, el equilibrio exige que la temperatura y la presión sean iguales en ambas fases [13]. A cualquier temperatura, para un sólido o líquido determinado, existe una presión en la que el vapor formado sobre la sustancia se encuentra en equilibrio dinámico con su estado líquido o sólido. Esta es la presión de vapor de la sustancia a esa temperatura. En equilibrio, la velocidad a la que el sólido o líquido se evapora es igual a la velocidad a la que el gas se condensa y vuelve a su estado original. Todos los sólidos y líquidos tienen una presión de vapor, y esta presión es constante independientemente de la cantidad de sustancia presente [14].

Para ello se debe calibrar dicha solución dado que a los primeros días de conformación e inclusión en la cámara casera que se está realizando, su comportamiento es muy volátil por lo que se contempla un periodo de tiempo para que la solución se estabilice. La calibración se llevó a cabo colocando inicialmente diversas soluciones salinas en frascos herméticos y con ayuda de un higrómetro TESTO 177-H1® se hicieron mediciones en el tiempo tanto de humedad relativa como temperatura. [15]. El cloruro de sodio (NaCl) fue la solución escogida ya que se evidenció en los estudios consultados la estabilidad de esta, y al ser la sal convencional es más fácil de encontrar.

Entendiendo el proceso anterior se incluye esta solución dentro de una nevera que aisle este sistema y genere un propio ambiente dentro de esta figura 1. Así mismo, con 2 contenedores de plástico se construyó un estante para posicionar las muestras dentro de la cámara casera figuras 2 y 3. Con estas condiciones nace el montaje experimental de control de humedad y temperatura figura 4.

Figura 1. Nevera de icopor en estado de calibración.



Fuente: propia.

Figuras 2 y 3. Montaje de contenedores de plástico para ubicar las muestras dentro de la cámara climática.



Fuente: propia.

Figura 4. Cámara climática con higrómetro de medición incorporado.



Fuente: propia.

## 2.1 Ensayo de límite líquido:

El ensayo de límite líquido, según la norma INV E-125-13 [16], tiene como objetivo determinar el contenido de agua a partir del cual un suelo pasa del estado plástico al líquido. Se utilizaron tres muestras con composiciones diferentes de porcentajes de caolín, bentonita y diatomeas.

Existen dos métodos para su ejecución: el Método A (multipunto) y el Método B (un solo punto); en este caso se aplicó el Método A, que consiste en realizar varios tanteos con diferentes contenidos de humedad para obtener mayor precisión. La muestra se preparó por vía húmeda, utilizando únicamente la fracción que pasa el tamiz No. 40 (425  $\mu\text{m}$ ). Luego se colocó una porción del suelo en la cazuela del aparato de Casagrande, se niveló y se abrió una ranura con el ranurador estándar.

Posteriormente, se dejó caer la cazuela repetidamente desde una altura fija hasta que la ranura se cerró por flujo del material, registrando el número de golpes requeridos. Se repitió el procedimiento con distintas humedades y se determinó el contenido de agua de cada muestra, seleccionando la porción donde se une la ranura en 10 mm y se determinó su peso húmedo y seco. Finalmente, se graficó el número de golpes frente al contenido de humedad y se obtuvo el límite líquido correspondiente, según lo establece la norma INV E-125-13 [16].

## 2.2 Ensayo del límite plástico:

El ensayo del límite plástico, conforme a la norma INV E-126-13 [16], tiene como propósito determinar el contenido de agua en el cual un suelo pasa del estado semisólido al plástico, complementando la determinación del límite líquido para calcular el índice de plasticidad. En este procedimiento, la muestra se preparó tomando la fracción que pasa el tamiz No. 40 (425  $\mu\text{m}$ ) y humedeciéndola hasta obtener una masa plástica y uniforme. Luego, se tomó una pequeña porción del suelo y se moldeó manualmente cada una de las tres muestras sobre una placa de vidrio o superficie no porosa, formando cilindros o “hilos” de aproximadamente 3 mm de diámetro mediante movimientos de rodado con la palma de la mano.

Cuando el hilo comenzó a desmoronarse o agrietarse antes de alcanzar dicho diámetro, se consideró que se había alcanzado el límite plástico. En ese momento, se recogieron los fragmentos y se

determinó su contenido de humedad mediante secado en horno. El límite plástico (LP) corresponde al porcentaje de humedad promedio de estas muestras. La norma también indica que el límite plástico, junto con el límite líquido obtenido mediante el ensayo INV E-125-13 [16], permite calcular el índice de plasticidad ( $IP = LL - LP$ ), aunque en el procedimiento se calculó del índice no forma parte del ensayo en sí.

### 2.3 Ensayo de gravedad específica (Gs):

El ensayo de gravedad específica de los suelos, según la norma INV E-128-13 [16], tiene como propósito determinar la relación entre el peso del sólido del suelo, que él sugerido por la norma es de  $35 \pm 5$  g y el peso de un volumen igual de agua destilada a  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , expresado como gravedad específica. Para realizar el ensayo, se selecciona una muestra representativa de la fracción que pasa el tamiz No. 4 ( $4,75\text{ mm}$ ) y se seca en horno hasta peso constante. Posteriormente, se pesa una cantidad determinada de suelo seco y se coloca en un picnómetro previamente tarado, llenándolo con agua destilada hasta el volumen marcado. Se asegura la eliminación de burbujas de aire mediante agitación o reposo, y luego se pesa el picnómetro con la muestra y el agua. Este valor indica la densidad relativa de los sólidos del suelo y es útil para cálculos de propiedades físicas e ingenieriles, como porosidad, compactación y control de mezclas.

### 2.4 Ensayo normal de compactación:

El ensayo de compactación normal, según la norma INV E-141-13 [16], tiene como objetivo determinar la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de un suelo al ser compactado mediante energía estándar. Para realizar el ensayo, se toma una muestra representativa del suelo y se humedece a cinco distintos contenidos de agua cercanos a la humedad estimada óptima.

La muestra se coloca en un molde de compactación de volumen conocido, compactándola en tres capas con un martillo de  $2,5\text{ kg}$  desde una altura de  $30\text{ cm}$ , aplicando un número de  $25$  golpes por capa. Cada muestra se pesa para determinar su densidad húmeda.

Posteriormente se determina su contenido de humedad mediante secado en horno. Con los resultados se construye la curva de compactación, representando la densidad seca versus el contenido de humedad, y se obtiene la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad correspondientes.

Con estos datos se procede a extraer las muestras, para ello se realiza la compactación con la humedad óptima para llegar a la densidad seca máxima, de ahí con el tubo Shelby que guarda proporciones  $1:2$  se extrae del molde la muestra con ayuda de una prensa que ejerce presión para introducir el tubo en el molde del ensayo Proctor, después de tener la muestra en el tubo, se procede a la extracción de esta con ayuda de la prensa y un disco con igual diámetro del tubo para que la muestra salga sin perder material figura 5.

Figura 5. Procedimiento de extracción de muestras.



Fuente: propia.

### 2.5 Ensayo de compresión inconfínada:

El ensayo de compresión inconfínada en muestras de suelos, según la norma INV-E 152-13 [16], establece la resistencia a compresión de un suelo cohesivo en ausencia de confinamiento lateral, mediante la aplicación de una carga axial controlada sobre una muestra cilíndrica hasta provocar su falla. Se realizaron  $28$  muestras,  $4$  de prueba y  $24$  fueron las que se ingresaron en la cámara climática, a velocidad lenta  $1\text{ mm/s}$  y velocidad rápida  $5\text{ mm/s}$ , denominadas como se ve en la tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de las muestras.

| Tiempo de reposo (días) | Velocidad lenta (1 mm/s) |       |       | Velocidad Rápida (5 mm/s) |       |       |
|-------------------------|--------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
|                         | A                        | B     | C     | A                         | B     | C     |
| 1                       | M1AL                     | M1BL  | M1CL  | M1AR                      | M1BR  | M1CR  |
| 30                      | M30AL                    | M30BL | M30CL | M30AR                     | M30BR | M30CR |
| 60                      | M60AL                    | M60BL | M60CL | M60AR                     | M60BR | M60CR |
| 90                      | M90AL                    | M90BL | M90CL | M90AR                     | M90BR | M90CR |

Fuente: propia.

En la figura 6 se observan las muestras consolidadas a  $1$  día con doble membrana plástica para no perder humedad propia de la muestra y la salinidad del entorno no afecte al fenómeno.

Figura 6. Muestras con membrana para preservar la humedad.



Fuente: propia.

A cada muestra antes de fallarse se obtienen sus propiedades geométricas y se registran en el aparato de medición, luego se coloca en la maquina y se falla como se ve en la siguiente figura 7.

Figura 7. Muestra durante el procedimiento de compresión inconfiada.



Fuente: propia.

Luego de fallar cada muestra se toman los datos de fuerza (KN), deformación (mm), posterior a ello se registra la forma en la que se genera la falla en las muestras como se observa en la figura 8.

Figura 8. Muestra fallada



Fuente: propia.

### 3 Análisis de resultados

#### 3.1 Límites de Atterberg.

##### Límite líquido

Se realizó un ensayo para cada una de las 3 diferentes composiciones inicialmente planteadas con los porcentajes de material empleado, y así tener un criterio claro para seleccionar la que mejor se acople a los requerimientos del proyecto. Se registran los valores dentro del ensayo, el peso del recipiente sin el material, la masa de la fracción donde se sella la apertura inicialmente generada en 10 mm, producto de los golpes suministrados, se toma en dos formas en la inicial con la totalidad de la humedad suministrada y secada al horno. Utilizando la ecuación 1 se calcula el contenido de humedad.

$$\text{contenido agua} = \frac{\text{masa húmeda} - \text{masa seca}}{\text{masa seca} - \text{masa del rec.}} * 100 \quad (1)$$

Por medio de los valores obtenidos de contenido de agua y los números de golpes registrados dentro del rango de la norma, se extrapolaron los valores para producir las curvas de fluidez donde en estas se pudo determinar que guarda una proporción inversa cuando a menor porcentaje de humedad mayor cantidad de golpes y por medio de la ecuación que arroja la gráfica se determina el valor

estimado del límite líquido a 25 golpes. Los valores del límite líquido están expuestos en la tabla 2.

##### Límite plástico

Se realizaron cilindros aproximadamente de 3 mm, así mismo como en el límite líquido por medio de la ecuación 1 se calculó el porcentaje de humedad de los cilindros, y se almacenan en 2 recipientes para determinar el contenido de humedad y del promedio de los dos valores resultará el aproximado al límite plástico arrojando los resultados expuestos en la tabla 2.

Con la norma INV-E 181-13 sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería se logró entender que el suelo es un limo de alta compresibilidad MH como se muestra en el resumen de la tabla 2, ya que el límite líquido está por encima de 70 y el índice de plasticidad entre 9 y 36 quedando por debajo de la línea A en la (Figura 181-1. Carta de plasticidad), se selecciona la muestra 2 porque tiene un índice de plasticidad no tan bajo como la muestra 1 y no tan alto como la muestra 3, esa muestra que es mejor proporcionada que las otras y tiene mejor trabajabilidad al momento de realizar las pruebas correspondientes.

Tabla 2. Resumen límites de Atterberg.

| RESUMEN              | Límite Líquido | Límite plástico | Índice de plasticidad | Denominación                      |
|----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Muestra 1            | 70,34          | 61,17           | 9,17                  | Limo de alta compresibilidad (MH) |
| Muestra 2            | 72,70          | 60,26           | 12,44                 | Limo de alta compresibilidad (MH) |
| Muestra 3            | 80,52          | 43,84           | 36,68                 | Limo de alta compresibilidad (MH) |
| MUESTRA SELECCIONADA |                |                 |                       |                                   |
| Muestra 2            | 72,70          | 60,26           | 12,44                 | Limo de alta compresibilidad (MH) |

Fuente: propia.

#### 3.2 Gravedad específica (Gs).

En el presente ensayo de caracterización se evidencia el comportamiento de la mezcla seleccionada anteriormente entendiendo el criterio inicialmente más priorizado como la trabajabilidad de la muestra. La constante k es un valor obtenido en la tabla 128-2 de la norma INV E-128-13 [16].

Por medio de estos valores y las ecuaciones 2 (volumen calibrado del picnómetro), 3 (masa del picnómetro lleno de agua a temperatura de ensayo), 4 (gravedad específica) y 5 (gravedad específica a 20°C) expuestas en la norma INV E-128-13 [16], se procede a calcular los valores de la gravedad específica expuestos en la tabla 3.

$$V_p = \frac{m_{pw,c} - m_p}{\rho_{w,c}} \quad (2)$$

Donde:

$V_p$ : volumen calibrado del picnómetro.

$M_{(pw,c)}$ : masa del picnómetro lleno de agua a temperatura de calibración.

$M_p$ : masa promedio del picnómetro seco.

$\rho_{w,c}$ : densidad del agua a temperatura de calibración.

$$m_{pw,t} = m_p + (V_p * \rho_{w,t}) \quad (3)$$

Donde:

$M_{(pw,t)}$ : masa del picnómetro lleno de agua a temperatura de ensayo.  
 $\rho_{w,t}$ : densidad del agua a temperatura de ensayo.

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{m_s}{(m_{pw,t} - (m_{pws,t} - m_s))} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_s$ : densidad de partículas sólidas.  
 $M_s$ : masa de los sólidos secados al horno.  
 $m_{pws,t}$ : masa del picnómetro con sólidos y agua a temperatura de ensayo.

$$G_{s\ 20^\circ} = k * G_s \quad (5)$$

Tabla 3. Valores calculados de  $G_s$ .

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| $V_p$ (cm <sup>3</sup> ) | 248,46 |
| $M_{pw,t}$ (g)           | 362,70 |
| $G_s$                    | 2,613  |
| $G_{s\ 20^\circ}$        | 2,611  |

Fuente: propia.

Este valor de  $G_s$  se podría interpretar como un suelo con contenido orgánico considerable, ya que inicialmente se pretenden valores de 2.67 y superiores para tenerlo en cuenta como un limo o una arcilla, como lo podría indicar su composición inicial, o los límites de Atterberg. No obstante, la cantidad presente de diatomeas genera que el valor esperado no sea el mismo ya que la procedencia de este material y su composición hace que las características de la muestra sean similares a un suelo orgánico. Los valores típicos de la gravedad específica están asociados a los valores de los minerales constituyentes de la fase sólida del suelo, son: Gravias 2.65 a 2.68; Arenas 2.65 a 2.68; Limos 2.66 a 2.70 y arcillas 2.68 a 2.80. En general los suelos presentan valores de  $G_s$  comprendidos entre 2,5 y 3,1 (adimensional) [17]. La gravedad específica en los suelos está en dependencia de los minerales que los constituyen y varía en un rango de 2.6 a 2.9; sin embargo, en suelos con abundante hierro,  $G_s$  puede alcanzar valores de 3 o más, mientras que en suelos con grandes cantidades de materia orgánica la gravedad específica desciende inclusive a valores inferiores a 2 [18].

### 3.3 Selección de muestra.

La composición de la muestra implica que tanto comportamiento tixotrópico presentará el suelo. Dado que no todas las arcillas tienen la misma capacidad de manifestar dicho fenómeno. Se descubrió que el comportamiento tixotrópico de la bentonita es notable incluso después de un tiempo muy corto. Mientras que el caolín casi no muestra tixotropía y la ilita solo muestra un efecto pequeño. (A. W. Skempton and R. D. Northey 1952) [19]. El caolín es un mineral del grupo de las arcillas cuya composición química es sílice, alúmina y agua,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  [20].

Dentro del desarrollo experimental es importante reconocer todas las composiciones de la muestra y definir su origen, las

diatomeas presentes en la composición de las muestras establecen un parámetro de análisis en el presente artículo en función del análisis del fenómeno tixotrópico presente en este material. Las diatomeas son algas microscópicas, unicelulares, eucariotas, protistas, fotosintéticas, con un esqueleto silíceo llamado frústula, y se encuentran en casi todos los ambientes acuáticos dulces y salinos, e incluso en suelos y superficies húmedas, ya sean planctónicas (flotantes) o bentónicas (adheridas a sustratos), y en todas las condiciones climáticas [21]. Las diatomeas pueden acumularse en grandes cantidades y permanecer el tiempo suficiente para formar sedimentos (diatomitas), compuestos principalmente de frústulas. Cuando las diatomeas mueren, se hunden en el medio acuoso, formando un sedimento de composición orgánica [21]. La resistencia al corte en mezclas caolín-diatomita aumenta al ser mayor el contenido de microfósiles, lo que sugiere se deba al incremento de la rigidez y a la mejor estructuración de las mezclas [22].

Para seleccionar las muestras se tienen en cuenta diversos parámetros, en primera instancia la trabajabilidad del material, puesto que se deben realizar diversos ensayos donde se expondrá este a porcentajes de humedad variables y es necesario el buen manejo de este para garantizar el buen desarrollo de futuros ensayos. En segunda instancia establecer una composición que garantice que el efecto tixotrópico se evidenciará de forma correcta y notoria, para esto se debe garantizar el uso de la bentonita ya que en estudios mencionados este material presenta un desarrollo tixotrópico claro, adicional a esto, se debe garantizar una buena relación entre el caolín y las diatomeas para que la muestra tenga mayor resistencia.

Con los parámetros claros se decide seleccionar la muestra número 2, entendiendo que presenta un porcentaje de bentonita que no genera una composición difícil de trabajar y aportará al correcto desarrollo del fenómeno. Añadiendo a lo anterior se selecciona esta muestra dado que el porcentaje de diatomeas es considerablemente mayor al de la bentonita, lo que indica que de presentarse el aumento de la resistencia dentro del envejecimiento tixotrópico es este material el que va a proveer este aumento de resistencia y no solo la bentonita. Así mismo el porcentaje de caolín garantiza que se presente la relación con las diatomeas que aumente la rigidez de la muestra y que permita evidenciar la respuesta tixotrópica de las diatomeas al este material no influir considerablemente en el desarrollo de este.

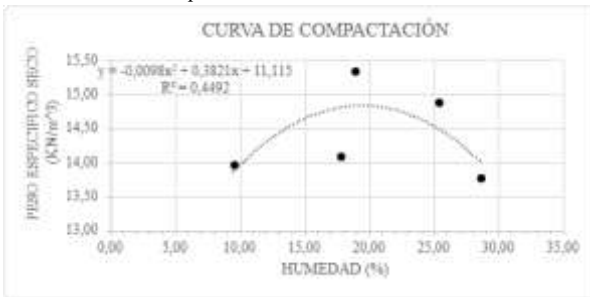
### 3.4 Ensayo normal de compactación.

Para poder realizar una correcta compactación del material se requiere encontrar un porcentaje de humedad óptimo que asegure llegar a la densidad máxima seca, teniendo esto en cuenta, se procede a realizar el ensayo para porcentajes de humedad sobre este material de 10%, 15%, 20%, 25% y 30%, para garantizar mayor exactitud en el ensayo y entendiendo que es un procedimiento que se desarrolla por operarios y se puede incurrir en una serie de errores que afecten el correcto resultado del ensayo se generaron 2 de estos uno normal y la comprobación.

Extrapolando los valores anteriores se realizaron las gráficas 1 y 2 donde se relacionan las diversas humedades resultantes del ensayo

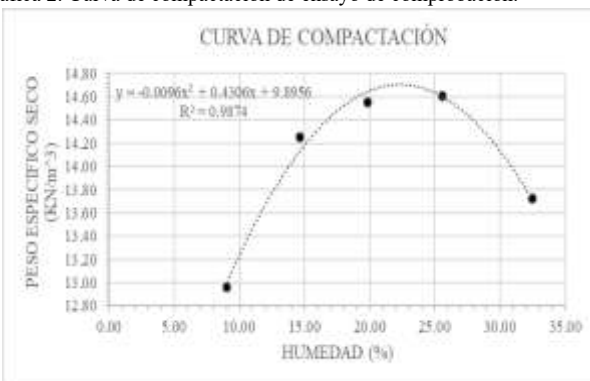
y sus densidades secas correspondientes, de ahí se calcula por medio de la ecuación del vértice de una parábola para encontrar el punto de inflexión donde en este se generan la humedad óptima y la densidad máxima de compactación, se generó un promedio entre los dos ensayos, donde arrojo una humedad óptima del 21% y un peso específico máximo de 14,8 KN/m<sup>3</sup>, este es el valor adecuado para realizar la compactación. Como se observa en la curva de compactación del primer ensayo grafica 1 existe mayor dispersión de los datos, esto se traduce en menor precisión en estos, a diferencia de la curva de compactación del ensayo de comprobación, donde se muestra menor dispersión y mayor precisión por ello la importancia del desarrollo de los dos ensayos.

Gráfica 1. Curva de compactación.



Fuente: propia.

Gráfica 2. Curva de compactación de ensayo de comprobación.



Fuente: propia.

Con este valor se procede a realizar la compactación de cada una de las muestras, de esta manera se asegura que lleguen a su capacidad máxima de carga.

### 3.5 Compresión inconfiada.

En este estudio, el ensayo se emplea para analizar la evolución de la resistencia del material a edades de 1, 30, 60 y 90 días, siguiendo lineamientos generales de la norma INV-E 152, con el fin de evaluar la influencia del tiempo en su comportamiento mecánico.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas y gráficas correspondientes a los días 1, 30, 60 y 90, se observa una evolución progresiva de la resistencia a la compresión inconfiada del material analizado. Esta tendencia es consistente con el comportamiento esperado en suelos cohesivos sometidos a procesos de curado y ganancia de cohesión interna, esto garantiza que el fenómeno tixotrópico se evidencia en este material, lo que hace referencia a que las diatomeas como se había expuesto anteriormente si presentan este fenómeno.

Por medio de cálculo de los diámetros, áreas, alturas, de las ecuaciones 6 (deformación axial al 0.1% más cercano) y 7 (Área corregida), expuestas en la norma INV E-128-13 [16].

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 \quad (6)$$

Donde:

$\Delta L$ : Cambio de longitud del espécimen, obtenido a partir de las lecturas del indicador de deformaciones o calculado por un dispositivo electrónico, mm.

$L_0$ : Longitud del espécimen del ensayo, mm.

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\varepsilon_1}{100}\right)} \quad (7)$$

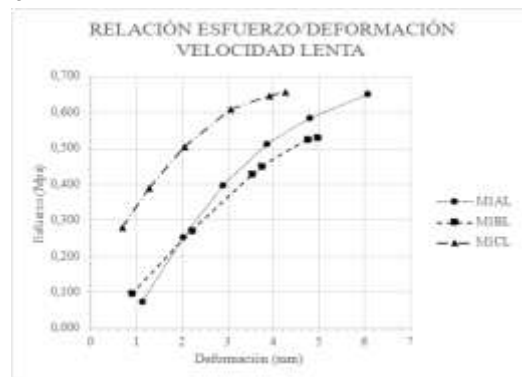
Donde:

$A_0$ : Área media inicial de la sección transversal de la muestra, mm<sup>2</sup>.

$\varepsilon_1$ : Deformación axial para una carga dada, %.

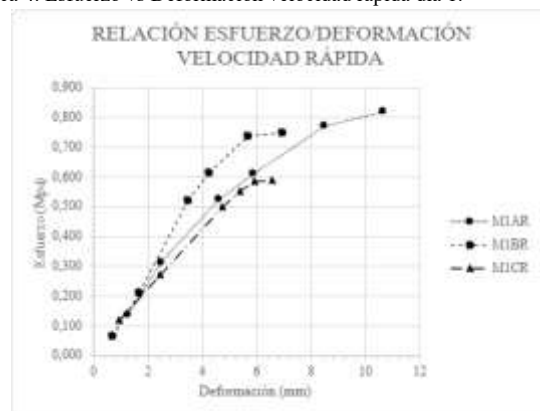
En los resultados correspondientes al día 1 del ensayo de compresión, se presentan los valores más bajos de resistencia, lo cual indica que el material aún no ha desarrollado completamente su estructura interna. Las gráficas 3 y 4 curvas esfuerzo-deformación muestran una mayor deformación axial al momento de la falla, evidenciando un comportamiento predominantemente plástico. Este comportamiento inicial es coherente con lo descrito en la INV-E 152, donde se reconoce que la resistencia del espécimen depende del estado inicial de cohesión y del tiempo transcurrido desde su preparación.

Gráfica 3. Esfuerzo vs Deformación velocidad lenta día 1.



Fuente: propia.

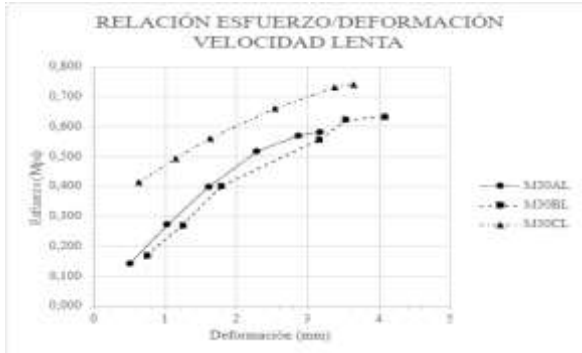
Gráfica 4. Esfuerzo vs Deformación velocidad rápida día 1.



Fuente: propia.

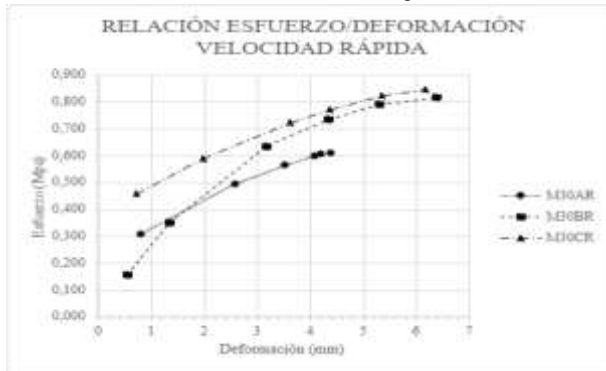
A los 30 días se evidencia un incremento notable en la resistencia, el aumento de las pendientes en las curvas esfuerzo–deformación. El material comienza a mostrar un comportamiento más estable, con menor deformación para alcanzar la falla, lo que indica ganancia de cohesión interna gráficas 5 y 6. Las curvas muestran pendientes más pronunciadas, lo que indica una mayor rigidez del material. Este aumento puede asociarse al desarrollo progresivo de la cohesión y a la estabilización de la estructura del suelo.

Gráfica 5. Esfuerzo vs Deformación velocidad lenta día 30.



Fuente: propia.

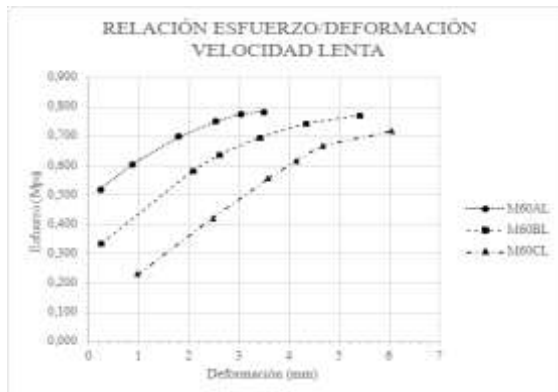
Gráfica 6. Esfuerzo vs Deformación velocidad rápida día 30.



Fuente: propia.

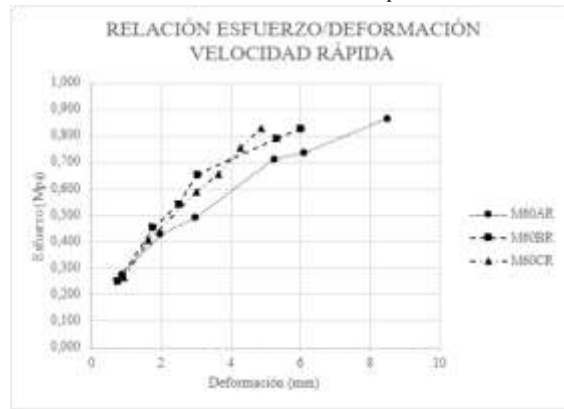
Para los 60 días, las gráficas 7 y 8 muestran una tendencia de consolidación de la resistencia, aunque el incremento ya no es tan abrupto. El comportamiento del suelo es más rígido, y la falla ocurre a menores deformaciones, señal de una estructura interna más desarrollada. Este comportamiento concuerda con la tendencia de consolidación de la resistencia que se espera en ensayos realizados bajo condiciones controladas.

Gráfica 7. Esfuerzo vs Deformación velocidad lenta día 60.



Fuente: propia.

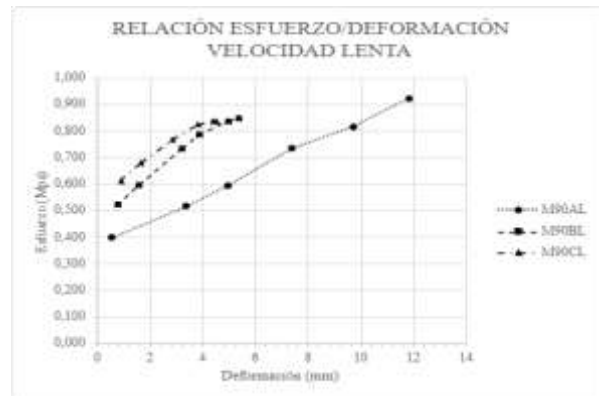
Gráfica 8. Esfuerzo vs Deformación velocidad rápida día 60.



Fuente: propia.

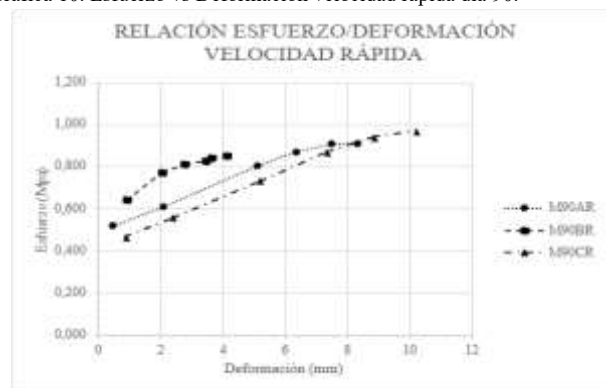
Finalmente, a los 90 días, se registran los valores más altos de resistencia. Sin embargo, el incremento respecto a los 60 días es menos pronunciado, lo que indica que el material se aproxima a un estado de resistencia casi estable. Las curvas esfuerzo–deformación en las gráficas 9 y 10 presentan una respuesta más frágil, característica de materiales con mayor cohesión, lo cual es compatible con el comportamiento descrito para suelos cohesivos en la norma INV-E 152.

Gráfica 9. Esfuerzo vs Deformación velocidad lenta día 90.



Fuente: propia.

Gráfica 10. Esfuerzo vs Deformación velocidad rápida día 90.



Fuente: propia.

Con los datos obtenidos se evidencia que la tendencia aumenta, el caolín no tiene mucha resistencia y no logra un gran fenómeno tixotrópico pero la bentonita y la diatomea si aportan para que se lleve a cabo, las muestras rápidas tienen un porcentaje mayor de resistencia que las muestras lentas. En edades más tempranas el material presenta mayor dispersión de datos, las muestras van teniendo una resistencia puntual a mayor tiempo de fabricadas.

Luego, se toma la resistencia a la compresión inconfiada ( $q_u$ ) de cada muestra de los datos, que es la máxima carga por unidad de área alcanzada durante el ensayo, o la carga por unidad de área cuando se alcanza el 15% de deformación axial según la norma INV-E 152, por medio de la ecuación 8 se calcula la resistencia al corte .

$$S_u = 0.5 * q_u \quad (8)$$

Donde:

$q_u$  : Resistencia a la compresión inconfiada

Los datos de la resistencia al corte de las muestras se evidencian en las tablas 4 y 5, con ello se realizan las gráficas 11 y 12 mostrando la evolución tixotrópica de las muestras.

En la tabla 4, los datos muestran incrementos más uniformes y consistentes de la resistencia. Esto sugiere que la aplicación lenta de carga permite una mejor redistribución de esfuerzos dentro del espécimen, lo que se traduce en valores de resistencia más representativos del comportamiento real del material.

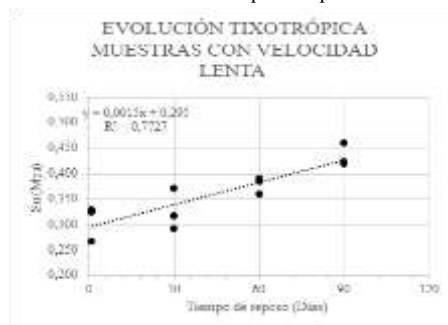
Tabla 4. Muestras falladas a velocidad lenta.

| Muestras falladas a velocidad lenta |          |                         |
|-------------------------------------|----------|-------------------------|
| Muestra                             | Su (Mpa) | Tiempo de reposo (Días) |
| M1AL                                | 0,325    | 1                       |
| M1BL                                | 0,266    | 1                       |
| M1CL                                | 0,329    | 1                       |
| M30AL                               | 0,291    | 30                      |
| M30BL                               | 0,318    | 30                      |
| M30CL                               | 0,370    | 30                      |
| M60AL                               | 0,391    | 60                      |
| M60BL                               | 0,385    | 60                      |
| M60CL                               | 0,359    | 60                      |
| M90AL                               | 0,460    | 90                      |
| M90BL                               | 0,423    | 90                      |
| M90CL                               | 0,419    | 90                      |

Fuente: propia.

La gráfica 11, muestra un crecimiento sostenido de la resistencia con el paso de los días. La pendiente positiva de la curva sugiere que el tiempo tiene una influencia significativa en el comportamiento mecánico del material.

Gráfica 11. Resistencia al corte vs Tiempo de reposo a velocidad lenta.



Fuente: propia.

La tabla 5, presentan mayores variaciones entre valores consecutivos por ello se despreciaron valores atípicos, esto indica que la falla ocurre de forma más abrupta, limitando el desarrollo completo de la resistencia del material y generando una mayor dispersión en los resultados.

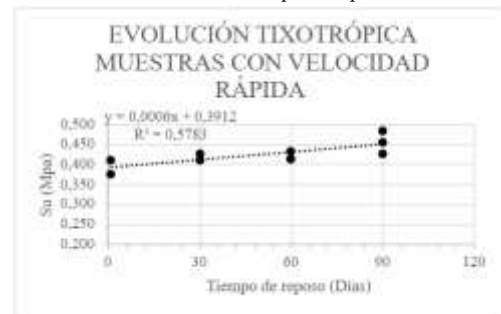
Tabla 5. Muestras falladas a velocidad rápida.

| Muestras falladas a velocidad rápida |          |                         |
|--------------------------------------|----------|-------------------------|
| Muestra                              | Su (Mpa) | Tiempo de reposo (Días) |
| M1AR                                 | 0,411    | 1                       |
| M1BR                                 | 0,375    | 1                       |
| M30BR                                | 0,409    | 30                      |
| M30CR                                | 0,424    | 30                      |
| M60AR                                | 0,432    | 60                      |
| M60BR                                | 0,413    | 60                      |
| M60CR                                | 0,414    | 60                      |
| M90AR                                | 0,454    | 90                      |
| M90BR                                | 0,424    | 90                      |
| M90CR                                | 0,484    | 90                      |

Fuente: propia.

Para la gráfica 12 aunque también se observa una tendencia creciente con el tiempo, el incremento de resistencia es menos uniforme que en el caso de la velocidad lenta, lo que evidencia la influencia directa de la velocidad de aplicación de carga en el comportamiento del material durante el ensayo.

Gráfica 12. Resistencia al corte vs Tiempo de reposo a velocidad rápida.



Fuente: propia.

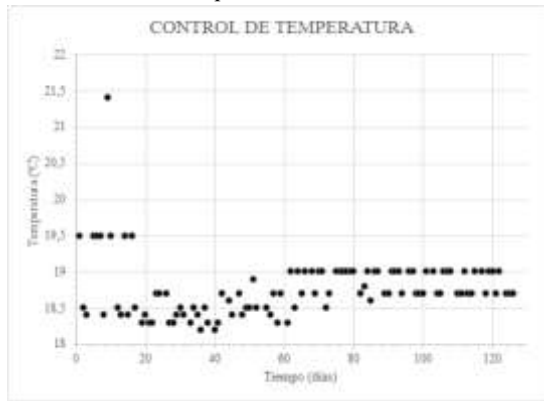
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos podemos evidenciar que la resistencia al corte ( $S_u$ ) guarda una relación directamente proporcional con el tiempo de reposo en la cámara climática, lo que guarda concordancia con el correcto desarrollo del fenómeno tixotrópico.

### 3.6 Control de temperatura y humedad.

Se utilizó un higrómetro para el control de la temperatura y la humedad durante el desarrollo del ensayo, debido a que estas variables influyen directamente en el comportamiento mecánico de los suelos cohesivos. Las variaciones en el contenido de humedad pueden modificar la cohesión y la resistencia al corte del material, mientras que los cambios de temperatura pueden generar alteraciones físicas que afecten los resultados del ensayo. El control de estas condiciones permitió garantizar que las variaciones observadas en la resistencia a la compresión inconfiada se atribuyeran principalmente al tiempo de reposo y a la velocidad de aplicación de la carga, asegurando así la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Como se observa en la gráfica 13, la temperatura se mantiene dentro de rangos relativamente constantes durante el periodo de ensayo ( $18.5^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ). Añadiendo a lo anterior como se evidencia en la gráfica 13 el periodo de calibración de la cámara fue 36 días siendo el día 20 el punto de inflexión donde la temperatura se empieza a comportar de forma constante.

Gráfica 13. Control de temperatura con los días de las muestras.



Fuente: propia.

Hay una variación controlada del contenido de humedad a lo largo del tiempo como se observa en la gráfica 14. Este control es fundamental, ya que la humedad influye directamente en la resistencia al corte de los suelos cohesivos. La estabilidad de este parámetro permite atribuir los cambios de resistencia principalmente al tiempo de reposo y a la velocidad de aplicación de carga. Salvo el primer día todo fue de 99% para evitar que el contenido de humedad del entorno afecte el contenido de humedad interno de la muestra se colocó doble membrana plástica.

Gráfica 14. Control de humedad con los días de las muestras.



Fuente: propia.

## 4 Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

El ensayo de compresión confinada permitió evaluar de manera adecuada el comportamiento mecánico del material, evidenciando una relación directa entre el tiempo de reposo (envejecimiento tixotrópico) y la resistencia al corte. Los resultados obtenidos muestran que, a medida que aumenta el tiempo, el material desarrolla una mayor cohesión interna, lo que se refleja en incrementos progresivos de la resistencia donde en promedio por edades aumentó un 41,61% y un 26,16%, en las muestras falladas a velocidades lenta y rápida respectivamente. Así mismo, el comportamiento observado es consistente con el esperado para suelos cohesivos, donde las condiciones de ensayo y el tiempo influyen de manera significativa en la resistencia a la compresión confinada y al corte.

Adicionalmente, se determinó que la velocidad de aplicación de la carga es un factor determinante en la respuesta mecánica del material. Las muestras ensayadas a velocidad lenta presentaron una

respuesta más estable y valores de resistencia más representativos, debido visto que permiten una mejor redistribución de esfuerzos a compresión antes de la falla. El adecuado control de la temperatura y la humedad durante el periodo de ensayo garantizó la confiabilidad de los resultados, minimizando la influencia de variables externas (humedad y temperatura variables) que afectan directamente el comportamiento tixotrópico del material. En conjunto, los resultados obtenidos constituyen una base técnica confiable para la caracterización mecánica del material y su posible aplicación en proyectos de ingeniería civil.

Se pudo concluir que el proceso de equilibrio vapor-liquido, si es un método eficaz en el contexto de mantener estables parámetros como la humedad relativa y la temperatura, condiciones que de ser variables afectarían el correcto desarrollo del acomodamiento de partículas internas en la muestra. La aplicación de la doble membrana plástica impidió que la humedad del entorno se infiltrara en la muestra y modificara las condiciones iniciales de esta, lo que hubiera generado cambios directos en el incremento de la resistencia. A su vez, este polímero impidió que el contenido de sal de la solución empleada en el proceso distorsionara la capacidad de presentarse el fenómeno tixotrópico en el material.

### 4.2 Recomendaciones

Mantener un control riguroso de las condiciones ambientales, especialmente la humedad, durante la preparación y el ensayo de las muestras, debido a su influencia directa en la resistencia del material.

Ampliar el número de edades de ensayo o el número de muestras por condición, con el objetivo de reducir la dispersión de los resultados y mejorar la representatividad estadística.

Elaborar un muestreo en campo para tener un valor comparable entre la resistencia inicial y propia del suelo con la resistencia producto del remoldeo, siendo este valor la referencia para generar el porcentaje de recuperación de la resistencia a raíz del acomodamiento de partículas durante el fenómeno tixotrópico. Así mismo, elaborar una muestra sin diatomeas para medir la influencia de este material.

## 5. Referencias

- [1] P. Delage y G. Lefebvre, "Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation," *Can. Geotech. J.*, vol. 21, pp. 21-35, Feb. 1984.
- [2] J. C. Ruge, F. Molina-Gómez, and J. P. Rojas, "Thixotropic behaviour study of clayey soils from the lacustrine deposits of Bogotá high plateau," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1386, p. 012050, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012050.
- [3] Y. Ren, S. Yang, K. H. Andersen, Q. Yang, and Y. Wang, "Thixotropy of soft clay: A review," *Engineering Geology*, vol. 287, art. no. 106097, 2021, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106097.
- [4] X. W. Zhang, L. W. Kong, A. W. Yang, y H. M. Sayem, "Thixotropic mechanism of clay: A microstructural investigation," *Soils and Foundations*, vol. 57, no. 1, pp. 23-35, 2017.
- [5] B. Tang, B. Zhou, L. Xie, y J. Yin, "Evaluation Method for Thixotropy of Clay Subjected to Unconfined Compressive Test," *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, n.º 683454, pp. 1-9, mayo 2021.

- [6] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [7] J. A. Díaz-Rodríguez and J. C. Santamarina, “Thixotropy: The case of Mexico City soils,” in *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1999, doi: 10.13140/2.1.3191.4883.
- [8] Md. K. Alam, A. R. Shahriar, M. S. Islam, N. Islam, and Md. Z. Abedin, “Experimental investigation on the strength and deformation aspects of thixotropic aging in reconstituted clays,” *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01639-1.
- [9] H. Van Olphen and P. H. Hsu, “An introduction to clay colloid chemistry,” *Soil Science*, vol. 126, no. 1, p. 59, 1978.
- [10] S. W. Jeong, J. Locat, J. K. Torrance, and S. Leroueil, “Thixotropic and anti-thixotropic behaviors of fine-grained soils in various flocculated systems,” *Engineering Geology*, vol. 196, pp. 119–125, 2015, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.07.014.
- [11] M. A. Farsakh, F. Rosti, and A. Souri, “Evaluating pile installation and subsequent thixotropic and consolidation effects on setup by numerical simulation for full-scale pile load test,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 11, pp. 1734–1746, 2015.
- [12] J. M. Espitia-López, “Comportamiento hidromecánico de rocas arcillosas no saturadas,” Tesis doctoral, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2018.
- [13] W. A. Chasoy Rojas, *Determinación experimental del equilibrio líquido-vapor del sistema etanol-agua-glicerina*, Tesis de Magíster, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2012.
- [14] J. Clark, I. Ly y S. Khan, “Raoult’s Law,” *Chemistry LibreTexts*, última actualización 30 ene. 2023. [En línea]. Disponible: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/Solutions\\_and\\_Mixtures/Ideal\\_Solutions/Changes\\_In\\_Vapor\\_Pressure\\_Raoult%27s\\_Law](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/Solutions_and_Mixtures/Ideal_Solutions/Changes_In_Vapor_Pressure_Raoult%27s_Law)
- [15] M. C. Torres-Suárez, “Efectos de los ciclos de carga–descarga y humedecimiento–secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los Andes colombianos,” Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [16] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), “Sección 100 – Suelos\*, en \*Normas y Especificaciones 2012”. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [17] G. Duque Escobar y C.-E. Escobar P., *Geomecánica*, Univ. Nacional de Colombia, Sede Manizales, Colombia, 2016.
- [18] A. P. Guerrero Abril y E. D. Lima Rodas, *Elaboración de guías metodológicas para ensayos de laboratorio de la asignatura de Mecánica de Suelos de la Universidad del Azuay*, Trabajo de graduación, Univ. del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [19] A. W. Skempton and R. D. Northey, “The sensitivity of clays,” *Geotechnique*, vol. 3, no. 1, pp. 30–53, 1952.
- [20] A. K. Molina-Macías and G. A. Peñuela, “Effect of the water quality of the benefit process in the rheology of the ceramic kaolin suspensions,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 21, no. 1, pp. 117–126, 2019, doi: 10.25100/iyv.v21i1.7671.
- [21] D. Zuluaga-Astudillo, J. C. Ruge, J. Camacho-Tauta, O. Reyes-Ortiz y B. Caicedo-Hormaza, “Diatomaceous soils and advances in geotechnical engineering—Part I,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, art. 549, 2023. doi: 10.3390/app13010549.
- [22] T. Nava and J. Díaz, “*Influencia de las diatomeas en la resistencia al corte del caolín*,” Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, 2007.