Comparación experimental entre la sensibilidad y la cementación en el comportamiento no drenado de suelos arcillosos

Experimental comparison between the sensitivity and cementation on the undrained behaviour of clayed soils

Juan Carlos Ruge Cárdenas^{1*} Fausto Molina-Gómez¹ Renato Pinto da Cunha²

Recibido 10 de noviembre de 2018, aceptado: 06 de marzo de 2020

Received: November 10, 2018 Accepted: March 06, 2020

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio experimental que compara el efecto de la sensibilidad contra el de la cementación, en la recuperación de las propiedades esfuerzo deformación en suelos arcillosos de la Sabana de Bogotá. La metodología de trabajo incluyó tres fases: (i) extracción de muestras; (ii) evaluación de las propiedades de los suelos en estado inalterado; y (iii) estabilización y análisis de resistencia de dichas muestras modificados materiales cementantes. Las muestras de suelo fueron tomadas en el municipio de Madrid (Cundinamarca, Colombia). Se desarrolló un plan experimental que incluyó ensayos de caracterización física y mecánica. En dicho plan se hizo énfasis en la evaluación de la resistencia al corte no drenada y los parámetros elásticos mediante ensayos de compresión confinada. Los suelos fueron compactados y estabilizados mediante la adición de dos productos químicos sólidos, carbonato de calcio y óxido de hierro. Los resultados entre las muestras naturales, remodeladas y mejoradas fueron comparados mediante técnicas de análisis estadístico. De esta manera, se encontró que la implementación del óxido de hierro en este tipo de suelos permite obtener parámetros esfuerzo-deformación cercanos a los del estado inalterado después del proceso de remodelo.

Palabras clave: Estabilización de suelos, remodelo de muestras, resistencia al corte no drenada.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study, which compares the effect of the *sensitivity against the cementation in the recovering of the stress-strain properties in clayey soils from “Sabana de Bogotá”*. The work methodology included three phases: (i) extraction of samples; (ii) properties assessment of the undisturbed samples; and (ii) stabilization and analysis of the resistance of the stabilized samples with cemented materials. An experimental plan, which included physical and mechanical tests, was developed. The plan had an emphasis on the assessment of the undrained shear strength and the elastic modulus through unconfined compression tests. The samples were compacted and stabilized with the addition of two solid chemical products, calcium carbonate and iron oxide. Results between natural, remoulded and stabilized were compared by means of statistical methods. Therefore, it was found that the use of iron oxide in this kind of soil allows obtaining stress-strain parameters close to the undisturbed state after the compaction process.

Keywords: Sample compaction, soil stabilization, undrained shear strength.

¹ Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

E-mail: jcruge@ucatolica.edu.co; faustoandres.molina@gmail.com

² Universidad de Brasilia. Posgrados en Geotecnia. Brasilia, Brasil. E-mail: rpcunha@unb.br

* Autor de correspondencia: faustoandres.molina@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de suelos finos es uno de los retos que tiene la ingeniería geotécnica en la actualidad. Lo anterior se debe a que dichos materiales tienen baja resistencia al corte y experimentan grandes deformaciones durante los procesos de carga. Las técnicas de mejoramiento de arcillas se emplean para el diseño y construcción de carreteras, terraplenes, edificios, acueductos y alcantarillados. En la actualidad existen diferentes métodos de estabilización, de potencial extenso, dentro de los que destacan aquellos que incluyen el uso de geopolímeros y agentes catalizadores. Sin embargo, los procesos de estabilización deben ser económicos y ecológicos [1].

Dentro de los productos más utilizados en el mundo para mejorar el desempeño de los suelos como materiales de construcción se encuentran el cemento, las cenizas volantes y los silicatos [2]. Horpibulsuk *et al.* [3] reportaron trabajos centrados en el comportamiento de la arcilla cementada con diferentes productos y que destacan el efecto de varios factores reguladores, tales como el contenido de agua, la relación de cemento y el tiempo de curado. Sin embargo, dichos factores se ven afectados por agentes externos que dificultan su total implementación en campo [4].

En este documento se presenta un estudio que compara la evolución de las propiedades esfuerzo-deformación de una arcilla en estado natural contra muestras del mismo suelo en estado remoldado y mejorado con dos productos químicos sólidos, que no requieren de proceso de curado. El documento se divide en cinco secciones. La primera sección es la introducción del mismo. La segunda sección corresponde al marco teórico, donde se presentan los conceptos de tixotropía, cementación y sensibilidad. La tercera sección muestra la metodología utilizada en la investigación, allí se expone la descripción y génesis de los materiales. Además, esta sección describe el plan experimental que se ejecutó. Dicho plan incluyó la caracterización física de las muestras recuperadas y la evaluación del comportamiento mecánico tanto de las muestras en estado inalterado como de las muestras estabilizadas. La cuarta sección indica los resultados y su análisis; por lo tanto, esta hace énfasis en los hallazgos obtenidos en el plan experimental y la ejecución de las comparaciones

mediante métodos estadísticos para evaluar la variabilidad y agrupación de los datos. Finalmente, en la quinta sección se resaltan las conclusiones del trabajo.

MARCO TEÓRICO

Sensitividad

La sensibilidad es una relación entre la resistencia al corte del suelo natural y el mismo en condición remoldada [5]. De esta manera, el grado de sensibilidad es la relación de la resistencia a compresión simple en estado inalterado con la resistencia a compresión simple en estado remoldado (ecuación (1)). La sensibilidad está particularmente referida a suelos arcillosos. Mientras más sensitivo sea más susceptible es a perder su capacidad a esfuerzos cortantes [6]. Así pues, el proceso de muestreo incide notablemente en la medición del grado de sensibilidad (S_t) de los suelos [7]. Para muchas arcillas depositadas en forma natural, la resistencia a compresión simple es mucho menor cuando estas son ensayadas después de ser remoldadas, sin ningún cambio en el contenido de humedad.

$$S_t = \frac{Su_{und}}{Su_{rem}} \quad (1)$$

Donde, Su_{und} corresponde a la resistencia al corte no drenada del suelo en condiciones inalteradas y Su_{rem} es la resistencia al corte no drenada remoldada.

La tasa de sensibilidad de la mayoría de las arcillas varía entre 1 y 8 (ver Tabla 1). Skempton y Northey [8] concluyeron que en arcillas con sensibilidad media es posible que dicha sensibilidad se deba enteramente al fenómeno de tixotropía. Por lo tanto, la tixotropía suele asociarse con la resistencia al corte de este tipo de materiales luego de ser sometidos a un proceso de remoldeo. Sin embargo, depósitos marinos altamente floculantes pueden llegar a tener valores de sensibilidad que van desde 10 hasta 80. A causa de esto, dichos depósitos son llamados “*quick clay*” [9]. La pérdida de resistencia de los suelos arcillosos por remoldeo es causada, principalmente, por la destrucción de la estructura de partículas de la arcilla que se formó en el proceso original de sedimentación. La Figura 1 muestra el proceso de recuperación de resistencia del suelo.

Tabla 1. Clasificación rangos de sensibilidad.

Condición	Rango
No Sensitividad	1-2
Sensitividad baja	2-4
Sensitividad media	4-8
Sensitividad	8-16
Extra Sensitividad	16-24
Arcillas rápidas	>24

Fuente: [8, 9].

(a)

(b)

Figura 1. Criterio de recuperación de resistencia del suelo: (a) Suelo tixotrópico; (b) Suelo parcialmente tixotrópico.

Cementación

En las carreteras y otras construcciones poco profundas, el cemento hidráulico se utiliza a menudo para mejorar el subsuelo. En algunos casos, dicho material permite mejorar las propiedades del suelo para hacerlo aptos como subrasantes, bases

granulares o formaciones y relleno de cimentación [10]. Además, el tratamiento con cemento disminuye la cantidad de ciclos que inducen deformaciones plásticas en suelos fragmentados. Por lo tanto, la estabilización de los suelos con cementos hidráulicos es una solución interesante, ya que la rigidez y la resistencia se mejoran con dicho tratamiento [11]. Rios *et al.* [12] demostraron que el comportamiento de estos materiales es complejo y afectado por muchos factores, como las propiedades físico-químicas del suelo, la cantidad de cemento, la porosidad y el contenido de humedad.

La cementación de suelos suele ser el resultado de la precipitación y cristalización de un compuesto. El carbonato calcio (CaCO_3) es uno de los agentes cementantes más importantes; debido a que este, en presencia de dióxido de carbono (CO_2), se transforma en bicarbonato que es soluble en agua. Dicho efecto suele suceder en los horizontes superiores del suelo por la presión parcial elevada del gas (en este caso CO_2), lo que genera un desprendimiento del mismo por los procesos respiratorios de micro-organismos presentes en la solución. Asimismo, el efecto aumenta en profundidad; debido a que la presión parcial del CO_2 decrece al tiempo que se desecan los restos de solución que impregna los poros finos del suelo. Dicho proceso induce que se forme nuevamente el CaCO_3 , muy poco soluble, que se precipita y cristaliza para formar una tupida red que engloba a los componentes sólidos restantes del suelo. El resultado final es una masa endurecida que puede adquirir una consistencia pétrea.

Existen unos 80 minerales carbonatos, la mayoría raros, que actúan como agentes cementantes en los suelos. Aun así, mientras los nitratos y los boratos son minerales escasos, los carbonatos más simples son bastante abundantes en la naturaleza. Dichos compuestos forman parte de la composición química de numerosas rocas; siendo este el componente esencial de calizas, dolomitas y mármoles cristalinos. Los minerales más importantes del grupo de los carbonatos son la calcita, el aragonito (CaCO_3) y la dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$). Otros minerales importantes cuyo componente principal es el carbonato de calcio son la smithsonita (ZnCO_3), la rodocrosita (MnCO_3) y la magnesita (MgCO_3). Todos los minerales mencionados se agrupan en sub-grupos denominados grupo de la calcita (cristalografía hexagonal), el grupo del aragonito (cristalografía

ortorrómbica) y los grupos de la dolomita (hexagonal) y de los carbonatos monoclinicos como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) y la azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), con presencia de iones hidróxido en su estructura.

Otro mineral que ayuda a cementar los suelos es el óxido de silicio (SiO_2). El SiO_2 es uno de los componentes principales de las arenas y una de las formas en que aparece naturalmente es el cuarzo. Este compuesto está ordenado espacialmente en una red tridimensional (cristalizado) que forma el cuarzo y todas sus variedades. Si el SiO_2 se encuentra en estado amorfo constituye el ópalo, que suele incluir un porcentaje elevado de agua, y el sílex. El óxido de silicio se usa entre otras cosas, para hacer vidrio artificial, cerámicas y cemento. El gel de sílice es un desecante, es decir que quita la humedad del lugar en que se encuentra.

Por otra parte, se encuentran los óxidos de hierro. Dichos compuestos químicos están formados por hierro (Fe) y oxígeno (O). Se conocen 16 óxidos de hierro, dentro de los que se destacan hematita, magnetita, maghemita, lepidocrocita, akaganéita, feroxihita, ferrihidrita y la bernalita. A continuación, se listan los óxidos de hierro que contribuyen a la cementación de suelos: óxido de hierro (II) u óxido ferroso (FeO); óxido de hierro (III) u óxido férrico (Fe_2O_3); óxido de hierro (II, III) u óxido ferroso férrico (Fe_3O_4).

METODOLOGÍA

Materiales

Los materiales del estudio fueron tomados en el municipio de Madrid, en el departamento de

Cundinamarca, a 29 km de Bogotá (ver Figura 2). Madrid forma parte de la provincia de la Sabana de Occidente junto con los municipios de Mosquera, Funza, Bojacá, Subachoque, El Rosal, Sibaté, Zipacón y Tenjo. Además, limita con la cabecera provincial Facatativá. El municipio tiene una superficie de 120,5 km² y lo forma parte de las cuencas hidrográficas de los ríos Bojacá y Subachoque. La topografía del sector es plana ligeramente ondulada y se encuentra a 2.550 msnm.

Los suelos de Madrid están conformados principalmente por planicies de terraza y planicies de inundación del cuaternario pertenecientes a modelado aluvial y que corresponden al Grupo Guadalupe, en su mayoría. En el municipio de Madrid afloran rocas sedimentarias de origen Marino y continental, suprayacidas discordantemente por depósitos recientes de rellenos fluvio-lacustres y aluviales que ocupan gran parte del área del municipio.

Las formaciones que conforman la geología de la zona están asociadas a la Sabana de Bogotá. Dicha zona se localiza en la cresta de la cordillera Oriental de los Andes a altitudes entre 2500 y 2700 metros sobre el nivel del mar. Además, está conformada por una planicie intramontañosa con una forma irregular de alrededor de 800 km², con más de 500 m de sedimentos del Plio-Cuaternario. En su mayor parte, los materiales que conforman esta región son de origen Lacustre con bajo grado de consolidación y débilmente estructurados [13]. Se estima que su formación ocurrió hace 2,5 a 5,0 millones de años durante un intenso periodo de deformación, por lo que el relleno de la Sabana de Bogotá tiene una edad cercana a los 5 millones de años.

Figura 2. Ubicación geográfica de Madrid (Cundinamarca, Colombia).

Alrededor de la Sabana de Bogotá se presentan rocas sedimentarias estratificadas provenientes del sistema montañoso adyacente a la misma [14]. Las partes elevadas están constituidas por areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe y de edad Cretácea. Por lo general, dichas rocas forman anticlinales; mientras que en los piedemontes y relieves bajos predominan rocas arcillolíticas blandas de edad terciaria, las que por lo común conforman sinclinales. Dichas unidades geológicas por lo general están cubiertas por depósitos cuaternarios.

Plan experimental

Se realizaron seis sondeos en los que se extrajeron muestras inalteradas de suelos arcillosos mediante el método de tubo de pared delgada, denominado tubo shellby, según el procedimiento de la norma ASTM D1587 [15]. Los sondeos fueron ejecutados en sitios adyacentes, separados a 3 metros de distancia en una zona donde la superficie del terreno es plana, en un punto localizado en las coordenadas 4°43'22.82"N-74°15'8.10"W. Dichas coordenadas se localizan a 100 m de la esquina de Calle 7 con Carrera 28 del municipio de Madrid (Cundinamarca, Colombia). Así pues, se recuperaron especímenes alterados e inalterados, a una profundidad similar, para ejecutar un plan experimental en laboratorio que incluyó ensayos de clasificación física y resistencia al corte no drenada (S_u) mediante compresión confinada (Figura 3). Dentro de los ensayos de clasificación física que se ejecutaron se incluyeron contenido de humedad natural (ASTM D2216 [16]), gravedad específica de las partículas sólidas (ASTM D854 [17]) y límites de plasticidad (ASTM D4318 [18]). Además, se estimó el peso unitario mediante el método de la parafina y se clasificaron los suelos acorde con el SUCS [19]. La Tabla 2 presenta los valores obtenidos en los ensayos laboratorio.

Figura 3. Resultados ensayos de compresión confinada en muestras inalteradas.

Sumado a la caracterización anterior, se desarrolló un proceso de reconstitución de muestras. En dicho procedimiento se aprovecharon las muestras de la campaña experimental y se adicionaron materiales cementantes al suelo. El proceso de reconstitución de muestras se dividió en cinco fases que incluyeron: (i) preparación de muestras con material natural, (ii) adición de 2% de CaCO_3 , (iii) adición de 5% de CaCO_3 , (iv) adición de 2% de FeO , y (v) adición de 5% de FeO . El propósito de dicha modificación fue evaluar la recuperación de S_u de las muestras, mediante la implementación de materiales cementantes alternativos que alteraran la estructura del suelo. En la Figura 4 se muestra a nivel microscópico la unión entre partículas inducida por la adición de FeO .

Se prepararon dieciocho especímenes cilíndricos de 7 cm de diámetro y 15 cm de altura, aproximadamente, correspondientes a seis especímenes por cada

Tabla 2. Propiedades físicas de los materiales.

Sondeo	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Profundidad [m]	1,00-2,40	1,60-3,10	1,00-2,20	1,00-2,20	1,20-2,40	1,20-2,40
γ [kN/m^3]	16,52	17,30	17,73	17,10	16,30	16,30
γ_d [kN/m^3]	10,90	11,20	12,10	11,11	10,11	10,43
Gs	2,58	2,60	2,58	2,60	2,61	2,58
ω [%]	51,60	54,50	46,10	57,70	62,10	57,50
LL [%]	79,90	79,20	68,10	81,80	84,10	83,50
LP [%]	22,70	22,50	22,40	22,80	23,60	24,40
IP [%]	54,20	56,70	45,70	58,90	60,50	59,10
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH

Figura 4. Visualización mediante microscopio electrónico de barrido de un suelo arcilloso cementado.

tratamiento de estabilización. Todos los especímenes remoldados fueron compactados hasta obtener el peso unitario seco *in-situ* bajo el contenido de humedad que se presentó en la Tabla 2. El procedimiento de preparación de muestras incluyó la compactación de 4 capas de 3,30 cm, mediante la aplicación lenta de carga mediante un actuador hidráulico. La Figura 5 describe la preparación de las muestras y muestra el sistema de compactación utilizado.

Por otra parte, se desarrollaron ensayos de caracterización mecánica, con el fin de establecer los parámetros de deformación y resistencia al corte en condiciones inalteradas y modificadas con CaCO_3 y FeO . Se llevaron a cabo tres ensayos

de consolidación unidimensional mediante el método de Casagrande y tres ensayos de corte directo tipo CD (Figuras 6 y 7). Dichos ensayos se ejecutaron con muestras de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura obtenidas después de cortar las muestras para los ensayos de compresión inconfiada.

Se observó que el suelo compactado y estabilizado con FeO presentó los valores más cercanos en términos de compresibilidad a los de la muestra natural (ver Tabla 3). En contraste, no se registraron incrementos de resistencia al corte de los suelos estabilizados. Además, no se observaron variaciones entre los parámetros de resistencia al corte entre las muestras modificadas. Lo anterior indica que en términos de compresibilidad el tratamiento con FeO es el más eficaz para recuperar las condiciones inalteradas de los suelos arcillosos de la Sabana de Bogotá, mientras que la estabilización de dichos materiales tanto con CaCO_3 como con FeO no tienen efecto significativo en los parámetros de resistencia al corte efectivos o de largo plazo.

Finalmente, se ejecutaron veinticuatro ensayos de compresión inconfiada (incluidos los seis ensayos de las muestras inalteradas y los dieciocho de las muestras estabilizadas) con el fin de establecer S_u y la sensibilidad del material arcilloso tratado mediante diferentes métodos. Dichos ensayos fueron ejecutados tanto con muestras inalteradas, como con especímenes compactados y estabilizados bajo el procedimiento descrito previamente.

Figura 5. Proceso de reconstitución de muestras: (a) adición material estabilizador; (b) compactación; (c) final.

Figura 6. Curvas de consolidación.

Figura 7. Envolventes de falla.

Tabla 3. Parámetros edométricos y de envolvente de falla.

Muestra	Cc	Cr	Cs	σ' ₀ [kPa]	γ' [kPa]	π' [°]
Natural	0,56	0,14	0,12	85	64	29
CaCO ₃	0,48	0,16	0,16	65	2	16
FeO	0,50	0,12	0,08	80	3	17

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de S_u de los especímenes inalterados revelaron que la resistencia mínima se produjo en la muestra S10, mientras que la resistencia máxima se produjo en la muestra S7. Por lo tanto, es válido afirmar que en los suelos de la zona de estudio la resistencia al corte no presenta variaciones a medida que se avanza en profundidad. Sin embargo, lo anterior contradice el supuesto de [20, 21] que establece los suelos localizados a mayor profundidad

poseen un grado de consolidación menor que los suelos superficiales.

Por otra parte, se evaluó la resistencia a la compresión confinada de muestras compactadas sin adición de materiales cementantes y de muestras modificadas con CaCO_3 y FeO (ver Figura 8). Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las muestras remoldadas y las muestras estabilizadas con CaCO_3 . No obstante, las muestras

Figura 8. Resistencia a la compresión confinada: (a) muestras remoldadas; (b) muestras con CaCO_3 ; (c) muestras con FeO .

mejoradas con FeO presentaron un incremento promedio entre 71,6% y 57,7% en relación a los dos tratamientos mencionados anteriormente. La Tabla 4 presenta la comparación entre los valores de S_u encontrados en el desarrollo del plan experimental.

Pese a lo anterior, en ninguno de los tratamientos se consiguió recuperar totalmente el valor de S_u en condiciones inalteradas. Así pues, se estimó el grado de sensibilidad del suelo remoldado y estabilizado. La Tabla 5 muestra los resultados de dichos cálculos. Al mismo tiempo, se encontró que la sensibilidad de la arcilla de la Sabana de Bogotá presenta cambios con la adición de minerales cementantes, principalmente con los derivados de Hierro. No obstante, dichos cambios no son significativos; debido a que la arcilla estudiada presenta sensibilidad baja.

El mejoramiento de suelos, también, busca mejorar sus características de deformación [22]. Por lo tanto, se estimó el módulo tangente inicial (E_i) de las arcillas en estado natural, remoldado y estabilizado mediante el procedimiento descrito por [23]. Dicho procedimiento incorpora el modelo

hiperbólico formulado por [24]. De esta manera, se establecieron los valores de E_i mediante un abordaje que involucrara la no-linealidad y estado de esfuerzos. La ecuación (2) presenta el modelo hiperbólico; donde q corresponde al esfuerzo desviador, ε la deformación axial y q_{ult} el esfuerzo desviador último de la parametrización del modelo.

$$q = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{q_{ult}}} \quad (2)$$

Se evidenció que los valores promedio de E_i de las muestras remoldadas y las mejoradas tanto con CaCO_3 como con FeO se corresponden a 21%, 48% y 106%, respectivamente, el valor de E_i en estado natural. De esta manera, se comprobó que el proceso de remoldeo afecta en gran medida las propiedades elásticas de la arcilla de la Sabana de Bogotá, debido a la ruptura de su estructura. Asimismo, se encontró que el producto con los resultados de E_i más cercanos e incluso superiores a los obtenidos en estado natural es el FeO. La Tabla 6 muestra los resultados del cálculo del modelo hiperbólico.

Tabla 4. Valores de S_u en kPa.

Sondeo	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Natural	26	17	27	35	18	31
Remoldeado	8	12	11	9	8	10
CaCO_3	10	10	11	11	9	11
FeO	17	15	19	15	13	19

Tabla 5. Sensitividad del suelo modificado.

Sondeo	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Clasificación de la sensibilidad
Remoldeado	3,25	1,42	2,45	3,89	2,25	3,10	Sensitividad baja
CaCO_3	2,60	1,70	2,45	3,18	2,00	2,82	Sensitividad baja
FeO	1,88	1,13	1,42	2,33	1,38	1,63	No sensibilidad

Tabla 6. Módulos de elasticidad calculados mediante modelo hiperbólico en MPa.

Sondeo	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Natural	45,69	42,04	36,33	64,63	58,25	54,02
Remoldeado	6,05	13,77	11,52	9,09	5,39	16,25
CaCO_3	23,63	22,47	21,56	29,81	25,57	19,28
FeO	40,73	49,11	44,17	77,37	59,28	46,33

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico con el propósito de cuantificar la variabilidad de los resultados de sensibilidad y módulos de elasticidad entre los tratamientos implementados en esta investigación. Se llevó a cabo un análisis de varianza univariado (ANOVA). Los resultados de los ANOVA se presentan en la Tabla 7. Dichos resultados revelaron que los tratamientos difieren entre sí, bajo un nivel de significancia del 95%, tanto para los valores de sensibilidad como para los valores de E_i , dado que el p -valor en ambas pruebas fue menor al nivel de significancia (p -valor $< 1-\alpha$). Los resultados dicha comparación revelaron que existe suficiente evidencia estadística para demostrar que los resultados de resistencia y elasticidad difieren respecto al material en estado inalterado, en por lo menos una de las condiciones estudiadas.

Es necesario aclarar que cuando se comparan más de dos tratamientos (como en este trabajo) el modelo ANOVA no permite establecer cuáles son los tratamientos presentan la misma varianza [25]. Debido a lo anterior, se realizó una comparación múltiple de los resultados utilizando el método de Tukey [26] con el fin

de establecer las agrupaciones que existen en el conjunto de resultados, bajo un de confianza del 95%. El método Tukey compara de manera simultánea la variación de la media de los valores obtenidos en los cálculos de sensibilidad y módulo de elasticidad de todos los tratamientos. En este estudio se seleccionó intervalo de confianza que para este caso corresponde al 95%.

En la Figura 9 se establecen las agrupaciones entre los tratamientos mediante comparaciones múltiples. La interpretación de dicha Figura se basa en la aproximación de sus intervalos de confianza respecto a un punto en común, que para el caso del método Tukey corresponde a 0. De esta manera, se encontró que existe proximidad entre los resultados de sensibilidad entre las muestras remoldadas y las muestras estabilizadas con CaCO_3 . Por otra parte, se evidenciaron dos agrupaciones entre los valores de E_i . Dichas asociaciones corresponden: (i) las muestras remoldadas y las muestras estabilizadas con CaCO_3 ; (ii) las muestras naturales y las muestras estabilizadas con FeO . Por lo tanto, se validó estadísticamente que el producto con mejores resultados en términos de tixotropía en los suelos arcillosos de la Sabana de Bogotá es el FeO .

Tabla 7. Resultados ANOVA.

Fuente	Origen variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de suma de cuadrados	Prueba F	p -valor
S_t	Entre grupos	2	4,25	2,13	4,96	0,0221
	Dentro del grupo (residuos)	15	6,42	0,43		
E_i	Entre grupos	3	7684,02	2561,12	31,1	9,98E-8
	Dentro del grupo (residuos)	20	1647,14	82,41

Figura 9. Comparaciones múltiples mediante método Tukey: (a) Sensitividad; (b) Módulo tangente inicial.

CONCLUSIONES

En este documento se abordó un estudio experimental en laboratorio que compara las propiedades esfuerzo deformación muestras inalteradas, remoldeadas y tratadas un de un suelo arcilloso proveniente de la Sabana de Bogotá. Se implementación dos productos químicos sólidos para tratar el suelo y se evaluó el comportamiento de todas las muestras en términos de capacidad de recuperación de resistencia al corte no drenada y módulo de elasticidad inicial. En complemento, se ejecutó un estudio estadístico en el que fueron considerados los resultados experimentales mediante un modelo de análisis de varianza univariado y se realizaron comparaciones múltiples mediante el método Tukey. Del trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se encontró que es posible mejorar los suelos arcillosos de la Sabana de Bogotá mediante la aplicación de minerales cementantes sin necesidad de curado y agentes catalizadores o activadores. Lo anterior permite estabilizar suelos susceptibles a alteraciones en sus propiedades esfuerzo deformación con productos químicos sólidos que no son contaminantes potenciales al medio ambiente y de fácil transporte.
2. Se estableció un método de preparación o remoldeo de muestras en suelos finos mediante un procedimiento de compactación basado en la obtención del peso específico inicial y la aplicación continua de carga vertical mediante un actuador hidráulico. Asimismo, en dicho método se implementó un proceso de adición de materiales estabilizantes alternativos. La Figura 4 reveló que los productos químicos sólidos usados en este estudio complementan la estructura de los suelos de la Sabana de Bogotá.
3. Se observó que los parámetros de consolidación de las muestras analizadas son cercanos entre sí. Además, se encontró que la resistencia al corte en términos efectivos es mayor en los materiales naturales. Lo anterior indica que los tratamientos implementados en esta investigación no tienen efecto al largo plazo. Por lo tanto, la estabilización con CaO_3 y FeO es una alternativa para el mejoramiento de parámetros en condiciones no drenadas y propiedades elásticas.
4. Se identificó que los resultados de S_u y E_i difieren según el producto implementado. Paralelamente, se realizó un análisis de varianza a dichos resultados y, posteriormente, los mismos fueron agrupados bajo un nivel de significancia del 95%. Los resultados de las muestras tratadas con CaO_3 se agruparon dentro del mismo conjunto de valores de las muestras remoldadas. Mientras que los resultados de las muestras tratadas con FeO se agruparon en mismo grupo de las muestras naturales.
5. Otro aspecto importante observado en las muestras tratadas con FeO fue que los valores de los parámetros esfuerzo-deformación son cercanos, y en algunos casos superiores en 5%, a los de las muestras naturales inalteradas. Por lo tanto, se estableció que dicho material es el de mejores resultados en la estabilización de suelos de la Sabana de Bogotá con productos químicos que no requieren agentes estabilizantes.

REFERENCIAS

- [1] H. Kukko. "Stabilization of Clay with Inorganic By-Products". Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 12 Issue 4, pp. 307-309. 2000. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(307)
- [2] L.S. Wong, S. Mousavi, S. Sobhani, S.Y. Kong, A.H. Birima and N.I. Mohd Pauzi. "Comparative measurement of compaction impact of clay stabilized with cement, peat ash and silica sand". Measurement. Vol. 94, pp. 498-504. 2016. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2016.08.029
- [3] S. Horpibulsuk, R. Rachan and A. Suddeepong. "State of the art in strength development of soil-cement columns". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement. Vol. 165 Issue 4, pp. 201-215. 2012. DOI: 10.1680/grim.11.00006
- [4] M. Ayeldeena and M. Kitazumeb. "Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay". Geotextiles and Geomembranes. Vol. 45 Issue 6, pp. 592-602. 2017. DOI: 10.1016/J.GEOTEXMEM.2017.05.005
- [5] J.E. Bowles. "Physical and Geotechnical Properties of Soils". 2nd ed. New York, McGraw-Hill. 1979.

- [6] D.M. Wood. "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics". 1st ed. Cambridge University Press. 1991.
- [7] A. Viana da Fonseca and J. Pineda. "Getting high-quality samples in "sensitive" soils for advanced laboratory tests". *Innovative Infrastructure Solutions*. Vol. 2 N° 1, pp. 34. 2017. DOI: 10.1007/s41062-017-0086-3
- [8] A.W. Skempton and R.D. Northey. "The Sensitivity of Clays". *Géotechnique*. Vol. 3 N° 1, pp. 30-53. 1952. DOI: 10.1680/geot.1952.3.1.30
- [9] J.-P. Bardet. "Experimental Soil Mechanics". New Jersey, Prentice Hall. 1997.
- [10] N.C. Consoli, F.D. Rosa and A. Fonini. "Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 135 N° 12, pp. 1846-1856. 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000158
- [11] F. Panico and A. Viana da Fonseca. "Long Term Cyclic Response of a Soil-Cement Mixture: Experimental Study and Modelling". *Procedia Engineering*. Vol. 143, pp. 178-186. 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.023
- [12] S. Rios, A. Viana da Fonseca and B.A. Baudet. "On the shearing behaviour of an artificially cemented soil". *Acta Geotechnica*. Vol. 9 Issue 2, pp. 215-226. 2014. DOI: 10.1007/s11440-013-0242-7
- [13] O. Coronado, B. Caicedo, S. Taibi, A. G. Correia and J.-M. Fleureau. "A macro geomechanical approach to rank non-standard unbound granular materials for pavements". *Engineering Geology*. Vol. 119 Issue (1-2), pp. 64-73. 2011. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.02.003
- [14] F.A. Molina-Gómez, J. Camacho-Tauta, O.J. Reyes-Ortiz. "Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents". *Revista Tecnura*. Vol. 20 N° 49, pp. 75-85. 2016. DOI: dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a05
- [15] ASTM International. "ASTM D1587 - Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes". 2010.
- [16] ASTM International. "ASTM D2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass". 2010.
- [17] ASTM International. "D854 - Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer". 2014.
- [18] ASTM International. "D4318 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". 2010.
- [19] ASTM International. "D2487 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". 2010.
- [20] P.W. Mayne. "Determining OCR in Clays from Laboratory Strength". *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 114 Issue 1, pp. 76-92. 1988. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:1(76)
- [21] J.P. Sully, R.G. Campanella and P.K. Robertson. "Overconsolidation Ratio of Clays from Penetration Pore Pressures". *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 114 N° 2, pp. 209-216. 1988. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(209)
- [22] S. Rios, N. Cristelo, A. Viana da Fonseca and C. Ferreira. "Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains". *International Journal of Geomechanics*. Vol. 17 N° 3, pp. 4016087. 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000783
- [23] M.D. Boscardin, E.T. Selig, R. Lin and G. Yang. "Hyperbolic Parameters for Compacted Soils". *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 116 Issue 1, pp. 88-104. 1990. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:1(88)
- [24] R.L. Kondner. "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. Vol. 89 N° 1, pp. 115-144. 1963.
- [25] D.C. Montgomery. "Design and analysis of experiments". John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [26] J.W. Tukey. "Comparing Individual Means in the Analysis of Variance". *Biometrics*. Vol. 5 Issue 2, pp. 99. 1949. DOI: 10.2307/3001913