

Efecto de la aplicación de cáñamo en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla

Effect of the addition of hemp fiber in the properties of strenght and resistivity in a clayey soil

Efeito da adição de fibra de cânhamo nas propriedades de resistêcia e resistividade em um solo argiloso

Luis Alberto Cáceres Cárdenas^a | Karen Inés Eslava Moreno^{*b} | Edwin Ricardo Álvarez Vega^c

^a <https://orcid.org/0000-0001-8399-7683> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

^b <https://orcid.org/0000-0002-1756-5812> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

^c <https://orcid.org/0000-0002-6737-8070> Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

- Fecha de recepción: 2022-07-18
- Fecha concepto de evaluación: 2022-09-12
- Fecha de aprobación: 2022-09-15

<https://doi.org/10.22335/rlct.v14i3.1650>

Para citar este artículo/To reference this article/Para citar este artigo: Cáceres Cárdenas, L. A. Eslava Moreno, K. I. y Álvarez Vega, E. R. (2022). Efecto de la aplicación de cáñamo en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 14(3), 8-23. <https://doi.org/10.22335/rlct.v14i3.1650>

RESUMEN

La investigación tiene el objetivo de hallar el efecto y proporción adecuada de la fibra de cáñamo de 4 cm de longitud, en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla. Las propiedades investigadas incluyen la humedad óptima (w_{opt}); el peso unitario seco máximo (γ_{dmax}), cohesión (c); ángulo de fricción (Φ), resistencia a la compresión inconfiada (q_u), y resistividad eléctrica (ρ). Los ensayos de compactación Proctor modificado (ASTM D 1557-12), corte directo consolidado no drenado (CU) para suelos cohesivos (ASTM 6528-17), resistencia a la compresión inconfiada (ASTM D2166-16) y del ensayo de los cuatro electrodos de Wenner (ASTM G57-01I), se aplicaron en tres muestras de arcilla con diferentes proporciones de fibra de cáñamo; muestra patrón, A_p , de 100 % arcilla de la ciudad de Tunja, Colombia, muestra con 0.5 % y 0.75 % de fibra de cáñamo, $A_{0.5}$ %, y $A_{0.75}$ %, con relación al peso seco del material. Los resultados del presente estudio indican que el porcentaje óptimo de cáñamo es 0.5 %, evidenciando disminución en las propiedades de compactación, y aumento de las propiedades de resistencia al corte, resistencia a la compresión inconfiada, y de resistividad eléctrica; sin embargo, ante mayor presencia de fibra, se presenta destrucción de la matriz arcillosa.

Palabra clave: ingeniería geológica, mecánica de suelos, materiales de construcción, arcilla, fibra natural.

ABSTRACT

The investigation has the aim of finding the effect and adequate proportion of the hemp fiber of 4 cm in length, in the mechanical and resistivity properties of a clayey soil. Properties investigated include optimum moisture content (w_{opt}); the maximum dry unit weight, (γ_{dmax}), cohesion (c); friction angle (Φ), unconfined compressive strength (q_u), and electrical resistivity (ρ). The modified Proctor compaction tests (ASTM D 1557-12), direct consolidated undrained shear, CU, for cohesive soils (ASTM 6528-17), unconfined compressive strength (ASTM D2166-16) and Wenner's four electrode test (ASTM G57-01I), were applied to three clay samples with different

proportions of hemp fiber; standard sample, A_p , of 100 % clay from the city of Tunja, sample with 0.5 % and 0.75 % hemp fiber, $A_{0.5\%}$, and $A_{0.75\%}$, in relation to the dry weight of the material. The results of this study indicate that the optimal percentage of hemp is 0.5 %, showing a decrease in compaction, and an increase in shear strength, electrical resistivity properties and unconfined compression properties; nevertheless, with a greater presence of fiber, there is destruction of the clayey soil.

Keywords: geological engineering, soil mechanics, construction materials, clay, natural fiber.

RESUMO

A investigação tem como objetivo encontrar o efeito e a proporção adequada da fibra de cânhamo de 4 cm de comprimento, nas propriedades mecânicas e de resistividade de um solo argiloso. As propriedades investigadas incluem teor de umidade ótimo (w_{opt}); o peso unitário seco máximo, ($\gamma_{dmáx}$), coesão (c); ângulo de atrito (Φ), resistência à compressão não confinada (q_u) e resistividade elétrica (ρ). Os testes de compactação Proctor modificados (ASTM D 1557-12), cisalhamento não drenado consolidado direto, CU, para solos coesivos (ASTM 6528-17), resistência à compressão não confinada (ASTM D2166-16) e teste de quatro eletrodos de Wenner (ASTM G57-01) , foram aplicados em três amostras de argila com diferentes proporções de fibra de cânhamo; amostra padrão, A_p , de 100 % argila da cidade de Tunja, amostra com 0,5 % e 0,75 % de fibra de cânhamo, $A_{0,5\%}$ e $A_{0,75\%}$, em relação ao peso seco do material. Os resultados deste estudo indicam que a porcentagem ótima de cânhamo é de 0,5%, mostrando uma diminuição na compactação e um aumento na resistência ao cisalhamento, propriedades de resistividade elétrica e propriedades de compressão não confinada; porém, com maior presença de fibra, há destruição do solo argiloso.

Palavras-chave: engenharia geológica, mecânica dos solos, materiais de construção, argila, fibra natural.

Introducción

En el diseño y construcción de obras civiles, la estabilidad del suelo que soportará la estructura es una característica que debe ser determinada con precisión, para evitar serios problemas en la vida útil de la obra. Estudios han evidenciado que es necesario implementar procesos de mejoramiento y estabilización de suelos, para corregir potenciales problemas de estabilidad y deformación que el suelo puede causar en la obra de interés.

En la actualidad, se ha introducido el uso de materiales sustentables, tales como la inclusión de fibras naturales como yute, palma, sisal, cáñamo, bonote, fique, entre otros. Investigaciones recientes demuestran que el cáñamo tiene buena respuesta en arcillas compactadas, siendo práctica común usar esta mezcla en taludes de corte, para la corrección de fallas superficiales en laderas, mejoramiento en los rellenos y el reforzamiento de capas granulares de pavimento, entre otros beneficios (Abou Diab *et al.*, 2018).

Estudios relacionados en suelos arcillosos evidencian aumento en propiedades de resistencia

al corte (Converse, 1952; Ammar *et al.*, 2019; Prinz y Strauss, 2006), incluso, se han hallado valores de cohesión (c) y fricción (Φ) similares a aquellos suelos mejorados con fibras sintéticas (Chegenizadeh y Nikraz, 2011). Otros trabajos investigativos indican la incidencia de la longitud de fibras y del método de compactación en la variación de la resistencia al corte (Abou Diab *et al.*, 2018). Varios autores demuestran que el aumento en la resistencia al corte no drenado (c_u) se debe a que la adición de fibras aumenta las fuerzas interlaminares de la molécula de arcilla (Cai *et al.*, 2006; Boz *et al.*, 2018). Otros análisis evidencian que la presencia de fibra aumenta la resistividad eléctrica de los suelos arcillosos, interfiriendo entonces con la retención de agua de las moléculas de arcilla, demostrando que aunque la estructura no cambie, la fábrica del suelo sí se ve afectada (Naik y Mishra, 2005).

Una de las principales ventajas que se obtienen al usar fibra de cáñamo con orientación aleatoria respecto a la orientación definida, es la significativa reducción de posibles planos de falla (Attom *et al.*, 2009). Así, la idea principal de este estudio es evaluar el efecto en las condiciones de compactación, resistencia al corte

y resistividad eléctrica de un material blando del subsuelo de la ciudad de Tunja, mediante la adición de fibra de cáñamo. Para caracterizar el suelo seleccionado, se aplicaron ensayos para suelos finos, y, una vez conocidas sus propiedades geotécnicas, se conformaron dos muestras de suelo de arcilla y fibra de cáñamo de 4 cm de largo, en dos proporciones; 0.5 % y 0.75 % del peso seco requerido, confrontadas con las propiedades de la arcilla patrón A_p , realizando ensayos de compactación Proctor modificado (ASTM D 1557-12), corte directo consolidado no drenado CU (ASTM 6528-17), resistencia a la compresión confinada (ASTM D2166-16) y ensayo de resistividad de los cuatro electrodos de Wenner (ASTM G57-01). Asimismo, se realizaron pruebas químicas y mineralógicas para observar su composición y estructura. Una vez obtenidos los resultados, se determinó cuáles parámetros lograron o no variar y en qué medida en comparación con el tratamiento de control. Por último, se estableció la mejor mezcla de suelo y fibra; para una arcilla de baja plasticidad tipo caolinita, proveniente del sector noroeste de la ciudad de Tunja, la proporción adecuada de fibra es de 0.5 % del peso seco del suelo. Cabe aclarar que los estudios se realizaron en condiciones remoldeadas, sin tener en cuenta interfaz de suelo y fibra o el comportamiento de la fibra en la matriz de suelo a través del tiempo.

Metodología

Materiales

Se conformaron tres muestras de suelo fino de consistencia blanda, y fibra de cáñamo de 4

cm de longitud, con dos diferentes proporciones de cáñamo según el peso seco requerido para cada ensayo, asignando las muestras como Arcilla Patrón, A_p , Arcilla con 0.5 % de cáñamo, $A_{0.5\%}$, y Arcilla con 0.75 % de Cáñamo, $A_{0.75\%}$ (Abou Diab *et al.*, 2018; Mazhoud *et al.*, 2017; Widiandi y Diana, 2020). El material que se seleccionó para reunir las tres mezclas de suelo, se obtuvo del resultado de la excavación realizada en la operación de pilotaje del edificio de posgrados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC] ubicado en la zona urbana nororiental de la ciudad de Tunja.

La fibra que se usó en la investigación se adquirió de la fábrica Hemp Traders, ubicada en Paramount, California, EE. UU., cuyas propiedades índice son las recomendadas por Eichhorn *et al.* (2001), Lu *et al.* (2012), y Abou Diab *et al.* (2016). La fibra adquirida es enriada y cardada, comprada en kg según lo requerido en cada prueba. El suelo utilizado fue recolectado a medida que la piloteadora avanzaba en la preexcavación de cada pilote, siendo este, semi-inalterado, húmedo, blando, de colores (entre café, ocre, gris) y pequeñas trazas de un material color azul rey intenso, incluidas en la estructura del suelo en pequeñas inclusiones.

Los materiales usados se muestran en la figura 1. El material arcilloso se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL), con un contenido de humedad (w_n) igual a 18 %; con límite líquido (LL) de 46.3 %; límite plástico (LP) de 23,8 %; índice de plasticidad (IP) igual a 22.5 %, y gravedad específica (G_s) de 2.65.

Figura 1

Materiales usados para la investigación



1a.



1b.

Nota. La Figura 1a. es una muestra de la arcilla utilizada en la investigación. Es evidente los colores terracota, ocre y pequeñas láminas de azul rey. La Figura 1b corresponde a una muestra de fibra de cáñamo, cortada a 4 cm de longitud.

La longitud de las fibras fue de 4 cm, cortando la fibra y separándola manualmente. Se determinó dicha longitud de fibra, promediando las longitudes dadas por Abou Diab *et al.* (2018), Mazhoud *et al.* (2017) y Widiyanti y Diana (2020), entre otros autores, los cuales varían la longitud entre 1 y 10 cm, encontrando que aumenta la posibilidad de generación de planos de falla a mayor longitud; ya que, de la longitud de ésta, la resistencia a la compresión y a la tensión variarán significativamente. Además, estudios demuestran que una longitud corta aumenta la resistencia a la compresión de mezclas en mayor porcentaje, que al hacerlo con una fibra de mayor longitud (Millogo *et al.*, 2014). Para mezclar la fibra con el material arcilloso, se usó un cardador de lana manual hecho en madera con agujas de fieltro con 108 puntos por pulgada cuadrada, y así, obtener una mezcla lo más homogénea posible.

Las muestras fueron conformadas según el peso seco que requiere cada ensayo; se usó 2500 g de material arcilloso, para cada uno de los ensayos de clasificación, resistencia y resistividad, las cuales se obtuvieron de una mezcla manual entre el suelo húmedo, según la adición de agua destilada óptima en el ensayo de Proctor determinado en cada tratamiento; mientras que la fibra fue separada, desmenuzada y mezclada mediante agitación manual. La cantidad de material necesario para cada ensayo fue pasada por tamiz número 4 para cada probeta, la cual fue secada al aire libre y triturado manualmente hasta obtener la granulometría deseada. De esta manera, se reunieron tres tipos de muestras de suelo.

■ Métodos

La descripción e identificación de suelos, método visual (ASTM D2488-17), análisis granulométrico de los agregados (ASTM D422-16), determinación de los límites de Atterberg (ASTM D4318-17), lavado sobre tamiz 200 (ASTM D117-18), determinación de gravedad específica (ASTM D854-14), determinación de contenido de agua (ASTM D2216-10), y la clasificación de suelos para propósitos ingenieriles (ASTM D2486-17), son los ensayos requeridos para clasificar el suelo.

Los ensayos realizados permitieron estimar propiedades de compactación del suelo arcilloso, llevando a cabo los ensayos en laboratorio con un contenido óptimo de humedad y peso unitario seco máximo, determinado por medio del ensayo de compactación Proctor modificado (ASTM D 1557-12). Se escogió el método de ensayo de corte directo consolidado no drenado (CU), para suelos cohesivos (ASTM 6528-17), debido a la tasa de desplazamiento del ensayo consolidado drenado es mucho menor para permitir la disipación de presión de poros.

Dado que se trata de un suelo arcilloso, se determinaron las propiedades de peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y el contenido de humedad óptimo ($w_{\acute{o}pt}$) con el método A, aplicable para suelos que retengan menos del 25 % en el tamiz número 4 (4.75 mm).

Se realizaron igualmente pruebas de corte directo consolidado no drenado para suelos cohesivos (ASTM D6528-17) y de resistencia a la compresión inconfiada (ASTM D2166-16). Para determinar la resistencia al corte en condiciones consolidadas no drenadas (CU) y la resistencia a la compresión simple, se extrajeron núcleos necesarios de las probetas compactadas a una humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$), teniendo en cuenta lo establecido en el método C del ensayo de compactación de esfuerzo modificado (ASTM D1557-12).

La resistividad eléctrica del suelo se calculó a través del ensayo de los cuatro electrodos de Wenner (ASTM G57-01), en el que se aplican campos eléctricos artificiales que viajan a través de las capas del suelo y pueden ser interpretados como resistividad o conductividad. Para realizar el ensayo, se utilizó el equipo de medición de resistividad eléctrica de Wenner, realizado por el Ing. y Msc. Edwin Ricardo Álvarez Vega, basándose en el diseño ajustado a laboratorio propuesto por Abu-Hassanein *et al.* (1996). Este equipo se basó en el método de los cuatro electrodos de Wenner, sin embargo, el ingeniero Vega modificó el modelo propuesto de Wenner, ya que el recipiente de lucita no soporta la energía de compactación ejercida para conformar y compactar las muestras. Por lo anterior, se cambió la caja de lucita, por un tubo de PVC de 4" de diámetro y

de 4,5" de altura, con dos orificios para ubicar los electrodos separados a 1.5", tal como se observa en la Figura 2 (Wenner, 1915; Álvarez Vega, 2018; Aba-Hassanein *et al.*, 1996).

Teniendo en cuenta lo mencionado en el ensayo de resistividad eléctrica de suelos, se envió un impulso eléctrico en el suelo, por medio de un generador de señal, interpretado como una corriente alterna sinusoidal medida por el amperímetro. Se aplicó una frecuencia de salida de 97 Hz, y un voltaje de salida de 20 V.

Figura 2

Equipo de Resistividad de los Cuatro Electrodos de Wenner



Nota. Se muestra el Equipo de los cuatro electrodos de Wenner, ensamblado por Álvarez Vega (2018) y adaptado a la muestra de suelo compactada.

Los anteriores ensayos se ejecutaron cuatro veces por cada uno, con el objetivo de obtener un valor representativo, ya que, el material remodelado no tendrá las mismas características que un material no perturbado.

Las propiedades químicas del suelo se obtuvieron según los resultados otorgados por el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], mientras que, los resultados obtenidos para los ensayos de calidad del suelo de determinación del pH (NTC 5264, 2008), determinación de la capacidad de intercambio catiónico [CIC] (NTC 5268, 2008), determinación de la conductividad eléctrica (NTC 5596, 2008), determinación de las bases intercambiables: los cationes Ca, Mg, Na y K (NTC 5349, 2005), la determinación de la acidez, Al e H intercambiables (NTC 5263, 2017), la determinación de F disponible (NTC 5350, 2016), la relación de adsorción de K, RAS, y el porcentaje de saturación de K, PSI, se obtuvieron del análisis de 15 kg de material de suelo natural. Las propiedades mineralógicas del suelo, se adquirieron según los resultados otorgados por el Instituto para la Investigación

Se enciende el equipo, generando un circuito en el sistema, y pasados cinco segundos, se toma el valor dado por el amperímetro y voltímetro. Luego, se quita el electrodo superior, para tomar la temperatura en el centro de la muestra con el termómetro digital y hacer la corrección por temperatura. Se retiró el molde en PVC con la muestra compactada y con corriente aplicada, se tomó la humedad de la parte superior, media e inferior después de someterse al impulso eléctrico.

y la Innovación en Ciencia y Tecnológica de Materiales de la UPTC, INCITEMA.

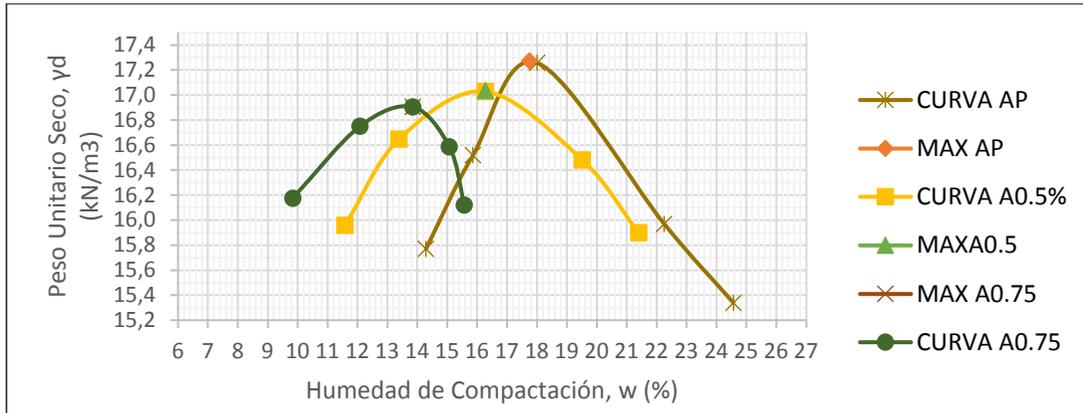
Resultados

Los parámetros producto de los hallazgos de los ensayos efectuados según la normativa ya indicada, se muestran en la Tabla 1.

El comportamiento de las curvas de compactación definidas en el ensayo de Proctor modificado (ASTM D 1557-12) para los tratamientos, se ilustra en la Figura 3. El comportamiento que se obtuvo en los resultados del ensayo de corte directo consolidado no drenado (CU), para suelos cohesivos (ASTM 6528-17), respecto al esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) y el esfuerzo normal efectivo (σ) se ilustra en la Figura 4, además, el comportamiento de la presión de poros inducida de corte máximo ($\Delta_{\mu s}$) y el esfuerzo normal efectivo (σ'_n) en la Figura 5. El comportamiento advertido a partir del esfuerzo a compresión aplicado (σ_c) y deformación axial (ϵ_1) en el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada (ASTM D2166-16), se expresa en la Figura 6.

Figura 3

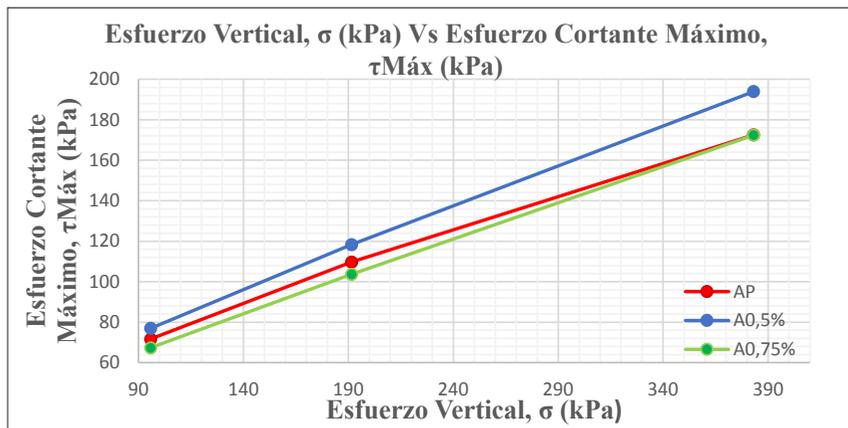
Curvas de compactación para los tres tratamientos



Nota. La figura muestra el comportamiento de las curvas de peso unitario seco (γ_d) y humedad de compactación, w. Los puntos máximos de cada curva indican el peso unitario seco máximo (γ_d) y humedad de compactación (w_{opt}).

Figura 4

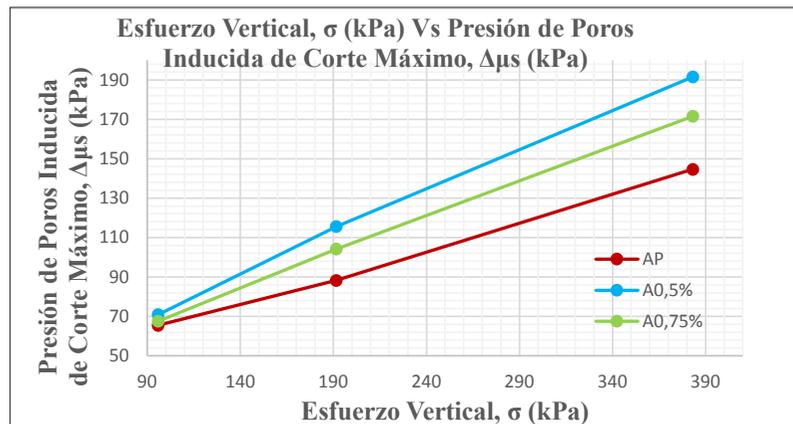
Comportamiento Esfuerzo Cortante Máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) vs. Normal Efectivo (σ'_n), para los tres tratamientos



Nota. La figura representa la diferencia en la resistencia al corte de las muestras, en donde se observa que la muestra A0,5% obtuvo mayores valores es esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$).

Figura 5

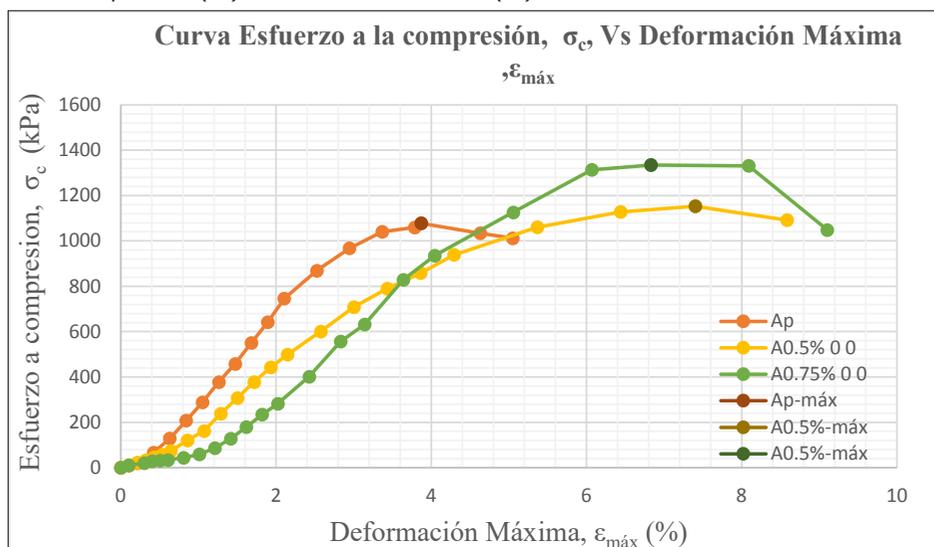
Presión de Poros Inducida de Corte Máximo (Δu_s) vs. Esfuerzo Normal Efectivo (σ'_n), para los tres tratamientos



Nota. La figura representa el incremento de presión de poros inducida de corte máximo (Δu_s), observando que la muestra A0,5% es aquella que tiene mayor resistencia al corte.

Figura 6

Curva Esfuerzo a Compresión (σ_c) vs. Deformación Axial (ϵ_1) de los tratamientos



Nota. Las curvas de esfuerzo a compresión (σ_c) y deformación axial (ϵ_1) representan el comportamiento de los tratamientos A_p , $A_{0.5\%}$ y $A_{0.75\%}$.

Tabla 1

Resultados experimentales de las muestras A_p , $A_{0.5\%}$ y $A_{0.75\%}$

Resultados de la resistencia y resistividad de los tratamientos AP, A0,5 % Y A0,75 %										
Ensayo	Parámetro/tratamiento	AP			A0,5%			A0,75%		
Compactación proctor modificado-ASTM D1557-12	Peso Unitario Seco Máximo, $\gamma_{máx}$, (kN/m ³)	17.27			17.04			16.91		
	Humedad óptima de Compactación, $w_{ópt}$ (%)	17.75			16.28			13.84		
Determinación de la resistencia al corte en condiciones consolidadas no drenadas- ASTM D6528 – 17	Esfuerzo Vertical, σ (kPa)	95.77	191.54	383.08	95.77	191.54	383.08	95.77	191.54	383.08
	Esfuerzo Cortante Máximo, $\tau_{máx}$ (kPa)	71.68	109.75	172.56	76.99	118.36	193.94	67.37	103.65	172.42
	Presión de Poros Inducida de Corte Máximo, Δ_{ps} (kPa)	65.46	88.29	144.60	70.92	115.57	191.53	67.56	104.16	171.52
	Cohesión, C (kPa)	40.53			39.89			33.95		
	Fricción, Φ (°)	18.82			21.90			19.97		
	Cohesión Efectiva, C' (kPa)	36.45			35.39			32.42		
	Fricción Efectiva, Φ' (°)	18.51			21.93			19.19		

	Humedad, w (%)		16.92	15.93
Compresión inconfiada ASTM D2166-00	Resistencia a la Compresión Inconfiada Máxima, q_u (kPa)	1078.19	1153.19	1335.08
	Resistencia Al Corte, C_u (kPa)	539.10	576.60	667.54
	Deformación Máxima, $\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	3.87	7.33	6.83
	Módulo Elástico No Confinado, E (kPa)	279.89	154.81	200.36
Determinación de la resistividad eléctrica usando los cuatro electrodos de WENNER- ASTM G57-12	Peso específico, γ (kN/m ³)	20.77	20.11	19.52
	Resistividad Eléctrica 15,5 °C, ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	36.89	59.61	115.09
	Temperatura T (°C)	22.00	23.00	24.00
	Humedad, w (%)	16.59	15.71	13.78

Nota. Resultados experimentales hallados en las pruebas de resistencia y resistividad eléctrica, para cada uno de los tratamientos.

Determinación de las Propiedades Químicas y Mineralógicas de la Arcilla

Se hallaron las propiedades químicas de la arcilla, obteniendo un potencial de hidrógeno (pH) de 4.25; capacidad de intercambio catiónico [CIC] de 19,823 cmol/Kg; conductividad eléctrica [CE] de 0,33 dS/m; acidez intercambiable [AI] de 4,7 cmol/Kg, P disponible, 54,82 cmol/kg, relación de absorción de sodio [RAS] de 0,61y un porcentaje de sodio intercambiable [PSI] igual a 0,25.

Los difractogramas obtenidos del método de difracción de rayos X (DRX) muestran los compuestos principales de la arcilla semi-inalterada, A_p , $A_{0.5\%}$, $A_{0.75\%}$, y arcilla con trazas azul rey intenso, determinando que los tratamientos están compuestos por cuarzo, SiO_2 ; caolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; anortoclasa, KAlSi_3O_8 y silicato de calcio, $\text{Ca}_2\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_9$. La muestra con trazas azules es clasificada como baricita, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, siendo este material, poco común, tanto en la muestra total de suelo utilizado para los ensayos, y en el suelo *in situ*.

Discusión de Resultados

Para observar si existe diferencia significativa de los parámetros obtenidos entre los tres

tratamientos, se usó el software para análisis estadísticos IBM SPSS Statistics versión 25, determinando la diferencia significativa y la variación porcentual de cada mezcla con fibra añadida, con respecto a la muestra patrón, A_p . Por último, se comparan los valores obtenidos en otras investigaciones con los resultados presentados en este documento.

Peso Unitario Seco Máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y Humedad Óptima de Compactación ($w_{\acute{o}pt}$)

Los valores promedio de peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y de humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$), se encuentran próximos a su media para las cuatro repeticiones necesarias. El parámetro de peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) decrece en 1.09 %, para los diferentes tratamientos, con una diferencia de alrededor de 0.40 kN/m³. De igual manera, el parámetro de humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) disminuye 12.4 % con respecto a la muestra sin tratamiento, teniendo una variabilidad porcentual baja para ambos parámetros.

Los valores obtenidos se mantienen lineales, concentrados y homogéneos para cada uno de los tratamientos. Los grupos de datos obtenidos son diferentes significativamente entre sí, para todos los casos, afectándose el peso uni-

tario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), ante la presencia de fibra en menor medida que la humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$). Se establece que el peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) determinados en cada una de las muestras de suelo en estado remoldeado, es superior al rango recomendado para una arcilla blanda a dura en estado natural (Budhu, 2000; Peck, 2016). Se evidencia una disminución en los parámetros de Peso Unitario Seco Máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y Humedad óptima de Compactación ($w_{\acute{o}pt}$), encontrando diferencia significativa al aumentar el porcentaje de fibra.

La diferencia que se presentó al determinar el parámetro peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) se debe al bajo porcentaje, orientación aleatoria de las fibras, y método de compactación; la variación de peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) al amasar la mezcla con algún tipo de fibra, no es igual de importante a la variación obtenida con diferentes energías de compactación. De aquí, que el bajo nivel de compactación usado, el porcentaje y orientación de las fibras, influyen en la baja variación porcentual, aunque, esto no indique diferencia significativa de este parámetro. La humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) obtenida para los tratamientos, tiene una sensibilidad mayor a la presencia de cáñamo, que el peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). Este comportamiento se debe directamente al volumen significativo ocupado de fibra en el cilindro, disminuyendo la cantidad de agua necesaria para remoldear la muestra.

En una arcilla de baja plasticidad tipo CL, mejorada con cemento Portland Tipo II, se hallan valores de peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), los cuales son similares a los valores encontrados para una arcilla sin tratamiento, mientras que las arcillas mejoradas con fibra de polietileno, con y sin cemento añadido, obtuvieron valores cercanos al encontrado en la arcilla $A_{0.5\%}$. Por último, se observó que la arcilla tratada con fibra de todas las longitudes de estudio, sin cemento añadido, alcanzan valores cercanos a 16.90 kN/m^3 . La humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) obtenida es superior a la de una arcilla de baja plasticidad; no obstante, se lograron valores similares de humedad óptima de $A_{0.5\%}$, en muestras con adición al 5 % de fibra de polietileno, de longitud de 25mm. Sin embargo, el valor de la humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) para la muestra $A_{0.75\%}$,

es significativamente inferior a la encontrada en aquellas con porcentajes de fibra de 1 % y longitudes de 25 mm.

Lo anterior se debe a la densidad de la fibra de cáñamo y de la fibra sintética. Así, a mayor adición de fibra de cáñamo, disminuye el peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$), de manera similar a aquella fibra mejorada con un tratamiento químico y una fibra sintética (Estabragh *et al.*, 2017, p. 22). Valores obtenidos para una mezcla de condiciones similares, muestran disminución del peso unitario seco máximo. Para muestras patrón este parámetro es menor que el hallado, aplicando el método de compactación estándar y modificado, igualmente, se encuentran valores inferiores para la arcilla tratada con diferentes proporciones de fibra de cáñamo de 4 cm de longitud. La humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$) de la arcilla A_p , es inferior en 2 % a la humedad óptima de compactación de una arcilla de Kfar Silwan, Líbano, dado que, entre más energía de compactación, mayor será la densidad de la muestra, alcanzando valores similares al peso unitario de la muestra sin alterar (Abou Diab *et al.*, 2018, p. 11).

El peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) determinado para una caolinita tratada con cal y diferentes porcentajes de fibra de basalto y de polipropileno, decrece de 12.74 kN/m^3 a 12.06 kN/m^3 , para una arcilla sin tratar, y el segundo, a altos porcentajes de cal. Se presenta mayor concentración de fibra de polipropileno, así, el peso unitario seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) encontrado en este estudio, superó a los valores de la caolinita con doble tratamiento. Por el contrario, la humedad óptima de compactación ($w_{\acute{o}pt}$), de la arcilla varía de 30 % a 38 %, correspondientes a una arcilla sin tratar y una arcilla con 9 % de cal, y 25 % de fibra de basalto y polipropileno, independientemente (Boz *et al.*, 2018, p. 122).

Resistencia al Corte en Condiciones no Drenadas

Los valores obtenidos del ensayo a la resistencia al corte no drenados, se encuentran próximos a su media para las cuatro repeticiones. La cohesión y fricción en diferentes condiciones mostraron una variabilidad porcentual baja con respecto al valor de la arcilla patrón, A_p ; el esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) varía entre

6.7 % y 6.9 % para tres cargas verticales (σ_n) de 95.8 kPa, 191.5 kPa y 397.2 kPa, respectivamente. Los valores obtenidos demuestran que la muestra $A_{0.5\%}$ tuvo el mayor esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) para las tres diferentes cargas verticales; la muestra $A_{0.50\%}$ supera a la muestra A_p y a $A_{0.75\%}$, en 21.5 kPa, ya que estas últimas tienen un esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) similar.

La cohesión (c) es similar en la muestra A_p y $A_{0.5\%}$ y disminuye en la muestra $A_{0.75\%}$, variando 10 %. La cohesión (c) es altamente sensible a partir de una adición de 0.5 % de fibra, y la cohesión efectiva (c') se comporta de la misma manera que la cohesión (c) siendo mayor en A_p y $A_{0.5\%}$, variando 6 % aproximadamente, para la muestra $A_{0.75\%}$ con respecto a la muestra patrón, existió una variación de 8 y 9 % de la fricción (Φ) y fricción efectiva (Φ'), respectivamente, siendo mayor en la muestra $A_{0.5\%}$, teniendo una fuerte relación con su alta resistencia al corte.

Se observa que los parámetros de cohesión (c) y cohesión efectiva (c') hallados para los tratamientos, tienen un comportamiento lineal, mientras que los datos se mantienen concentrados y homogéneos para los tratamientos, existiendo diferencia significativa de estos parámetros, entre tratamientos. Los datos y sus posibles cambios observados se mantienen dentro de los rangos recomendados para arcillas de baja plasticidad (Budhu, 2000).

El parámetro de fricción (Φ) depende principalmente de la posición de los componentes de la muestra, así, la aleatoriedad de la distribución y orientación de fibras influye en éste; sin embargo, los datos obtenidos no exceden los valores recomendados por Converse (1952), Prinz y Strauss (2006), y Ammar *et al.* (2019). En el caso del ángulo de fricción (Φ) y fricción efectiva (Φ'), no se encontraron diferencias significativas en los 3 tratamientos.

Chegenizadeh y Nikraz (2011) determinaron que, para los parámetros de resistencia al corte, en una arcilla mejorada con fibra plástica de diferentes longitudes y proporciones, el esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) para una muestra conformada a diferentes proporciones, pero con una longitud de fibra de 2 cm, es mayor para la proporción de 2 %. Por otro lado, este

parámetro es menor para las mayores longitudes de 6.5 cm y 4 cm, a una proporción de 0.7 %. Así, se observa que los valores hallados por los investigadores se asemejan a los encontrados, con una longitud de 4 cm y 6.5 cm.

Abou Diab *et al.* (2018) determinaron que la cohesión (c) y fricción (Φ) de una arcilla mejorada con cáñamo, en condiciones no drenadas, depende del método de compactación aplicado en el ensayo de Proctor modificado, cuando se desea conformar la muestra. Para muestras de control, se obtuvieron rangos de cohesión (c) de 40 kPa a 50 kPa y ángulos de fricción (Φ) de 24.2° a 26.3°, para muestras compactadas por amasado e impacto. Para muestras reforzadas con fibra de cáñamo con longitudes de 2 cm y 4 cm, y porcentajes de adición de 0.5 % a 1.5 %, se obtuvieron rangos de cohesión (c) de 68 kPa a 110 kPa y ángulos de fricción (Φ) de 25.6° a 24°. En comparación al presente estudio, los datos de cohesión y fricción son superiores debido al método de compactación y al elevado porcentaje de fibra.

Widianti y Diana (2020) determinaron que la cohesión (c) para una arcilla mejorada con fibra de bonote no varía para una adición del 0.25 % y 0.5 % en comparación con la arcilla patrón, aunque la cohesión aumenta. Por otro lado, el ángulo de fricción (Φ) hallado para una arcilla mejorada con bonote es inferior a la encontrada en este estudio para $A_{0.5\%}$, sin embargo, este parámetro en ambas investigaciones presenta el mismo comportamiento, siendo directamente proporcional al aumento de la fibra, encontrando un mayor valor para una arcilla mejorada con 1 % de fibra de bonote. Este comportamiento se debe a la carga vertical aplicada y la relación de palancas de los equipos de corte directo empleados en las investigaciones, además de la variación de presión intersticial, la diferencia de resistencia a la tensión de cada fibra y la longitud de fibra elegida, ya que estos factores influyen en las fuerzas intrínsecas de la muestra.

La muestra $A_{0.5\%}$ mostró la mayor resistencia al corte, esta muestra presentó el mayor valor de cohesión efectiva (c'), ya que las fibras aumentan el ángulo de fricción y con esta distribución, la matriz conformada no es destruida. La muestra $A_{0.75\%}$ no pierde su estructura, y se comporta de manera similar a la muestra A_p ,

en términos de resistencia al corte; no obstante, esta muestra también muestra valores de cohesión y fricción menores que el resto, dado que, a partir de esta adición, la matriz arcillosa pierde cohesión. Adicional a ello, las condiciones de drenaje y el consecuente aumento de presiones intersticiales influyen en este valor. La muestra $A_{0.5\%}$ resultó ser aquella mezcla idónea para obtener los mejores resultados en los parámetros de interés; la muestra $A_{0.5\%}$ obtuvo mayor resistencia al corte y la presión de poros inducida se mantuvo similar al esfuerzo cortante máximo; así, las condiciones de saturación y confinamiento varían ante la inclusión de fibras. La cohesión (c) y cohesión efectiva (c'), son altamente sensibles cuando se adiciona un porcentaje superior a 0.75 % del peso seco, es decir, los valores disminuyen cuando se aumenta el porcentaje de fibra de tal manera que el suelo fino, con condiciones de plasticidad establecidas deja de comportarse como tal. La cohesión efectiva (c') es menor que la cohesión (c). Se encontró que la fricción (Φ) y fricción efectiva (Φ') es mayor para la muestra $A_{0.5\%}$.

Resistencia a la Compresión Inconfinada (q_u) Resistencia al Corte (C_u) Deformación Máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) y Módulo Elástico No Confinado (E)

La humedad hallada se mantuvo próxima a su media, presentando una variabilidad muy baja. la humedad resultante varió debido al cambio de dimensión de la probeta y al número de capas en las que se conformaron las muestras.

La resistencia a la compresión máxima (q_u) y la resistencia al corte (C_u) son parámetros lineales, concentrados y homogéneos, presentando una variabilidad baja, con una distribución no normal, para los tratamientos, siendo la muestra $A_{0.75\%}$ la que obtuvo mayor resistencia a la compresión inconfinada, incrementando 256.89 kPa con respecto a A_p , y en 181.89 kPa a la muestra $A_{0.5\%}$. Igualmente, se observó que la diferencia significativa entre los tratamientos se debe al porcentaje de fibra presente, y el nivel de compactación de la muestra. De acuerdo con los valores de resistencia a la compresión inconfinada obtenidos, corresponden a un suelo de consistencia muy firme, con (q_u) mayor a 0.38 MPa (Hunt, 2005; Das, 2011; Peck, 2016).

La deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) varía moderadamente, presentando mayores valores para la muestra $A_{0.5\%}$, la cual supera a la muestra A_p en 3.43 %, deformándose aproximadamente el doble de la muestra patrón antes de llegar a la falla. La muestra $A_{0.75\%}$ supera a la muestra A_p en 2.96 %, sin embargo, al momento de la falla, la muestra perdió su estructura, aun presentando mayores valores de resistencia a la compresión simple (q_u) y resistencia al corte (C_u). Los valores obtenidos son lineales, concentrados y homogéneos, en cada una de las repeticiones, con diferencia significativa entre los resultados. Se observa que no hay una distribución normal entre tratamientos, debido a la orientación de fibra entre un rango que no compromete la condición de la matriz. El nivel de compactación, las dimensiones de la probeta y la humedad alteran el valor de deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), pero el porcentaje, orientación y la longitud de las fibras son los factores principales que interfieren en este parámetro.

El grado de rigidez del material es representado por el módulo elástico no confinado (E), en donde, los datos encontrados por el análisis experimental efectuado fueron homogéneos, centrados, con una distribución no normal y variabilidad moderada, siendo esta variable altamente sensible a la adición de fibras. La muestra A_p obtuvo mayor módulo, superando a la muestra $A_{0.75\%}$ en mayor medida, existiendo diferencia significativa entre los tratamientos. La condición de confinamiento del tipo de ensayo aplicado, la energía de compactación y la acumulación de fibras, factores que provocan planos de falla, cuya presencia disminuye la rigidez del material.

Mitchell y Houston (1970), Hunt (2005), Das (2011) y Peck (2016), clasifican los parámetros de resistencia a la compresión inconfinada de los tres tratamientos como "un suelo de consistencia muy firme y difícil de penetrar". Por otro lado, Olgun (2013) logra valores de resistencia a la compresión inconfinada de varias muestras de suelo arcilloso mejorado con fibras de polipropileno con diferentes longitudes, usando cemento y cenizas volantes como material cementante. Aunque los valores son superiores a los obtenidos dada la adición de material cementante, los resultados de los ensayos preliminares son similares a A_p , $A_{0.5\%}$ y $A_{0.75\%}$,

para muestras con 4 % y 8 % de cemento y 10 % y 20 % de cenizas volantes, respectivamente, mientras que las muestras mejoradas con fibra de polipropileno y curadas a los 7 y 28 días, tienen valores superiores a los logrados, teniendo en cuenta las propiedades de la fibra y el material cementante. En ambos estudios, se encontró que los componentes añadidos incrementan las fuerzas interláminares de las partículas de suelo, y como resultado, las fuerzas de cohesión, fricción aumentan (Cai *et al.*, 2006). El tipo de conformación y compactación de la muestra tiene efecto en el resultado de resistencia al corte no drenada, c_u , tal como lo definieron Abou Diab *et al.* (2018), observando que este parámetro incrementa de 150 kPa en el espécimen de control, hasta 195 kPa a 275 mPa para especímenes preparados por métodos de amasado e impacto correspondientemente.

Boz *et al.* (2018) obtuvieron valores de resistencia a la compresión inconfiada (q_u) para arcilla estabilizada con tres diferentes porcentajes de cal, hallando que, para muestras de suelo estabilizadas con diferentes proporciones de fibra y con 9 % de cal, se tiene que la muestra de suelo con 0.5 % de contenido de fibra de 1.9 cm de longitud tiene un valor de compresión inconfiada (q_u) cercano a 1200 kPa, siendo este valor inferior al obtenido para la muestra $A_{0.75\%}$, superando a una muestra con fibra y cal añadida.

Según Whitlow (1994), los especímenes que fueron sometidos a una carga axial se deformaron, presentando una falla tipo plástica, con una superficie de falla vertical definida para las muestras A_p y $A_{0.5\%}$, las cuales se abultaron en la parte superior. La muestra $A_{0.75\%}$ se abultó en la parte inferior de las muestras, en donde se concentraban mayor cantidad de fibra. Aunque la muestra $A_{0.75\%}$ fue la más competente, la deformación presentó zonas de acumulación de fibra en la matriz, debido a la ocurrencia de superficies de falla, producto de una proporción de fibra inadecuada. Se encontró que el tratamiento $A_{0.75\%}$ es aquel que tiene valores de esfuerzo cortante máximo, $\tau_{máx}$; sin embargo, la muestra $A_{0.5\%}$ se deforma un poco más al alcanzar su resistencia a la compresión máxima, aumentando la ductilidad de la arcilla, mientras que la fábrica de la muestra $A_{0.75\%}$ queda arruinada después del ensayo.

De lo anterior, se establece que la muestra de suelo $A_{0.5\%}$, aunque no soporte cargas a compresión de la misma manera que $A_{0.75\%}$, no se deforma y falla en las zonas en donde se acumula la fibra, así, la muestra de suelo $A_{0.5\%}$ es la más favorable. El comportamiento de la fibra en los suelos es problemático a medida que se aumenta la fibra, ya que al aumentar la proporción en la matriz arcillosa, las partículas de suelo no pueden adherirse, dado que la fibra no puede aplicarse de una manera homogénea; por el contrario, la fibra tiende a aglutinarse en las zonas arcillosas que primero se hidrataron (Abou Diab *et al.*, 2016).

Temperatura (T°) y Resistividad Eléctrica ($\rho_{15.5^\circ C}$)

La temperatura obtenida aumenta un grado para cada tratamiento, obteniendo una variabilidad baja, aunque, en suelos, la variación de un grado indica cualidades del material. Los datos de la variable temperatura (T°) se muestran agrupados, homogéneos, próximos a su media y normalmente distribuidos, siendo la temperatura (T°) de $A_{0.75\%}$ la más elevada, así, esta variable muestra diferencias significativas entre las medias. La variable temperatura (T°) es una variable altamente sensible a la adición de fibras, ya que la temperatura depende de la estructura cristalina y de la humedad de la muestra.

La resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^\circ C}$) presenta una variabilidad alta en sus medias, así, la variabilidad de la resistividad eléctrica de las muestras de arcilla reforzadas con fibra de cáñamo es alta. Este valor aumenta a medida que crece la cantidad de fibra; la muestra $A_{0.75\%}$ supera a la muestra A_p en 78.20 Ohm*m, y la muestra $A_{0.5\%}$ supera a la muestra patrón en 22.72 Ohm*m, hallándose diferencia significativa entre las medias de los tratamientos. Se observa que la resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^\circ C}$) de la muestra $A_{0.75\%}$ fue altamente sensible a causa de la ubicación y dirección de la fibra en la muestra, además de la humedad de compactación de la muestra. Los valores de resistividad eléctrica son bajos, debido a la energía de compactación, saturación, y la conductividad hidráulica de los minerales de arcilla. Sin embargo, se observó que la resistividad eléctrica y la temperatura aumentan ante la inclusión de fibras. El cambio de método de compactación alteró el valor de

humedad óptima deseada para el ensayo de corte directo y compresión inconfina, a causa del cambio de dimensiones del molde y el número de capas a compactar, entre Proctor estándar y modificado.

Estudios han hallado que el aumento de fibra aumenta la resistividad volumétrica de las muestras. Por lo anterior, se observa un incremento elevado en la resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^{\circ}\text{C}}$) para la muestra con más contenido de fibra, $A_{0.75\%}$, triplicando el valor de resistencia del tratamiento A_p (Naik y Mishra, 2005).

Se ha encontrado que la resistividad eléctrica es anisotrópica, es decir, la resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^{\circ}\text{C}}$) variará según la geometría y posición de la muestra y de los electrodos, aun así, los datos encontrados se encuentran en el rango para arcillas de baja plasticidad (Abu-Hassanein *et al.*, 1996). Los valores de resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^{\circ}\text{C}}$) son bajos, debido a la energía de compactación, saturación, y la conductividad hidráulica del suelo ensayado. Sin embargo, se observó que la resistividad eléctrica será menor mientras el contenido de finos disminuye. Este comportamiento se debe a la estructura cristalina de la arcilla, su capacidad de retención de agua en las láminas de sílice y su superficie específica. Sin embargo, también se determinó que la resistividad eléctrica es sensible al grado de compactación que tenga el suelo: entre más denso sea el suelo, menor será la resistividad eléctrica.

Los resultados medidos con el equipo de los cuatro electrodos de Wenner, para arcillas muestran valores de resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^{\circ}\text{C}}$) inferiores a 150 Ohm*m, clasificando el horizonte como argialbol. Esta clasificación correspondería a suelos arcillosos y limoarcillosos, haciendo la equivalencia con la clasificación usada, la cual corresponde a una clasificación con fines agronómicos y de siembra (Pozdnyakova, 1999; Wenner, 1915).

Fukue *et al.* (1999) determinaron que el valor de resistividad eléctrica ($\rho_{15.5^{\circ}\text{C}}$) para arcillas sin perturbar es igual a 35 Ohm*m, mientras que para arcillas remoldeadas, este valor disminuye a 13 Ohm*m aproximadamente. Según estos valores, se encontró que el cambio de resistividad se debe a la alteración de la microestruc-

tura de la arcilla; para arcillas sin perturbar, los valores de resistividad son mayores que los valores de resistividad encontrados en suelos remoldeados. Por esta razón, los valores obtenidos en la presente investigación son bajos en comparación con la resistividad encontrada para suelos sin alterar. Se encontró que, en diez tipos de suelos compactados tipo CL, la resistividad varió de 18 Ohm*m a 70 Ohm*m. Según este rango, se concluye que la resistividad es anisotrópica, es decir, la resistividad eléctrica variará según la geometría y posición de la muestra y de los electrodos (Abu-Hassanein *et al.*, 1996).

Propiedades Químicas de la Arcilla

Según las consideraciones generales para interpretar el análisis químico de suelos dadas por el IGAC, se encontró que el pH de 4.25 es extremadamente ácido; sin embargo, el rango de capacidad de intercambio catiónico [CIC] varía entre 3 y 15 cmol/Kg para la caolinita, así, el valor obtenido es mayor, debido a la presencia de compuestos diferentes como las partículas de sílice, entre otros (Peck, 2016). El estudio químico y mineralógico corrobora la clasificación física realizada. Los estudios demuestran que se trata de una arcilla de baja plasticidad tipo caolinita, con proporciones de fracción cuarzosa y trazas de baricita en baja proporción, siendo este último compuesto, un hallazgo extraño en la matriz arcillosa.

La resistividad eléctrica se ve fuertemente afectada por la capacidad de intercambio catiónico, la cual cambia ante la presencia de agua, haciendo que los cationes y aniones intercambiables libres floten alrededor de la partícula de arcilla, permitiendo una mejor conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica [CE] de 0.33 dS/m, se encuentra en el rango de 0 a 2 dS/m, así, este valor es bajo. La relación de absorción de sodio [RAS] de 0.61 % y porcentaje de sodio intercambiable [PSI] de 0.25 % son bajos. Estos dos valores, al confrontarlos con la tabla de clasificación de suelos salinos, clasifican los suelos como clase N, que corresponde a suelos normales no salinos y no sódicos (Richards, 1954). Los niveles de bases intercambiables son muy bajos.

El F y Al disponibles se aprecian como altos, siendo éstos los minerales comunes en los

minerales de arcilla tipo caolinita. Complementario a lo anterior, se define que los suelos del macizo colombiano presentan valores de pH que oscilan entre 5 y 5.5, además, son suelos ricos en fosfatos y en aluminio activo, como consecuencia de la naturaleza alóftana de la arcilla, y la naturaleza volcánica de la fracción arenosa (Instituto de Hidrología, 1999).

Caracterización mineralógica del material

La mineralogía obtenida en el ensayo de difracción de rayos X (DRX) describen altos porcentajes de cuarzo y caolinita para todas las muestras. El porcentaje del compuesto de caolinita es mayor para la arcilla virgen sin compactar, que para la $A_{0.75}$ %, dando espacio al compuesto del cuarzo para sustituir este porcentaje. La arcilla azul encontrada contiene cuarzo y baricita, compuesto conformado de magnesio y fósforo, aunque este compuesto se encuentra en la matriz de suelo en baja cantidad.

Conclusiones

La fibra de cáñamo mejora las condiciones de las muestras $A_{0.5}$ % y $A_{0.75}$ % en comparación con la muestra de control, A_p . Se evidenció que los parámetros de resistencia y resistividad de las muestras aumentaron para cada incremento de fibra; por un lado, la presencia de fibra disminuye el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación, mientras que los valores de resistencia al corte en condiciones consolidadas no drenadas y en condiciones confinadas aumentaron. Asimismo, la resistividad eléctrica, y la temperatura de las muestras también aumentaron, debido a la presencia de la fibra natural. La fibra de cáñamo ofrece una solución sustentable a problemas relacionados con resistencia, incluyendo a aquellos suelos que han sufrido alguna afectación o alteración en su capacidad portante.

El porcentaje de cáñamo óptimo para mejorar las condiciones de resistencia de la arcilla es de 0.5 %, usando fibras de 4 cm de longitud, ya que porcentajes altos de fibra destruyen la matriz arcillosa sin permitir la adherencia entre partículas proporciones (Abou Diab *et al.*, 2018). La muestra $A_{0.5}$ resultó ser la más

competente en el momento de mejorar las propiedades mecánicas de una arcilla de baja plasticidad, tipo caolinita, en esta se tuvo un mayor esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$). Por otro lado, este ensayo evidenció que la muestra de suelo $A_{0.5}$ % alcanzó mayor deformación $\epsilon_{m\acute{a}x}$ antes de alcanzar la falla, lo cual significa que esta mezcla tomará más tiempo en llegar a un estado límite de falla.

El tipo de fibra, diámetro, longitud, y la manera en la cual fue tratada, son propiedades que limitan el proceso de mezclado al momento de realizar las pruebas, puesto que la fibra trata de aglutinarse y acomodarse en ciertos sitios de las probetas, induciendo planos de falla, por tal motivo, es recomendable utilizar un tipo de fibra que no haya sido tratada con agentes químicos, que en este caso, fueron aplicados por la fábrica proveedora, sino que, se debe usar una fibra extraída de manera rústica, tal como lo es el enriado. Si se usa otro tipo de fibra, se recomienda el enriado como método de extracción, siempre y cuando se controle el proceso de limpieza y cepillado de la fibra.

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia al corte en condiciones consolidadas drenadas, CD, y en condiciones consolidadas no drenadas, CU, con el fin de obtener la resistencia residual del suelo.

Las observaciones anteriormente halladas aplican específicamente para un suelo con las condiciones físicas, mecánicas y químicas anteriormente mencionadas. Cada tipo de suelo requiere una dosificación diferente, según parámetros ingenieriles encontrados en campo y en laboratorio.

Referencias

- Abou Diab, A., Sadek, S., Najjar, S., y Abou Daya, M. (2016). Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(3), 1-8. <https://doi.org/10.1080/19386362.2015.1132122>.
- Abou Diab, A., Najjar, S., Sadek, S., Taha, H., Jaffal, H., y Alahmad, M. (2018). Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. *Soils and Foundations*, 58(2), 462-480. <https://doi.org/10.1080/19386362.2015.1132122>

- Abu- Hassanein, Z. S., Benson, C. H., y Blotz, L. R. (1996). Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:5(397))
- Álvarez Vega, E. (2018). Efecto de la humedad y el peso específico seco en la resistividad eléctrica de los suelos. *I Congreso Iberoamericano y XXXI Internacional en Administración de Empresas Agropecuarias*. Tunja.
- Ammar, A., Najjar, S., y Sadek, S. (2019). Mechanics of the Interface Interaction between Hemp Fibers and Compacted Clay. *International Journal of Geomechanics*, 19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001368](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001368)
- Attom, M., Al-Arkhras, N., y Malkawi, A. (2009). Effect of Fibres on the Mechanical Properties of Clayey Soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 162(5), 277-282.
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hizal, G., y Dolmaci, Ö. (2018). Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arab J Geosci*, 122(11). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458>
- Budhu, M. (2000). *Soil mechanics and foundations*. Wiley.
- Cai, Y., Shi, B., W.W. Ng, C., y Tang, C. (2006). Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, 87, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007>
- Chegenizadeh, A., y Nikraz, H. (2011). Shear Test on Reinforced Clay. *Advanced Materials Research*, 250-253, 3223-3227. www.scientific.net/AMR.250-253.3223
- Converse, F. (1952). The Use of the Direct Shear Testing Machine in Foundation Engineering Practice. *Symposium on Direct Shear Testing of Soils, ASTM*, 131, págs. 75-80.
- Das, B. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning. Inc.
- Eichhorn, S., Baillie, C., Zafeiropoulos, N., Mwakambo, L., Ansell, M., Dufresne, A., . . . Wild, P. (2001). Review: Current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science*, 36, 2107-2131.
- Estabragh, A., Ranjbari, S., y Javadi, A. (2017). Properties of Clay Soil and Soil Cement Reinforced with Polypropylene Fibers. *Materials*,(114), 195-205.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., y Taya, N. (1999). The Microstructure of Clay Given by Resistivity Measurements. *Engineering Geology*, 54(1-2), 43-53.
- Hunt, R. (2005). *Geotechnical Engineering Investigation Handbook (2nd ed.)*. Taylor and Francis Group.
- Instituto de Hidrología, (1999). *El Macizo Colombiano y su área de Influencia Inmediata: diagnóstico, descripción de la unidad regional y propuesta de delimitación*. IDEAM.
- Lu, N., Swan Jr, R. H., y Ferguson, I. (2012). Composition, structure, and mechanical properties of hemp fiber reinforced composite with recycled high-density polyethylene matrix. *Journal of Composite Materials*, 46(16), 1915-1924.
- Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., y Lanos, C. (2017). Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Construction and Building Materials*, 155, 1126-1137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121>
- Millogo, Y. M., Aubert, J., y Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 71-78.
- Mitchell, J., y Huston, W. (1970). Causes of clay sensitivity. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 95(3), 845-871.
- Naik, J., y Mishra, S. (2005). Studies on Electrical Properties of Natural Fiber: HDPE Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 44(4), 687-693. <https://doi.org/10.1081/PTE-200057818>
- Najjar, S., Sadek, S., y Taha, H. (2014). Use of Hemp Fibers in Sustainable Compacted Clay Systems. *Geotechnical Special Publication*, 1415-1424. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.138>
- Olgun, M. (2013). Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. *Geosynthetics International*, 20, 263-275. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00016>
- Peck, R. (2016). *Ingeniería de Cementaciones*. Limusa.
- Pozdnyakova, L. (1999). *Electrical Properties of Soils*. Laramie, Wyoming, United States of America: Department of Renewable Resources.
- Prinz, H., y Strauss, R. (2006). *Abriss der Ingenieurgeologie*. München : Elsevier Spektrum akademischer Verlag.

Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. United States Salinity Laboratory Staff.

Wenner, F. (1915). A Method Using Earth Resistivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 5(16), 561-563.

Whitlow, R. (1995). *Basic Soil Mechanics, Third Edition*. Essex: Longman Scientific and Technical.

Widianti, A., y Diana, W. H. (2020). Direct Shear Strength of Clay Reinforced with Coir. *UKaRsT*, 4(2), 151-162.