






Estimación de La Resistencia a La Tracción en Suelos Reforzados con Fibras Sintéticas

Estimation of Tensile Strength in Soils Reinforced with Synthetic Fibers

Johannes Enrique Briceño Balza |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela
Rebeca Carolina Barreto Aldana |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela
Yusleiny Lorena Guerrero Dávila |  Universidad de los Andes - ULA, Mérida - Venezuela

Recibido: 4/9/2024
Recibido tras revisión: 9/10/2024
Aceptado: 18/10/2024
Publicado: 03/01/2025

PALABRAS CLAVE

Tracción indirecta, resistencia a la tracción, suelos reforzados, fibras sintéticas.

KEY WORDS

Indirect traction, tensile strength, reinforced soil, synthetic fibers.

RESUMEN

Un parámetro importante a considerar a la hora de diseñar obras civiles es la resistencia a la tracción del suelo. Este parámetro es despreciado en muchas ocasiones por tener un valor menor que la resistencia a la compresión inducida por esfuerzos cortantes, parámetro que condiciona el diseño. Existen casos particulares donde la resistencia a la tracción es importante por mostrar los primeros indicios de rotura del suelo y servir de alerta antes de producirse la rotura por cortante. Conociendo esto se plantea, para mejorar la resistencia a la tracción, reforzar el suelo con fibras sintéticas, micro y macrofibras, incorporándolas en porcentajes en peso de suelo (0.50, 1.00, 1.50 y 2.00%), evaluando a través del ensayo de tracción indirecta el comportamiento del suelo areno limoso natural y reforzado. Al comparar los resultados en estas dos condiciones, se concluyó que la resistencia a la tracción aumenta cuando el porcentaje de macrofibra es superior al 1.50% en un 3.69%, mientras que al 2.00% aumenta en un 24.00% con respecto al suelo patrón.

ABSTRACT

An important parameter to consider when designing civil works is the tensile strength of the soil. This parameter is often neglected because it has a lower value than the compressive strength induced by shear stresses, a parameter that determines the design. There are particular cases where tensile strength is important because it shows the first signs of soil failure and serves as a warning before shear failure occurs. Knowing this, to improve tensile resistance, it is proposed to reinforce the floor with synthetic fibers, micro and macrofibers, incorporating them in percentages by weight of soil (0.50, 1.00, 1.50 and 2.00%), evaluating the behavior through the indirect traction test of the natural and reinforced silty sandy soil. When comparing the results in these two conditions, it was concluded that the tensile strength increases when the percentage of macrofiber is greater than 1.50% by 3.69%, while at 2.00% it increases by 24.00% with respect to the soil pattern.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se produce la falla de una obra civil o deslizamiento de un talud, ya sea natural o construido, esto afectará negativamente a la sociedad, ya que pueden colapsar viviendas, carreteras, entre otras. Estos deslizamientos se caracterizan típicamente por una inestabilidad repentina y pueden causar muchas víctimas y pérdidas considerables debido a su gran velocidad y larga distancia de afectación [1].

Cuando se evalúan las propiedades mecánicas de un suelo, los parámetros fundamentales para ello son la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ), estos representan la resistencia al cortante, evaluada a compresión en un ensayo triaxial (ASTM D2850-82). Estos parámetros son usados para el diseño de toda obra civil, considerando que las fallas asociadas al material suelo se producen solo o principalmente por corte inducido por compresión. Teorías contemporáneas [2], abordan análisis de

estabilidad, teorías de empuje y aparición de grietas de tracción en la masa de suelo; donde ya se comienza a considerar la necesidad de tomar en cuenta la resistencia a la tracción (σ_t).

Asimismo, autores consideran que hay casos particulares donde es necesario conocer la σ_t [3]. Entre estos casos se tiene el análisis de estabilidad de taludes con presencia de grietas de tracción, aparición de este mismo tipo de grietas en terraplenes de carreteras, en masas de suelo contenidas por muros y grietas reflejadas en capas asfálticas; ocasionando molestias, deterioro e inseguridad. Estas grietas pueden llenarse de agua aumentando el empuje hidrostático, desestabilizando la estructura. Pueden ser el resultado de una variedad de fenómenos, como la baja σ_v , los ciclos de humedecimiento y secado, la desecación o la intemperie [4].

Casi todos los métodos existentes de análisis y diseño no toman en cuenta las grietas de tracción o las tratan de una manera simplista, estas aumentarán significativamente el empuje de la masa de tierra [5]. Los resultados indican que la formación de grietas por tensión aumentará significativamente el empuje activo, mientras que si se considera una σ_t distinta de cero disminuirá la profundidad de las grietas de tracción [5]. Se deben modificar los métodos existentes para el análisis de estabilidad de taludes, ya que quedó demostrado que la condición más desfavorable para la estabilidad es cuando se consideran las grietas de tracción [6].

Ahora bien, debido a que la σ_t en suelos es baja, comparada con la resistencia a la compresión (σ_c), en la mayoría de los casos al desarrollar métodos y estudios geotécnicos esta se desprecia [7], olvidando que esta es fuente importante para definir el mejor comportamiento del material [8].

Por otro lado, determinar la resistencia a la tracción de manera directa es difícil; en tal sentido, se vienen utilizando equipos de aplicación de carga a tracción directa mediante succión, pero que no tienen la difusión necesaria ni en la mayoría de los laboratorios se cuenta con los equipos necesarios. Por tal razón, se puede determinar esta resistencia con un ensayo indirecto, donde los esfuerzos de tracción son aplicados indirectamente, tal es el caso de la investigación donde se determinó la resistencia a la tracción de forma indirecta, mediante un equipo de compresión confinada [9].

Utilizando el ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño (ASTM C-496, UNE 83.306 e ISO 4108) para hallar la σ_t en suelos, se pudo comprobar que la σ_t es de un valor bajo con respecto a la σ_c , se encuentra en una banda entre el 17 y 19% de σ_c [7], valor significativo en casos donde las primeras alertas de falla se presentan por tracción, ya que la falla por tracción antecede a la falla por corte. Por tanto, contar con información sobre la σ_t es un factor importante para el diseño.

El suelo por sí solo no aporta mucha σ_t por lo que se ha planteado reforzarlo para mejorar y aumentar este parámetro. Una alternativa para ello es incorporar fibras al suelo que aporten σ_t . En tal sentido, utilizar fibras fabricadas de materiales provenientes de los polímeros se ha convertido en una alternativa como agente modificador o de refuerzo [10].

Las fibras de polipropileno se plantearon como material de refuerzo para evitar la aparición de grietas producidas por tracción en varios tipos de suelo humedecido con diferentes contenidos de humedad, se demostró que este refuerzo mejora la σ_t y deformación [11]. Incluso las fibras naturales, como las de coco, mejoran el comportamiento mecánico del suelo, usando porcentajes entre el 12.50-50.00% evaluaron ensayos de corte (ASTM D3080) directo obteniendo mejoras [12].

De igual forma, agregando fibras de PET (polietileno tereftalato) reciclado, en porcentajes de 0.20-1.50% del peso del suelo, se obtuvo un aumento en la compresión simple (ASTM D2166-06) al compararlo con el suelo natural sin reforzar [13]. Utilizando fibras de polipropileno como material de refuerzo distribuido de forma aleatoria en diferentes porcentajes y contenidos de humedad del suelo, se pudo demostrar que mejora la resistencia a la tracción, viéndose afectada la resistencia con el aumento del contenido de humedad [14].

Con el propósito de mejorar la resistencia al corte de suelos arenosos se utilizaron como refuerzo fibras sintéticas y se sometió la muestra a un ensayo triaxial (ASTM D2850-82) comprobando la mejora en la resistencia [15]. Estos mismos autores [16], [17] ampliando la línea de investigación, determinaron las mejoras en cuanto a densidad y resistencia a la tracción tanto en suelos cohesivos como granulares.

Igualmente, reforzando un suelo arcilloso plástico con fibras de polipropileno recicladas y añadiendo cal, ya que sin ella no mejoraba la resistencia a la tracción, se pudo mejorar este parámetro de resistencia entre un 13.00 y 28.00% [18]. Asimismo, reforzando un suelo con fibra de vidrio para la fabricación de adobes, los sometieron a ensayos de compresión, aumentando su capacidad y resistencia [19].

Por otra parte, investigaciones existentes sobre el uso de las fibras de polipropileno con suelo, están dirigidas hacia la mejora de sus propiedades para su uso en carreteras y en pavimentos; así como para su uso en suelos expansivos; es por ello que se recomienda este tipo de métodos en las construcciones, como carreteras, muros de contención, terraplenes de ferrocarril, protección de taludes, entre otros [20].

Usando ensayos de tracción indirecta para determinar la σ_v , el ensayo de Soporte California CBR (ASTM D1883-07) y la resistencia al corte triaxial (ASTM D2850-82) en suelos reforzados con fibras [21], evaluaron fibras naturales y sintéticas de poliéster en suelos arcillosos, evaluando

contenidos de fibra en porcentajes del 0,50, 1.00 y 2.00%, con longitudes de 2.50, 5.00 y 7.50 mm. Se observó que la cantidad de fibra y su longitud influía en los resultados, la resistencia a la tracción con fibras de poliéster alcanzó valores de 48.57 kPa, también aumento los parámetros de resistencia (ángulo de fricción interna en 100.00% y cohesión en 70.00%)

Otros investigadores también resaltan las bondades de la utilización de diferentes tipos de fibra para ser mezcladas con el suelo y así mejorar sus características, especialmente la σ_t . En suelos arcillosos incorporando bajos porcentajes de fibra sintética (0.20-0.80%) se compararon resultados de densidad seca máxima (Proctor Modificado, AASHTO T180D) y ensayo de Soporte California CBR (ASTM D1883-07) entre los suelos reforzados y el natural, mejorando sus características mecánicas [22].

Por tales razones, esta investigación planteó incorporar fibras sintéticas al suelo y estimar la σ_t , mediante el ensayo de tracción indirecta o ensayo brasilero, probando con micro y macrofibras de polipropileno. Estas fibras se incorporaron al suelo areno limoso en un porcentaje de 0.50, 1.00, 1.50 y 2.00% en función del peso, con un contenido de humedad del 17.00%, esta humedad permitió detectar a simple vista la aparición de la grieta de tracción, elaborando 30 briquetas por cada porcentaje de fibra añadida. Estos resultados de la σ_t de las briquetas reforzadas se compararon con la σ_t de un suelo patrón (sin fibra, condición natural).

2. MÉTODO

La investigación se fundamentó en el método del ensayo de tracción indirecta o ensayo brasilero (ASTM C-496, UNE 83.306 e ISO 4108), donde se planteó evaluar el comportamiento del suelo, tomando en cuenta como primera etapa la búsqueda de la resistencia a la tracción de la muestra patrón sin reforzar y muestras conformadas por suelo reforzado con fibras sintéticas, a modo de comparación.

Los ensayos realizados para la caracterización del suelo fueron: granulometría por tamizado (ASTM D422) y límites de consistencia o de Atterberg (ASTM D4318), que permitieron clasificar el suelo como una arena limosa. De igual forma, se realizaron ensayos de tracción indirecta tanto en la muestra patrón como en las reforzadas con diferentes porcentajes de fibras. A continuación, se presenta el procedimiento llevado a cabo.

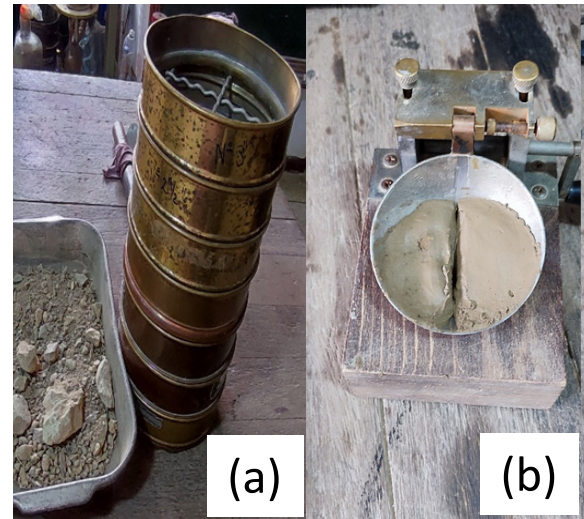
2.1 CARACTERIZAR EL TIPO DE MATERIAL

Como punto de inicio al estudio de la caracterización se realizó la toma de material, en el sector Alto Prado, Municipio Libertador del Estado Mérida, Venezuela, con coordenadas UTM (19N 62620.50; 51534.80).

Seguidamente, se realizó del ensayo de granulometría (ASTM D422), el cual se basó en la selección de una muestra significativa, con la finalidad de conocer cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas del material de trabajo y el ensayo de límites de consistencia (ASTM D4318), con la finalidad de determinar el límite líquido y la plasticidad, para de esta manera poder realizar la caracterización del material. Como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Ensayo granulométrico y límites de consistencia. (a) ensayo granulométrico por tamizado, (b) ensayo de límites de consistencia.



2.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PATRÓN

Para fabricar las briquetas el material se encuentra en estado seco, se preparó una mezcla agregando una cantidad de 1.500 g de material y 255 ml de agua que representan un 17% del peso de la muestra, en un recipiente de aluminio, donde se procedió al amasado con el fin de incorporar de una manera uniforme los materiales, proceso mostrado en la Figura 2.

Figura 2.

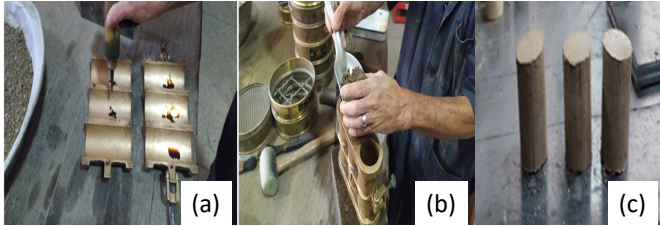
Preparación de la muestra patrón. (a) colocación de agua a la muestra de suelo para garantizar contenido de humedad, (b) amasado de la muestra para incorporar el agua al suelo.



La Figura 3 muestra la fabricación de la briqueta del material patrón en el molde (diámetro 2" y longitud 2.50"), compactadas en una sola capa con una energía de compactación de diez (10) golpes con un martillo de 1.200 g. Este proceso se repitió para elaborar 30 briquetas que posteriormente se ensayaron a tracción indirecta para determinar la resistencia a la tracción.

Figura 3.

Elaboración de briquetas de la muestra patrón. (a) preparación del molde para tres briquetas, (b) colocación del material del molde para la compactación, (c) briquetas compactadas.



2.3. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA O ENSAYO BRASILEIRO (ASTM C-496, UNE 83.306 E ISO 4108), A LA MUESTRA PATRÓN

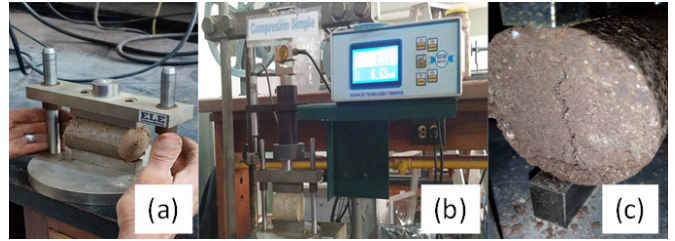
Para evaluar el comportamiento de suelos sin reforzar, sometidos a tracción, y obtener su resistencia, se presenta el siguiente procedimiento práctico en el laboratorio: con el material preparado con el contenido de humedad establecido se construyeron las briquetas utilizando el molde mostrado en la Figura 3, con una energía de compactación de 10 golpes con el martillo estándar del equipo. Luego de la elaboración de las briquetas, se procedió con la realización del ensayo, el cual se basó en la colocación de manera horizontal de cada una de ellas en una prensa, como se muestra en la Figura 4 (a), dejándola ajustada y preparada. Posteriormente, se llevó a la máquina de ensayo (máquina de ensayo de tracción), se comenzaron a aplicar las cargas progresivamente, hasta llegar al punto de rotura (Figura 4 [b]); cada una de las briquetas presentó sistemas de agrietamiento, donde la grieta producida por tracción se mostró de forma transversal a la sección de aplicación de la carga (Figura 4 [c]). Este proceso se repitió en cada briqueta, para un total de 30 ensayos, obteniendo así un conjunto de resultados.

2.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA REFORZADA

Se probaron dos tipos de fibras en las mezclas, comenzando con micro y luego con macrofibra, probando con diferentes porcentajes de 0.50, 1.00, 1.50 y 2.00% sobre el peso de la muestra de suelo, necesario para fabricar el modelo de briqueta en el molde de ensayo. Aclarando que esta adición se hizo basada en el peso de la muestra y no en el peso específico ni en el volumen y que la fibra se recortó a la mitad para adecuarla al molde de compactación. La escogencia de los porcentajes de fibra y su longitud a utilizar se basó en ex-

Figura 4.

Ensayo de tracción indirecta (a) colocación de las briquetas en la prensa de tracción, (b) briqueta montada en la máquina de tracción indirecta, (c) grieta de tracción presentada durante el ensayo.



periencias de investigaciones anteriores [10, 21]. La Tabla 1 muestra las características de la fibra, número de briquetas elaboradas y porcentaje de fibra utilizado.

Se siguió el mismo procedimiento de fabricación de briquetas ya descrito. La Figura 5 muestra el proceso de amasado de la muestra reforzada y la briqueta compactada.

Figura 5.

Preparación de la muestra reforzada. (a) mezclado en húmedo con la macrofibra, (b) briqueta compactada.



2.5. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA A LA MUESTRA REFORZADA

El procedimiento realizado a las briquetas reforzadas es idéntico al realizado a la muestra patrón. Este proceso se repitió con los diferentes porcentajes de fibra, 30 briquetas reforzadas para cada porcentaje, teniendo así un total de 120 briquetas ensayadas, obteniendo un conjunto de resultados que fueron comparados con los de la muestra patrón.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de haber realizado paso a paso el proceso metodológico se presentan los resultados obtenidos a partir del ensayo de las briquetas.

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

3.1.1. Material de suelo

Se estudió la caracterización de la muestra de suelo, mediante el ensayo de granulometría por tamizado (ASTM

Tabla 1.

Características y porcentajes de las fibras utilizada.

Características técnicas de las fibras						Número de briquetas por porcentaje de fibra			
Tipo de fibra	Marca	Material	Densidad (kg/l)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
Microfibra	SIKA	Polipropileno	0.91	6.00	-	-	-	-	-
Macrofibra	SIKA	Polipropileno	0.91	6.50	0.46	30	30	30	30

D422) y límites de consistencia (límites de Atterberg) (ASTM D4318), manipulando el material bajo las condiciones y procedimiento establecido por estos ensayos. Al realizar el análisis granulométrico a través de la vía húmeda, se pudo evidenciar, un mayor porcentaje de arenas y finos con relación al contenido de material grueso, de igual forma, se hallaron los límites de consistencia del suelo y mediante el método de clasificación del Sistema Unificado de clasificación de Suelos (SUCS) se determinó que el tipo de suelo es una arena limosa (SM). La Tabla 2 muestra el resumen de los resultados de caracterización del suelo.

Tabla 2.

Resumen de la caracterización del material.

Ensayo granulométrico y límites de consistencia							
% G	% S	% F	% LI	IP	Cu	Cc	Clasificación
0.00	53.86	46.15	26.63	4.06	6.27	0.16	SM

%G, representa el porcentaje de gravas, %S, representa el porcentaje de arenas, %F, es porcentaje de finos, %LI, es límite líquido, IP, representa el índice plástico, Cu, es el índice de uniformidad, Cc, es el índice de curvatura, SM, representa la clasificación SUCS.

3.1.2. Material de fibra sintética

Se realizaron pruebas con dos tipos de fibras. Inicialmente se planteó el reforzamiento con microfibra sintética, en este caso, trabajar con este material no funcionó, ya que por su estructura las fibras tienden a unirse entre ellas sin poder integrarse correctamente con la muestra de suelo seco y húmedo que es la condición inicial, por lo que se descartó este tipo de fibras. En la Figura 6, se puede apreciar lo ocurrido al momento de mezclar la microfibra con el suelo.

Por consiguiente, se descartó la microfibra, optando finalmente por la utilización de la macrofibra. Cabe destacar que los filamentos de macrofibra se recortaron a la mitad, 3,25 cm ($L_{fibra}=1.28''$), para poder adaptarlas al diámetro del equipo de compactación de las briquetas (2'') (ver Figura 4), la longitud de las briquetas $L_{briqueta}=2.50''$. Manteniendo una relación entre longitudes $L_{fibra}=0.512L_{briqueta}$.

3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA A LA MUESTRA PATRÓN Y REFORZADA

El ensayo de tracción indirecta, se realizó tanto para las briquetas de muestra patrón como a las reforzadas con macrofibra, como se explicó de forma detallada anteriormente, arrojando los siguientes resultados mostrados en la Tabla 3.

3.3. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN ENTRE MUESTRA PATRÓN Y REFORZADAS

La Figura 7 muestra la dispersión de los resultados de las 30 briquetas de la muestra patrón y los diferentes porcentajes de macrofibra de refuerzo utilizada. Por otro lado, en la Figura 8 se representa el valor del promedio aritmético de los diferentes casos evaluados.

En la figura anterior se puede notar que las briquetas con los primeros porcentajes (0.50 y 1.00%) de macrofibra muestran un σ_t por debajo del patrón, esto puede ocurrir porque la fibra no aporta la suficiente resistencia comparativamente con lo que aporta el material de suelo sustituido, la sustitución del material se hizo basada en peso de suelo, sin considerar la diferencia de pesos específicos relativos que existe entre el suelo y la fibra, lo que implica que se está sustituyendo un material por otro que pesa menos, pero ocupa mucho volumen.

Los porcentajes de mayor aporte de macrofibra (1.50 y 2.00%) aumentan la resistencia del suelo con respecto al patrón, la adición de 1.50% de fibra aumenta la resistencia en un 3.69%, mientras que el 2.00% aumenta la resistencia en un 24.00%. Este resultado ascendente indica que es posible seguir aumentando el porcentaje de macrofibra para ganar mayor resistencia; sin embargo, hay que evaluar otras características del suelo que se puedan ver afectadas por un valor excesivo de este material en adición, aspecto no evaluado en esta investigación y que ese porcentaje permita un mezclado uniforme.

Esta tendencia en el aumento de la σ_t también es observada en las investigaciones referentes [14-18], [21], existen diferencias con los antecedentes revisados tanto en el tipo de suelo, materia muy diverso con incertidumbre en su comportamiento por carecer de estructura, contenido de humedad, tipo de fibras, características mecánicas y propiedades elásticas, equipos para determinar resultados

Tabla 3.

Resultados del ensayo de tracción indirecta en la muestra patrón y reforzadas

Muestra n=30	Patrón (kN/m ²)	Suelo reforzado con macrofibra (kN/m ²)			
		0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
1	22.20	17.81	15.65	24.14	24.79
2	22.49	16.85	21.27	27.77	24.21
3	24.50	19.14	22.79	16.85	23.06
4	22.50	18.60	15.95	19.58	29.76
5	23.52	19.59	19.20	26.27	29.09
6	22.15	21.10	12.44	22.47	32.79
7	22.23	22.08	25.78	26.44	24.31
8	23.43	18.86	23.99	30.37	23.53
9	24.21	18.96	22.52	24.31	29.57
10	22.46	20.87	21.59	22.22	35.00
11	23.18	19.41	23.52	21.29	28.84
12	23.35	19.52	25.38	22.47	26.86
13	24.51	21.46	19.25	25.04	27.47
14	22.06	20.36	28.25	24.48	33.14
15	23.33	15.58	24.14	22.21	28.38
16	23.82	17.43	23.55	21.56	29.90
17	23.45	18.23	22.31	24.39	24.53
18	23.58	17.57	20.71	26.37	26.41
19	23.83	18.92	18.64	21.56	30.98
20	23.47	21.54	19.82	26.37	28.36
21	22.33	22.54	29.43	22.55	29.09
22	23.17	20.57	18.18	23.52	34.32
23	23.43	18.61	20.68	24.43	27.43
24	23.53	19.47	21.56	23.53	27.93
25	24.10	17.54	22.01	26.66	32.55
26	25.46	17.45	23.08	30.37	30.90
27	24.49	16.27	29.85	25.38	33.35
28	23.47	19.37	24.76	24.46	28.14
29	23.10	11.41	25.65	27.18	32.37
30	25.32	18.61	28.45	24.33	33.97
Promedio	23.42	18.86	22.35	24.28	29.04
Desviación Estándar	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03

y parámetros analizados, esto hace difícil la comparación, por lo que hay que tomar los resultados con prudencia y ver su aplicabilidad en casos particulares.

En la Tabla 4 se presenta el promedio aritmético de la deformación unitaria (ϵ %) que sufren las briquetas patrón y las reforzadas.

Tabla 4.Deformación unitaria (ϵ %) suelo patrón y reforzado con macrofibra.

Muestra n=30	Patrón	Suelo reforzado con macrofibra			
		0.50 %	1.00 %	1.50 %	2.00 %
Deformación unitaria (ϵ %)	0.34	1.85	2.87	2.93	3.05

La Figura 9 muestra la ϵ % contra el σ_t del suelo patrón y las Figuras 10 y 11 los valores del suelo reforzado.

Se puede notar en los resultados presentados que reforzar el suelo areno limoso con macrofibra tornó el material ligeramente más deformable con respecto al patrón a medida que se aumentó el porcentaje de fibra, esto es un aspecto importante a evaluar para su aplicación.

En cuanto al uso en campo de las fibras sintéticas como material de refuerzo, esto está sujeto a un análisis costo-beneficio. El costo de la fibra en comparación con el material suelo es mucho mayor, por lo que se hace viable en pequeños volúmenes de material como en rellenos de muros de contención para evitar o minimizar la aparición de grietas de tracción. Con la dosificación de 2.00% de macrofibra se necesitan por metro cúbico de suelo 40.2 kg de fibra, esto representa un costo de USD 120.60 en comparación con USD 25.00 que puede costar 1 m³ de suelo de préstamo. La decisión de su uso dependerá si el beneficio justifica la inversión.

4. CONCLUSIONES

Culminado el proceso de ensayos y análisis de resultados, se presentan las conclusiones de esta investigación. La resistencia a la tracción del suelo, a pesar de tener un valor pequeño en comparación con la resistencia a la compresión, representa un parámetro importante a considerar en algunos tipos de obras civiles, donde es de relevancia los primeros indicios de rotura del material. Tal es el caso de presencia de grietas de tracción en taludes, desecación de suelos y en material compactado en terraplenes y rellenos en muros.

Esta investigación evaluó la incorporación de fibras a la masa de suelo con la intención de mejorar su resistencia a la tracción, esto con la finalidad de disminuir la presencia de grietas de tracción que afectan la estabilidad de una obra civil. Se utilizaron microfibras, pero este material no se logró mezclar uniformemente con el suelo, en estado seco y húmedo, descartándose como posibilidad.

Se pudo comprobar que reforzar el suelo areno limoso (SM) con macrofibras mejora sustancialmente la resistencia a la tracción, concluyendo que al reforzar este suelo con 1.50 y 2.00% de macrofibra aumenta la resistencia a la tracción en 3.69 y 24.00%, respectivamente, en comparación con el patrón; sin establecer este rango como un máximo de adición, ya que la tendencia indica aumento en la resistencia a medida que se aumenta el porcentaje de fibra por encima del 1.50%.

De igual forma, se evidenció un incremento de la deformación unitaria del suelo reforzado en comparación con el patrón, se debe evaluar las deformaciones laterales y asentamiento que este incremento puede ocasionar y que tan significativo es para la estructura vial donde se va a utilizar.

RECOMENDACIONES

Seguir esta línea de investigación, aumentando los porcentajes de macrofibra como material de refuerzo en el suelo, evaluando el comportamiento de la resistencia a la tracción y chequeando como estos mayores porcentajes pueden afectar las propiedades mecánicas y elásticas del material.

Para los porcentajes de macrofibra incorporada 0.50 y 1.00%, es necesario evaluar con mayor precisión qué sucede con la resistencia a la tracción, ya que se esperaba que al incorporar la misma aumentaría la resistencia sin importar el porcentaje, esto no sucedió sino hasta porcentajes mayores. Evaluar la posibilidad de que la resistencia aportada por el suelo por sí solo sea mayor que la aportada por la fibra en esos porcentajes bajos.

Probar con otros tipos de fibra, con textura diferente a la utilizada, por ejemplo, la fibra corrugada, fibras de material reciclado como aporte ecológico y otros tipos de suelo. Al igual que aquellas que sean de otro tipo de polímero diferente al polipropileno.

Hacer la adición del porcentaje de fibra realizando una corrección volumétrica, ya que en esta investigación se hizo basada en el peso del suelo, sin considerar la gran diferencia entre los pesos específicos relativos de los sólidos (Gs) del suelo y la fibra que difieren en más de un 20.00%. Esta diferencia hace que la sustitución no sea proporcional, porque se sustituye un material que pesa más por uno que pesa menos, pero ocupa mucho más volumen, esto pudiera afectar los resultados por las proporciones de material con respecto al patrón.

REFERENCIAS

- [1] G. Chen, P. Tang and R. Huang. «Critical tension crack depth in rockslides that conform to the three-section mechanism». *Landslides*, n.º 18. 79-88. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01471-x>. 2021.
- [2] W. Rankine. On the stability of loose earth. *Philosophical transactions of the Royal Society London*. vol. 147. pp. 9-27. DOI: 10.1098/rstl.1857.0003. 1857.
- [3] G. Ávila. *Resistencia a la tracción. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. España. <http://hdl.handle.net/10803/6233>. 2004.
- [4] S. Utili. «Investigación mediante análisis límite sobre la estabilidad de taludes con fisuras». <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/epdf/10.1680/geot.11.P.068>. 2013.
- [5] M. Abdollahi, F. Vahedifard, and M. Abed. «Effect of Tension Crack Formation on Active Earth Pressure Encountered in Unsaturated Retaining Wall Backfills». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol 147, issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002434. 2021.
- [6] L. Tang, Z. Zhao, Z. Luo and Y. Sun. «What is the role of tensile cracks in cohesive slopes?» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical and Engineering*, vol. 11. 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.09.007>. 2019.
- [7] J. Briceño. *Modelo numérico del comportamiento de la grieta de tracción en suelos*. Tesis doctoral. Universidad de Los Andes. Venezuela. https://www.researchgate.net/publication/370774191_Tesis_Doctoral_Modelo_numerico_del_comportamiento_de_la_grieta_de_traccion_en_suelos. 2023.
- [8] P. Garnica, P. y G. Itandehui. Algunos aspectos de la resistencia a la tensión y fatiga en suelos arcillosos estabilizados con cal. *Publicación Técnica 230*. Instituto Mexicano del Transporte. México. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt230.pdf>. 2023
- [9] D. A. Farrel, E. L. Greacen and W. E. Larson. «The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 31, n.º 4. 445-450. <https://doi.org/10.2136/sssaj1967.03615995003100040011x>. 1967.
- [10] J. Briceño, L. Castillo y M. Mercado. *Evaluación de la resistencia a la tracción indirecta y estabilidad de mezclas asfálticas en frío reforzadas con fibras*. Tesis de pregrado. Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. 2023.
- [11] Viswanadham B.V.S, Jha B.K. & Pawar S.N. «Influence of geofibers on the flexural behavior of compacted soil beams». *Geosynthetics International*, vol. 17, n.º 2, pp. 86-99, DOI: 10.1680/gein.2010.17.2.86 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956241499&doi=10.1680%2fgein.2010.17.2.86&partnerID=40&md5=e70789b4f5d6e78b32929eb2f8d24ac9>. 2010.
- [12] D. Jaramillo y D. Londoño. *Suelos reforzados con fibras naturales*. Tesis de grado. Universidad EIA. Colombia. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/3439>. 2012.
- [13] J. López. *Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)*. Tesis de pregrado. Universidad EIA. Colombia. <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/d9f7a82a-9857-479f-a78d-a4a8f60ece5b>. 2013.
- [14] C.-S. Tang, C.-S. Wang, Y.-J. Cui, B. Shi & J. Li. «Tensile

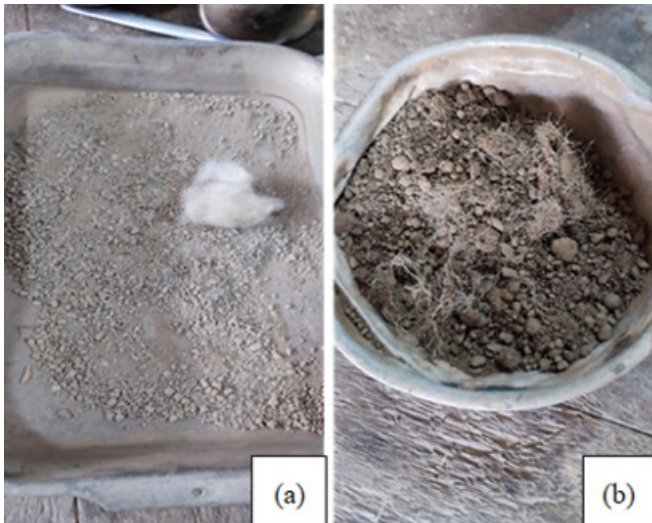
strength of fiber-reinforced soil». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, n.º 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546). 2016.

- [15] J. Clariá y P. Vettorelo. Mecanismos de resistencia al corte en una arena reforzada con fibras. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Santa Fe Argentina. https://www.researchgate.net/profile/PaulaVettorelo/publication/315792515_Mecanismos_de_resistencia_al_corte_en_una_arena_reforzada_con_fibras/links/58e543af0f7e9b5622f56a90/Mecanismos-de-resistencia-al-corte-en-una-arena-reforzada-con-fibras.pdf. 2016.
- [16] P. Vettorelo y J. Clariá. «Suelos reforzados con fibras: estado del arte y aplicaciones». *Revista Facultad de Ciencias Exactas. Físicas y Naturales*, vol. 1, n.º 1. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6856/7934>. 2014.
- [17] P. Vettorelo y J. Clariá. Arenas reforzadas con fibras sintéticas. Variación del comportamiento con la compacidad. https://www.researchgate.net/profile/Paula-Vettorelo/publication/273763342_Arenas_reforzadas_con_fibras_sinteticas_Variacion_del_comportamiento_con_la_compacidad/links/550b0e180cf285564096f848/Arenas-reforzadas-con-fibras-sinteticas-Variacion-del-comportamiento-con-la-compacidad.pdf. 2012.

ANEXOS

Figura 6.

Mezcla de microfibra con la muestra del suelo. (a) muestra de suelo seco con microfibra, (b) muestra de suelo húmedo mezclado con microfibra.



- [18] M. Dafalla. A. Moghal. A. Al-Obaid. «Enhancing tensile strength in clays using polypropylene fibers». *International Journal of GEOMATE*, vol. 12, n.º 29, pp. 33-37. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85011661332&partnerID=40&md5=328f2becaf115da03db82cb3da976cb8>. 2017.
- [19] E. Sumba y M. Zumba. *Comparación de parámetros mecánicos y físicos del adobe tradicional con adobe reforzado con fibra de vidrio*. Tesis de pregrado. Universidad de Cuenca. Cuenca. Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30095>. 2018.
- [20] F. Molina. *Investigación sobre los procesos de estabilización de suelos para fines constructivos con fibras naturales y sintéticas*. Tesis de pregrado. Universidad de Sevilla. España. <https://hdl.handle.net/11441/104011>. 2020.
- [21] M. Nezhad. A. Tabarsa & N. Latifi. «Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay». *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, n.º 3, 626-642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>. 2021.
- [22] F. Solís y D. Inga. *Análisis del comportamiento mecánico del suelo arcilloso reforzado con fibras de polipropileno en la Merced-Junín 2021*. Tesis de Pregrado. Universidad Continental. Huancayo. Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11369>. 2021.

Figura 7.

Dispersión de resultados, resistencia a la tracción, suelo patrón y reforzado con macrofibra.

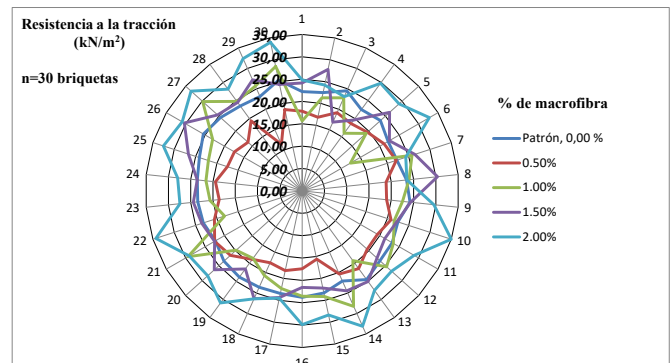


Figura 8.

Resultados promedio, resistencia a la tracción, suelo patrón y reforzado con macrofibra.

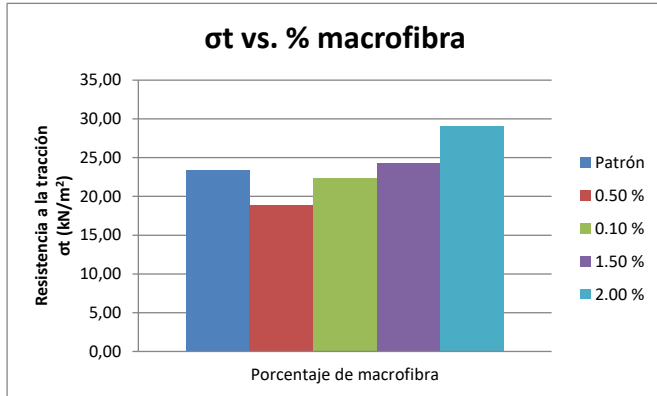


Figura 9.

ϵ % contra el σ_t del suelo patrón

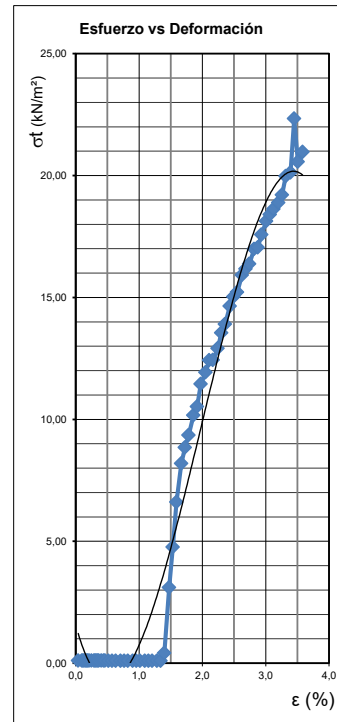


Figura 10.

ϵ % contra el σ_t del suelo reforzado con macrofibra. (a) 0.50% de microfibras, (b) 1.00% de microfibras.

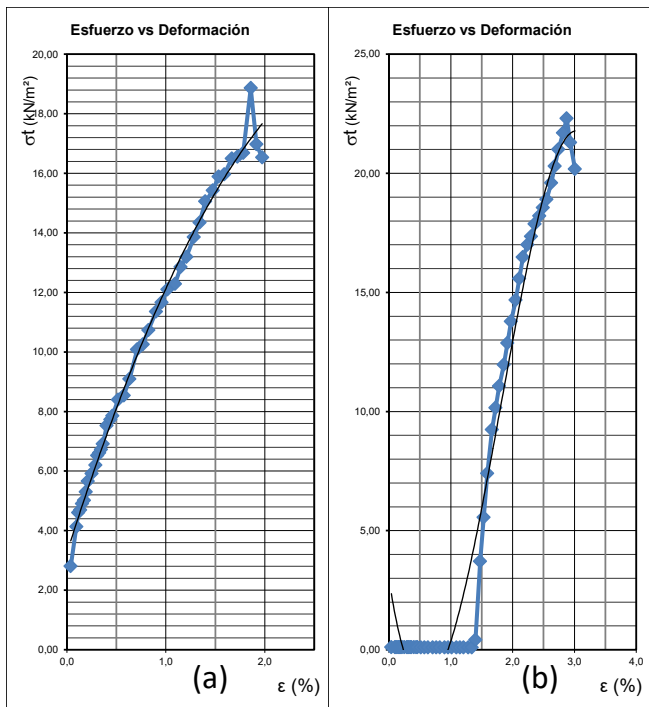


Figura 11.

ϵ % contra el σ_t del suelo reforzado con macrofibra. (a) 1.50% de microfibras, (b) 2.00% de microfibras.

