

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Comportamiento estático de un suelo fino con inclusiones de fibra de Polietileno Tereftalato (PET)

Carolina HERNÁNDEZ^{a,1} y Eduardo BOTERO^a

^aInstituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen. Este proyecto presenta el estudio de la fibra de Polietileno Tereftalato como material de refuerzo en un suelo fino mediante pruebas de laboratorio, las cuales incluyen la caracterización del suelo mediante pruebas índice y el análisis mecánico del suelo natural y mejorado mediante pruebas triaxiales estáticas tipo UU; estas pruebas fueron realizadas en muestras de suelo con diferentes contenidos de fibra (0, 0.1, 0.3, 0.5 y 0.7%) respecto al peso seco del suelo.

Palabras Clave. PET, contenido de fibra, refuerzo.

1. Introducción

La reutilización de envases de *PET* para la elaboración de fibras que, al integrarse al suelo, sirvan como refuerzo y estabilización del mismo, es una técnica amigable con el medio ambiente ya que se deriva de la reutilización de envases de polietileno tereftalato (*PET*), los cuales ocasionan contaminación al medio ambiente debido al manejo deficiente de los residuos.

Se calcula que 25 millones de toneladas de plásticos se acumulan en el ambiente cada año y pueden permanecer inalterables por un periodo entre 100 y 500 años de acuerdo al tipo de plástico y las condiciones en que se dispongan. Esto se debe a que su degradación es muy lenta y consiste principalmente en su fragmentación en partículas más pequeñas, mismas que se distribuyen en los mares (en estos se han encontrado entre 3 a 30 kg/km²), ríos, sedimentos y suelos, entre otros.

El reforzamiento de suelos no es un tema novedoso, sin embargo, el uso de materiales reciclados aun no es muy utilizado ni estudiado, especialmente en lo que se refiere a suelos finos. El refuerzo de fibras de *PET* tiene potencial aplicación en estructuras que necesitan soportar grandes deformaciones sin la formación de grietas y sin presentar pérdida en su resistencia, como es el caso de núcleos de presas de tierra y enrocamiento y en la construcción de bordos, ya que las incorporaciones de fibras reducen el potencial de agrietamiento y aumentan la resistencia respecto al nivel de deformación.

Este proyecto presenta el estudio de la fibra de Polietileno Tereftalato como material de refuerzo en un suelo fino mediante pruebas de laboratorio, las cuales incluyen la

¹Carolina Hernández Valerio, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, México; E-mail: CHernandezV@iingen.unam.mx

caracterización del suelo mediante pruebas índice y el análisis mecánico del suelo natural y mejorado mediante pruebas triaxiales estáticas.

El suelo analizado fue extraído de sondeos realizados en el antiguo Lago de Texcoco en el Estado de México a una profundidad de 3.4 a 4.9 m, se clasificó como un limo arcilloso de alta plasticidad.

2. Estado del arte

Existen diversos estudios acerca del comportamiento del suelo reforzado con diferentes tipos de fibras artificiales, entre los cuales afirman que la resistencia al corte pico y residual aumentan con el contenido de fibras en un suelo arenoso, de acuerdo a diversos estudios reportados en la [1], [2] y [3]. En estos se plantea que la resistencia al corte aumenta con la incorporación de fibras a espensas de una mayor deformación [4].

Diversos autores han reportado que, en ensayos triaxiales realizados sobre arenas sueltas reforzadas con fibras sintéticas, la curva de variación del esfuerzo desviador con la deformación específica parece aumentar de manera lineal para grandes deformaciones sin que pueda apreciarse un esfuerzo desviador máximo. En un estudio experimental realizado por [5], observaron que el contenido de fibra óptimo depende de la deformación máxima seleccionada para definir la falla e incluso se puede traducir en una disminución de la resistencia para diferentes niveles de deformación determinados.

Siguiendo con esta línea, [6] realizaron pruebas en campo en un suelo arenoso estabilizado con fibra de polipropileno y concluyeron que la técnica muestra gran potencial para campos de aviación y caminos militares, y que una capa de 203 mm de espesor de arena con fibras, es suficiente para soportar cargas considerables de tráfico de camiones militares. Las pruebas en campo también demostraron que era necesario preparar la superficie con una emulsión de carpeta para prevenir la separación de las fibras debajo del tránsito.

Por otro lado, [7 y 8] llevaron a cabo pruebas triaxiales, pruebas de relación de soporte (*CBR*) y pruebas de resistencia a tensión, en arenas limosas y arcillas orgánicas. Los resultados demostraron que ambos suelos aumentan la cohesión, y una disminución en su ángulo interno de fricción con un incremento de contenido de fibra de 3% respecto al peso del suelo seco. Los efectos de la aplicación de la fibra de polipropileno pueden observarse en la prueba triaxial y en las pruebas de compresión no confinada. La deformación axial de la muestra sin refuerzo resultó en el desarrollo de un plano de falla, mientras que la muestra con refuerzo indicó el aumento en la ductilidad de la mezcla suelo-fibra.

Así mismo, [9] afirman que las fibras de polipropileno mejoran la resistencia a la compresión del suelo no confinado y reducen la contracción y la expansión de las arcillas. [10] Reforzaron suelo arcilloso con fibras de polipropileno y observaron un aumento en la resistencia a la compresión no confinada

Además, la eficacia de la mezcla de flyash (residuo de combustión del carbón en las plantas de energía térmica) y fibra de polipropileno, para reducir las características de expansión y contracción del suelo también han sido estudiadas. Los reportes muestran que el refuerzo con fibras de polipropileno reduce la expansión de las arcillas expansivas [10, 11 y 12].

3. Materiales empleados

3.1. Material de refuerzo

Las fibras de PET se pueden encontrar en el mercado con diferente longitud y diámetro y son extraídas de residuos de plástico. Para este proyecto de investigación se utilizaron fibras de polietileno tereftalato como elemento de refuerzo, las fibras fueron proporcionadas por la empresa Tecnología de Reciclaje S.A. de C.V. Dichas fibras cuentan con una longitud de 50 mm y un diámetro de 15 μm .

3.2. Suelo

Se realizaron las siguientes pruebas sobre la muestra natural de suelo:

Determinación de la densidad de sólidos: El objetivo de esta prueba es la determinación de la densidad de sólidos de la muestra reconstituida mediante vía húmeda, se tomó como referencia la norma [13].

Determinación del límite líquido: Para la determinación del límite líquido de la muestra propuesta fue utilizado un cono de penetración, debido a la falta de adherencia de las partículas del suelo con la copa de Casagrande. El procedimiento utilizado para este ensaye fue el descrito por [14].

Determinación del límite plástico: esta prueba se realizó de acuerdo a la norma [15].

Los resultados de estas pruebas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Propiedades índices del suelo natural.

Prof. (m)	ω_L (%)	ω_P (%)	IP (%)	Gs	SUCS
0.5	123.7	53.4	70.3	2.74	MH

A sí mismo se determinó el límite líquido y de las muestras de suelo con inclusiones de fibra de PET; el límite líquido se determinó con la ayuda de un cono de penetración.

La variación de la plasticidad del suelo con inclusiones de fibra se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Variación del límite líquido con el contenido de fibra.

%Fibra	ω_L (%)
0	123.69
0.1	126.51
0.3	127.66
0.5	132.06
0.7	135.83

El contenido de agua necesario para que el suelo pase de un estado plástico a líquido aumenta a medida que el contenido de fibra se incrementa.

4. Técnicas experimentales

4.1. Pruebas de compactación

Para determinar las condiciones con las que se realizaran las distintas pruebas que cumplan con el alcance de este trabajo, se realizaron pruebas de compactación en el suelo natural y con inclusiones de fibra

El equipo utilizado fue un molde de compactación en miniatura, que consta de un tubo partido de 9 cm de longitud y 3.6 cm de diámetro, la base del tubo partido, una extensión metálica en forma cilíndrica de 3 cm de altura y abrazaderas metálicas.

Se realizaron pruebas de compactación para cada mezcla de suelo con fibra, con un pisón de compactación de 2500 g por medio de amasado; en los resultados se aprecia un aumento en el peso volumétrico seco máximo para los suelos con un contenido de fibra de 0.5 y 0.7% respecto al suelo sin fibra, así mismo, se observa una disminución en el peso volumétrico seco máximo para los suelos con un contenido de fibra de 0.1 y 0.3%. El valor mínimo de γ_d fue de 1.2 g/cm³ correspondiente a 0.1% de fibra y el valor máximo de γ_d fue de 1.33 g/cm³ correspondiente a la muestra con 0.5% de fibra.

Los contenidos de agua óptimos obtenidos de estas pruebas se utilizaron para la composición de las probetas que se ensayaron posteriormente.

4.2. Medición de la resistencia a la compresión

Para comparar la resistencia a la compresión del suelo con inclusiones de fibra con la resistencia a la tensión del mismo se efectuaron pruebas triaxiales tipo UU bajo carga estática. A continuación, se describen los equipos y métodos utilizados en estas pruebas:

La medición de la resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a la norma [16], el equipo utilizado fue una cámara triaxial desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la cámara dispone con un transductor de desplazamiento *LVDT* con carrera de 25 mm; una celda de carga sumergible con capacidad de detectar hasta 150 kg que se encuentra colocada dentro de la cámara. Se tiene también un sensor de presión con capacidad de 100 psi y como apoyo para la aplicación de presión, se tiene un manómetro de carátula sirviendo de guía.

Los sensores descritos se conectan por medio de cables a un receptor de señales, que convierte éstas a datos que se pueden analizar y observar desde un equipo de cómputo. El programa que se empleó para visualizar y digitalizar las señales recibidas de la cámara triaxial fue *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)*. Este programa es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación gráfico.

Se realizaron cinco series de pruebas con diferentes contenidos de fibra: 0, 0.1, 0.3, 0.5 y 0.7% respecto del peso seco del material. Para cada serie se realizaron pruebas para 50, 100 y 150 KPa de presión de confinamiento (σ_3), con las cuales se calcularon los parámetros de resistencia al corte. El tipo de pruebas realizadas fueron no consolidadas no drenadas (*UU*) bajo carga estática y dinámica y a deformación controlada.

Las pruebas estáticas se realizaron con una velocidad de deformación 0.16666667 mm/min, que equivale a 10 mm por hora.

5. Resultados experimentales

De acuerdo con las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas en las pruebas triaxiales *UU*, se observa que la resistencia a la compresión aumenta respecto al contenido de fibra para una presión de confinamiento de 50 KPa (Figura 1).

Este aumento se vuelve más notable al ir aumentando la deformación unitaria, con esto podemos deducir que el contenido de fibra óptimo dependerá de la deformación máxima seleccionada. Para una deformación unitaria de 10% la resistencia a la compresión del suelo con 0.1% de fibra aumenta 90% respecto a la resistencia del suelo sin fibra, las muestras con 0.3 y 0.5% de fibra aumentan 119% y el suelo con 0.7% de fibra aumenta 163%.

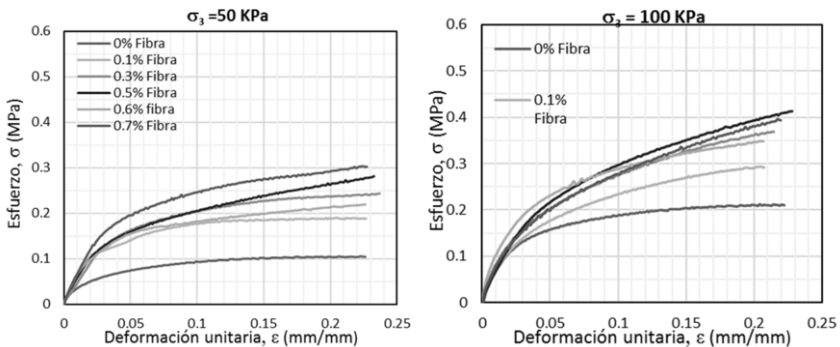


Figura 1. De izquierda a derecha: Gráfica esfuerzo vs deformación para una presión de confinamiento de 50 KPa. Gráfica esfuerzo vs deformación para una presión de confinamiento de 100 KPa.

Para una presión de confinamiento de 100 KPa la resistencia máxima se presenta para un suelo con un contenido de fibra de 0.5% tomando en cuenta el 10% de la deformación (Figura 1), para deformaciones menores la resistencia máxima varía.

Al ir aumentando la presión de confinamiento de 100 a 150 KPa se puede notar una disminución de la resistencia del suelo con un contenido de fibra de 0.7% con relación a las demás muestras. La resistencia máxima que presenta para una presión de confinamiento de 150 KPa (Figura 2) corresponde a un suelo con un contenido de fibra de 0.5% tomando en cuenta el 10% de la deformación.

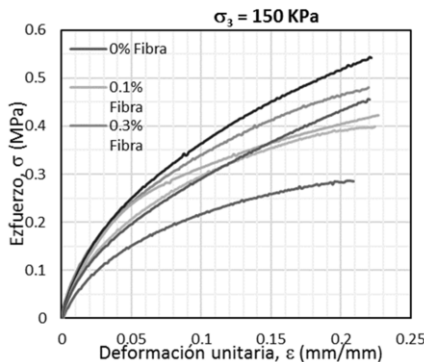


Figura 2. Gráfica esfuerzo vs deformación para una presión de confinamiento de 150 KPa.

Las fallas observadas en las probetas de suelo adicionado con fibra fueron plásticas (Figura 3), además se puede ver un ligero agrietamiento en las muestras ensayadas con fibra debido a que la presencia de fibra puede inducir planos de discontinuidad cuando su porcentaje llega a ser significativo. La dirección de las fisuras no presenta un patrón uniforme ni continuo.



Figura 3. Probetas de suelo después de ser ensayadas (de izq. A derecha: Muestra con 0.1% de fibra, Muestra con 0.5% de fibra y Muestra con 0.7% de fibra.

Para suelos con fibra no se presentó una falla bien definida, por lo que se consideró deformación lineal máxima de 20% respecto a la altura total de la muestra para determinar los parámetros de resistencia al corte. Los parámetros de resistencia obtenidos de las pruebas triaxiales *UU* se presentan en la Figura 4.

La cohesión no varía para un suelo sin fibra y uno con 0.1% de fibra; para porcentajes mayores de 0.1% la cohesión aumenta hasta un valor de 47.5% mayor al suelo sin fibra, correspondiente a un contenido de fibra de 0.7%.

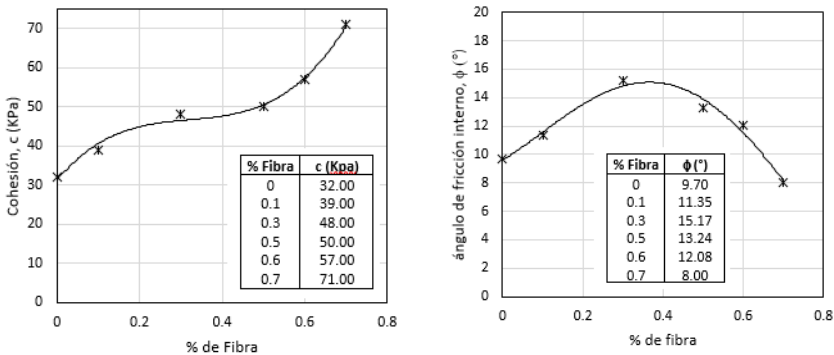


Figura 4. De izquierda a derecha: Variación de la cohesión respecto al contenido de fibra del suelo. Variación del ángulo de fricción interno con el porcentaje de fibra.

Con respecto al ángulo de fricción interno se advierte un aumento de este con respecto al contenido de fibra hasta 0.5% de fibra, después de este porcentaje se observa un descenso del valor del ángulo de fricción. El valor máximo del ángulo de fricción rebasa 50% el ángulo de fricción calculado para un suelo sin fibra.

En la Figura 5 se muestran los módulos de Young para diferentes porcentajes de fibra y diferentes presiones de confinamiento, en esta figura se observa aumento del módulo de Young para todas las probetas ensayadas con fibra respecto al suelo sin adición de fibra, debido al incremento de la capacidad de deformación.

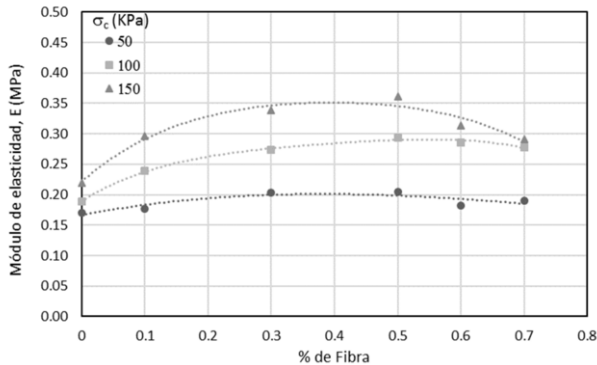


Figura 5. Módulos de Young para diferentes porcentajes de fibra y diferentes presiones de confinamiento.

6. Conclusiones

El límite líquido aumenta respecto al contenido de fibra debido a la capacidad de absorción de las fibras.

El peso volumétrico seco máximo, así como el contenido de agua óptimo se incrementan conforme se incrementa el contenido de fibra del suelo.

De acuerdo con las pruebas triaxiales estáticas UU, se observa que la resistencia a la compresión aumenta respecto al contenido de fibra. Este aumento se vuelve más notable al ir aumentando la deformación unitaria, con esto podemos deducir que el contenido de fibra óptimo dependerá de la deformación máxima seleccionada.

El efecto que tiene la fibra de aumentar la resistencia a la compresión del suelo disminuye conforme aumenta la presión de confinamiento

Las fallas observadas en las probetas de suelo adicionado con fibra fueron plásticas, además se puede ver un ligero agrietamiento en las muestras ensayadas con fibra debido a que la presencia de fibra puede inducir planos de discontinuidad cuando su porcentaje llega a ser significativo.

La cohesión no varía para un suelo sin fibra y uno con 0.1% de fibra; para porcentajes mayores de 0.1% la cohesión aumenta hasta un valor de 47.5% mayor al suelo sin fibra, correspondiente a un contenido de fibra de 0.7%.

Con respecto al ángulo de fricción interno se advierte un aumento de este con respecto al contenido de fibra hasta 0.5% de fibra, después de este porcentaje se observa un descenso del valor del ángulo de fricción. El valor máximo del ángulo de fricción rebasa 50% el ángulo de fricción calculado para un suelo sin fibra.

El módulo de Young aumenta respecto al contenido de fibra debido al incremento de la capacidad de deformación del suelo.

Referencias

- [1] Gray, D. H., Al-Refeai, T. O. (1986), "Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 112, No. 8, pp. 804-820.
- [2] Consoli N. C., Prietto D. M. P., Ulbrich A. L. (1998), "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 24, No. 12, pp. 1211-1214.

- [3] Ibraim E., Diambra A., Muir Wood D., Russell A. R. (2010), "Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading". *Getoextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp. 374-385.
- [4] Michalowski R. L., Cermak J. (2003), "Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol. 129, No. 2, pp. 125-136.
- [5] Vettorelo, P. et al., (2014) "Suelos reforzados con Fibras: Estado del arte y aplicaciones", *Revista de la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*, Vol. 1 No. 1, pp. 27-34, Córdoba, Argentina
- [6] Setty S y Rao G. (1987) "Characteristics of fiber reinforced lateritic soil", IGC (87), Bangalore, India.
- [7] Setty S y Murthy A. (1987) "Behavior of fiber-reinforced Black Cotton soil", IGC (90), Bombay.
- [8] Puppala J y Musenda C. (2000) "Effects of fiber reinforcement on strength and volumen change behavior of expansive soils", 79th Annual meeting, Washington, USA.
- [9] Santoni L y Webster L. (2001) "Airfields and road construction using fiber stabilization of sands". *J Trans Eng ASCE*.
- [10] Tang C et al., (2006) "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil". *Geotext Geomembr*.
- [11] Viswanadham S et al., (2009) "Swelling behavior of a geofiberreinforced expansive soil". *Geotext Geomembr*.
- [12] Punthutaecha K et al., (2006) "Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers". *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*.
- [13] American Society of Testing Materials (2014) "ASTM D854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer". USA
- [14] Mendoza y Orozco (1991) "Técnicas alternativas para la determinación del límite líquido de suelos" Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- [15] American Society of Testing Materials (2014) "ASTM D 4318 Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". USA.
- [16] American Society of Testing Materials (2007). "ASTM D2850 - 03a Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils". USA.