

Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones

Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá

Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 26/12/2013

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/02/2014

Fecha de publicación: 28/03/2014

Resumen—En las últimas décadas, el hombre ha desarrollado numerosos métodos a los fines de mejorar el comportamiento tenso deformacional de los suelos. Si bien el mejoramiento de suelos mediante la incorporación de fibras es una práctica antigua (un ejemplo de ello es el adobe), su estudio ha adquirido interés recién en los últimos 20 años. En este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Se analizan los tipos y contenidos usuales de fibras empleados tanto en suelos granulares como cohesivos. Asimismo se describen algunos modelos predictivos desarrollados en la literatura. Se discuten los diferentes enfoques existentes en la bibliografía para abordar el tema. Se concluye que la incorporación de fibras aumenta la resistencia al corte principalmente a grandes deformaciones y le brinda mayor ductilidad tanto a suelos granulares como cohesivos. Por último, se describen algunas aplicaciones potenciales y proyectos existentes donde se ha empleado esta técnica de mejoramiento de suelos.

Palabras clave: suelos mejorados – fibras – resistencia al corte – módulo de deformación.

Abstract—In the last decades, the man has developed several methods in order to improve the strength – strain behavior of soils. Although the reinforcement of soils by the addition of fibers is an old technique (e.g. the adobe), just in the last 20 years its study has caught the researchers interest. This study presents a state of the art review about fiber reinforced soils. Type of fibers, usual contents and the behavior observed in both granular and cohesive soils is considered. Also, predictive models of fiber reinforced soils are presented. The different criteria found in literature to analyze the behavior of fiber reinforced soil are discussed. It is concluded that fiber addition increases ductility and shear strength for large strains in cohesive and granular soils. Finally, some potential applications and existing projects where fiber reinforced soil has been used are presented.

Keywords— improved soils – fibers – shear strength – deformational modulus

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el hombre ha desarrollado numerosos métodos para el mejoramiento de suelos que implican la adición de materiales de refuerzo. El refuerzo de suelos tiene como principal propósito incrementar la estabilidad, aumentar la capacidad de carga y reducir los asentamientos del suelo reforzado.

Si bien el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras es una técnica antigua (un ejemplo de ello es el adobe), su estudio ha adquirido interés recién en los últimos 20 años.

Diversos investigadores han estudiado en los últimos años el comportamiento de suelos reforzados mediante la adición de fibras. En general, los diferentes estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al introducir fibras a la matriz de suelo. Sin embargo, no existe

acuerdo respecto al efecto que la adición de fibras produce en la rigidez del suelo reforzado. Las diferencias en las conclusiones a las que arriban las diferentes investigaciones pueden ser explicadas por las numerosas variables involucradas en el estudio del suelo reforzado con fibras, y por los diferentes enfoques con que los estudios han sido conducidos.

En este artículo, se presenta una revisión y análisis de la bibliografía existente sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Se intenta vislumbrar el mecanismo de interacción entre las fibras y el suelo, y cómo éste modifica los parámetros de resistencia al corte y rigidez del suelo reforzado. A su vez, se presentan aplicaciones potenciales y proyectos en donde se ha utilizado esta novedosa y prometedora técnica.

VARIABLES INVOLUCRADAS

Numerosas variables intervienen en el comportamiento del suelo reforzado. Entre las principales se pueden citar (Gray y Ohashi, 1983; Consoli et al., 2003; Michalowski y

Dirección de contacto:

Juan José Clariá, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 846, jclaria@com.uncor.edu

Cermak, 2003; Ibraim y Fourmont, 2006; Jadhao y Nagarnaik, 2008):

- Características de la fibra: tipo de fibra, longitud, forma, relación de aspecto (longitud – diámetro), rugosidad.
- Características del suelo: distribución granulométrica; tamaño, forma y rugosidad de partículas; contenido de humedad; entre otros.
- Contenido de fibras.
- Orientación de las fibras.
- Relación de vacíos del suelo reforzado.
- Método de compactación del suelo reforzado.

TIPOS DE FIBRAS

Fibras sintéticas

Son muchas las posibilidades a la hora de seleccionar el tipo de fibra a incluir en el suelo reforzado. En general, se buscan materiales sintéticos caracterizados por una alta resistencia mecánica y alta durabilidad.

Las fibras más frecuentemente utilizadas son las de polipropileno (Consoli et al., 1998; Ibraim y Fourmont, 2006; Zhang et al., 2006; Tang et al., 2007; Jadhao y Nagarnaik, 2008). También se utilizan fibras de monofilamento de poliamida (Michalowski y Cermak, 2003) y alcohol de polivinilo (Park, 2009). En la Fig. 1 se muestran fibras de polipropileno usadas en el estudio realizado por Tang et al. (2007).



Fig. 1: Fibras de polipropileno (Tang et al., 2007).

Existen además numerosos estudios que emplean otros materiales sintéticos provenientes de la reutilización de desechos, tales como fibras de polietileno tereftalato PET (Consoli et al., 2002), polietileno de alta densidad (Sobhan y Mashnad, 2002) y fibras de gomas de neumático (Hataf y Rahimi, 2006; Akbulut et al., 2007).

Con respecto a los contenidos de fibras usuales en el suelo, las publicaciones existentes utilizan un porcentaje que varía entre el 0.25% y el 3% respecto al peso de suelo seco. Más allá de este límite, el aumento en la resistencia del suelo debido al refuerzo de fibras es prácticamente nulo.

Por otro lado, también surge la dificultad para lograr una muestra de suelo con fibras distribuidas homogéneamente.

Por último, las longitudes de fibra más comunes se encuentran entre los 10 mm y los 60 mm. Este valor se encuentra directamente relacionado al tamaño de los granos del suelo en cuestión.

Fibras Naturales

Existen publicaciones en las que se ha propuesto el empleo de fibras de origen orgánico. El refuerzo de suelos mediante fibras naturales constituye una técnica de mejoramiento de suelos ecológicamente amigable y de muy bajo costo. El uso de estas fibras parece ser prometedor en países subdesarrollados donde las fibras naturales son obtenidas a partir de los restos de frutas y plantas usadas en la industria alimenticia.

A modo de ejemplo se pueden citar los trabajos de Prabakar y Sridharb (2002) donde se emplearon fibras de sisal, Sivakumar Babu y Vasudevan (2008) quienes emplearon fibras de coco, Marandi et al. (2008) que utilizaron fibras de palmera (ver Fig. 2), y Khattak y Alrashidi (2006) donde se emplearon fibras de celulosa procesada.



Fig. 2: Fibras de palmera (Marandi et al., 2008).

Sin embargo, este tipo de fibras se caracterizan por una baja resistencia química y a la corrosión, lo que sumado a la biodegradación, limitan su uso a estructuras provisionarias y de bajo riesgo frente a una eventual falla por degradación. Para atenuar esta limitación, algunos investigadores proponen el uso de fibras naturales recubiertas con materiales sintéticos.

Ahmad et al. (2010) utilizaron fibras naturales provenientes de la cáscara de frutas de palma recubiertas con termoplástico ABS. Se concluyó que las fibras naturales recubiertas contribuyen a incrementar la resistencia al corte del suelo reforzado de manera más significativa que las fibras sin recubrir.

Las longitudes y los contenidos de fibras naturales para el mejoramiento de suelos resultan similares a los usados en el caso de fibras sintéticas.

COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL

Suelos granulares

Los estudios existentes en la literatura del tema coinciden que en suelos arenosos, tanto la resistencia al corte pico como la resistencia residual, aumentan con el contenido de fibras en el suelo. Sin embargo, este aumento tiende a un límite asintótico al llegar a un determinado contenido de fibras (Gray y Al-Refeai, 1986; Consoli et al., 1998; Ibraim y Fourmont, 2006).

Para un contenido de fibras constante, Jadhao y Nagarnaik (2008), observaron que al aumentar la longitud de la fibra se reduce la contribución de la misma a la resistencia de pico, al tiempo que aumenta la capacidad de absorber deformaciones del material reforzado. Por su parte, Michalowski y Cermak (2003) concluyeron que el refuerzo de la fibra es más efectivo cuando la longitud de la misma es grande comparado con el tamaño de las partículas de suelo, y cuanto mayor es la relación longitud-diámetro de la fibra.

Para el caso de arenas reforzadas con fibras de polipropileno, Consoli et al. (2007) observaron que la envolvente de falla presenta un punto de quiebre bien definido, motivo por el cual, propusieron el empleo de una ecuación bilineal para aproximar la resistencia al corte en el espacio $\tau - \sigma$. Así, para tensiones bajas, el aumento principal se da en el ángulo de fricción interno, mientras que en las zonas de mayor tensión, se produce un mayor aumento de la cohesión.

Por otro lado, se ha observado que la deformación específica necesaria para que el suelo reforzado desarrolle toda su resistencia aumenta con el contenido de fibras del suelo. De esta forma el suelo reforzado con fibras presenta un comportamiento más dúctil que el mismo suelo sin reforzar (Ibraim y Fourmont, 2006).

Diversos autores han reportado que en ensayos triaxiales realizados sobre arenas sueltas reforzadas con fibras sintéticas, la curva de variación de la tensión desviadora con la deformación específica parece aumentar de manera lineal para grandes deformaciones sin que pueda apreciarse una tensión desviadora máxima, incluso para niveles de deformación superiores a 20%, tal como se aprecia en la Fig. 3 (Consoli et al., 2003; Diambra et al., 2010). Debido a esto, se ha propuesto definir los parámetros de resistencia al corte (ϕ y c) en función de una máxima deformación permitida. Un estudio experimental desarrollado por los autores en una arena aluvial reforzada con fibras de polipropileno, demostró que al reducir la deformación máxima seleccionada para definir la falla, el incremento en la resistencia al corte se reduce, e incluso se traduce en una desmejora para contenidos de fibra superiores al 2% en peso (Clariá y Vettorelo, 2010).

Respecto al efecto que la inclusión de fibras ejerce en el módulo de deformación de suelos granulares, existe poco acuerdo entre las investigaciones actuales. Diambra et al. (2010) realizaron ensayos de extensión y compresión triaxial sobre una arena reforzada con fibras de polipropileno. Estos autores concluyeron que la rigidez inicial del suelo reforzado no se ve modificada al incorporar

fibras, sino que las mismas comienzan a actuar a partir de grandes deformaciones.

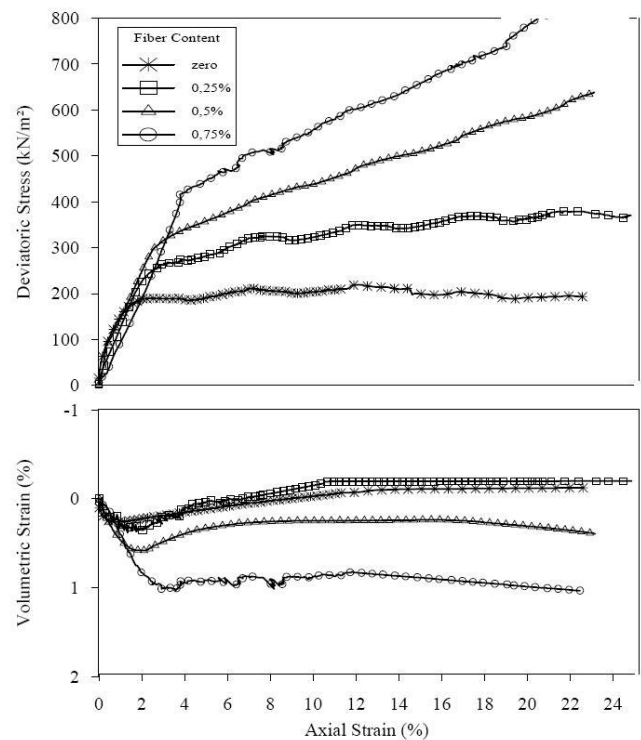


Fig. 3: Curvas tensión desviadora y deformación volumétrica versus deformación axial en ensayos triaxiales drenados sobre una arena reforzada con fibras en contenidos de 0.00; 0.25; 0.50 y 0.75% respecto al peso de suelo seco (Consoli et al., 2003).

Sin embargo, otros estudios sugieren que al aumentar el porcentaje de fibras por encima del 0,5% en peso se produce una caída en la rigidez inicial. Si bien la resistencia al corte aumenta con la incorporación de fibras, esto ocurre a expensas de una mayor deformación (Michalowski y Cermak, 2003). Asimismo, Consoli et al. (1998), observaron una caída en el módulo secante, correspondiente a un nivel de deformación de 10^{-2} , al incorporar fibras a suelos reforzados con cemento Portland.

Suelos cohesivos

Son escasos los estudios realizados sobre suelos arcillosos reforzados con fibras. Entre ellos vale mencionar la investigación desarrollada por Akbulut et al. (2007). Estos autores estudiaron el efecto que fibras sintéticas de polipropileno y polietileno tienen en el comportamiento de un suelo arcilloso. Se observó un claro aumento en los parámetros de resistencia al corte (c y ϕ), siendo más notorio este incremento en el suelo reforzado con fibras de polipropileno.

Por su parte, Gregory (2006) observó que, al igual que con suelos granulares, el incremento en la resistencia al corte del suelo reforzado tiende a un límite asintótico al aumentar el contenido de fibras.

Estudios realizados por Kumar et al. (2006) sobre suelos arcillosos reforzados con fibras de poliéster mostraron que la resistencia a la compresión confinada (compresión simple) aumenta con el contenido de fibras, y para un contenido de fibras constante, con la longitud de fibras.

Respecto al efecto que produce el refuerzo de fibras en el módulo de deformación, aparecen resultados contradictorios en la literatura del tema al igual que con suelos granulares. Pueden citarse los trabajos de Li y Ding (2002), quienes observaron que el módulo elástico del suelo reforzado aumenta con el contenido de fibras, y Tang et al. (2007) quienes reportaron que la adición de fibras produce una caída en la rigidez inicial de suelos reforzados con cemento.

Suelos reforzados con cemento y fibras

Consoli et al. (1998), experimentaron con suelos reforzados tanto con fibras como mediante la adición de cemento Portland. Estos autores concluyeron que la adición de fibras cambia el comportamiento frágil del suelo – cemento, a uno más dúctil.

En un trabajo más reciente, Consoli et al. (2009b), observaron que mediante la adición de pequeñas cantidades de cemento, se logran incrementos significativos en la resistencia al corte pico del suelo reforzado con fibras; mientras que la adición de grandes cantidades de cemento se traduce en incrementos en la resistencia al corte residual.

Por otro lado, Tang et al. (2010) concluyeron que la inclusión de cemento aumenta notoriamente la resistencia en la interfaz suelo – fibra. Al incorporar cemento a un suelo reforzado con fibras, los productos de la hidratación del mismo se adhieren a la superficie de la fibra, aumentando su rugosidad y cementando la zona inmediata a la misma. De esta manera, las fibras son capaces de desarrollar tensiones de tracción mayores sin deslizar, y por lo tanto el aumento de la resistencia es mayor que en el caso del suelo reforzado sólo con fibras.

Por último, se han reportado incrementos en el módulo de deformación (puntualmente en el módulo de resiliencia) de un suelo – cemento con el contenido de fibras (Khattak y Alrashidi, 2006).

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO – FIBRA

Estudios existentes a nivel microescala

Algunos autores comparan el efecto de las fibras con el de las raíces de plantas, que permiten distribuir esfuerzos en una superficie mayor de suelo. Mediante ensayos de plato de carga realizados sobre una arena con y sin refuerzo de fibras, Consoli et al. (2009a) observaron que el refuerzo de fibras se traduce en una mejora en la relación carga – asentamiento. Además se reportó que la arena no reforzada desarrolla la falla por punzonado, mientras que la arena reforzada con fibras distribuye los esfuerzos en un área mayor, mostrando un cono de depresión en la periferia del plato de carga.

Dentro de la matriz de suelo, las fibras se encuentran sometidas a dos esfuerzos principales: un esfuerzo de tracción, debido al movimiento relativo entre partículas; y el aplastamiento de los granos de suelo sobre la fibra (Consoli et al., 2005). La fibra comienza a actuar una vez que los granos de suelo se han acomodado lo suficiente como para producir el anclaje de la fibra. A medida que el suelo se deforma, mayor es la contribución de las fibras a la

resistencia del suelo. Este mecanismo de interacción se presenta principalmente en suelos granulares.

A pesar de que muchos investigadores coinciden en el mecanismo de interacción nombrado, no existen en el conocimiento de los autores estudios que hayan realizado ensayos a nivel microescala para confirmar esta teoría y poder explicar con mayor detalle el mecanismo de interacción entre la fibra y los granos de suelo.

En suelos cohesivos, se conoce poco sobre la interacción entre las fibras y las partículas de suelo. Se destaca la investigación realizada por Tang et al. (2007), quienes mediante microscopio electrónico observaron que en la superficie de la fibra se adhieren minerales arcillosos, lo que contribuye a aumentar la resistencia y la fricción entre la fibra y la matriz de suelo.

Modelos predictivos

Uno de los primeros modelos predictivos sobre suelos reforzados con fibras fue el propuesto por Gray y Ohashi (1983). Los autores propusieron un modelo mecánico basado en los resultados de una serie de ensayos de corte directo realizados en arenas reforzadas con fibras ubicadas con orientaciones preestablecidas. Se asume que a lo largo del plano de corte se produce la distorsión de las fibras, movilizándose su resistencia a la tracción (Fig. 4). En el modelo se determina la tensión de corte inducida en la fibra debido a la deformación a través del plano de falla. Esta tensión es una función del módulo elástico de la fibra, el coeficiente de fricción entre fibra y suelo, el diámetro de la fibra y el espesor de la zona de corte.

$$T = \left(\frac{4 \cdot E_f \cdot \tau \cdot z}{d_f} \right) \cdot (\sec \phi - 1)^{1/2} \quad (1)$$

La ec. (1) permite calcular la tensión T actuante en una fibra, siendo τ la resistencia friccional en la interfase suelo - fibra; E_f el módulo de elasticidad de la fibra; d_f el diámetro de la fibra; ϕ el ángulo de fricción del suelo; y z el espesor de la zona de corte.

La tensión de tracción movilizadora por todas las fibras está dada por:

$$t = \left(\frac{A_f}{A} \right) \cdot T \quad (2)$$

Donde A_f es la sección de las fibras que atraviesan el plano de falla, y A es el área del plano de falla.

La contribución a la resistencia al corte (ΔS) se calcula a partir de plantear equilibrio de fuerzas, llegando a la siguiente expresión para fibras con orientación perpendicular al plano de falla:

$$\Delta S = t \cdot (\sen \theta + \cos \theta \cdot \tan \phi) \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo de distorsión de corte (ver Fig. 4a).

Esta ecuación puede generalizarse para fibras orientadas en otro ángulo respecto al plano de falla:

$$\Delta S = t \cdot (\sen(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \cdot \tan \phi) \quad (4)$$

Siendo ψ el ángulo de las fibras deformadas respecto al plano de falla (ver Fig. 4b). Este ángulo se obtiene a partir del ángulo de orientación inicial de las fibras (i), y del desplazamiento por corte (x).

La contribución al corte debido a las fibras ΔS es luego sumada a la resistencia al corte del suelo sin reforzar. El modelo considera que las fibras se encuentran completamente empotradas en el suelo fuera de la zona de corte y que no se producirá deslizamiento de las mismas.

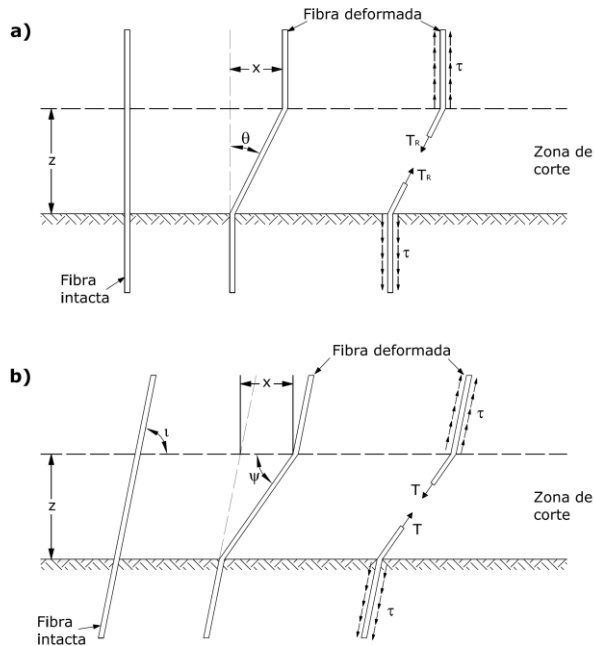


Fig. 4: Fibra cruzando la zona de corte (Gray y Ohashi, 1983); a) fibra perpendicular al plano de falla; b) fibra oblicua respecto al plano de falla.

Una de las limitaciones de este modelo es que se requiere definir un cierto ángulo de orientación de las fibras respecto al plano de falla. Además se necesita como parámetro de entrada el espesor de la zona de corte, lo cual es difícil de cuantificar.

El modelo propuesto por Gray y Ohashi (1983) fue ampliado por Maher y Gray (1990) quienes lograron considerar a las fibras distribuidas con orientaciones aleatorias a través del plano de falla. Esta ampliación al modelo se logró introduciendo conceptos estadísticos en el análisis. Sin embargo, el modelo propuesto por Maher y Gray (1990) sigue requiriendo como parámetro de entrada el espesor de la zona de corte.

Por su parte, Zornberg (2002) propone un modelo de suelos reforzados con fibras que requiere como parámetros de entrada las propiedades del suelo y las fibras de manera separada. De esta forma, el comportamiento del suelo reforzado puede describirse sin la necesidad de realizar ensayos mecánicos en el mismo.

Zornberg (2002) considera que las fibras actúan bajo tracción a lo largo de la superficie de falla, y que son posibles dos mecanismos de falla de las mismas: rotura y arrancamiento. Se calcula la fuerza friccional de una fibra mediante la siguiente ecuación:

$$f_f = a + \tan \delta \cdot \sigma_{n,ave} \quad (5)$$

Donde a es la componente de adhesión, $\tan \delta$ es la componente friccional, y $\sigma_{n,ave}$ es la tensión normal promedio actuando en las fibras. Se definen dos coeficientes de interacción como la relación entre las

componentes de adhesión y de fricción en la interfase y en el suelo:

$$c_{i,c} = \frac{a}{c} \quad (6)$$

$$c_{i,\phi} = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (7)$$

Donde c y ϕ son la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo sin reforzar respectivamente. Combinando las ec. (5), (6) y (7), la fuerza friccional en una fibra queda definida según la siguiente expresión:

$$f_f = c_{i,c} \cdot c + c_{i,\phi} \cdot \tan \phi \cdot \sigma_{n,ave} \quad (8)$$

Si la falla está controlada por el arrancamiento de la fibra, la fuerza última de tracción (UTF_p) soportada por las fibras en una sección de control (A) está dada por la ec. (9).

$$UTF_p = t_p \cdot A \quad (9)$$

Siendo t_p la tensión distribuida inducida por las fibras para una falla controlada por el arrancamiento:

$$t_p = \alpha \cdot \chi \cdot \eta \cdot f_f \quad (10)$$

Donde α es un coeficiente empírico que tiene en cuenta la orientación de las fibras, siendo igual a uno para el caso de fibras orientadas de manera aleatoria; χ es el contenido volumétrico de fibras, y η es la relación longitud-diámetro de la fibra.

En el caso de que la falla esté gobernada por la rotura de las fibras, la fuerza última de tracción (UTF_t) está dada por:

$$UTF_t = t_t \cdot A \quad (11)$$

Siendo t_t la tensión distribuida de las fibras para una falla controlada por la rotura:

$$t_t = \alpha \cdot \chi \cdot \sigma_{f,ult} \quad (12)$$

Donde $\sigma_{f,ult}$ es la tensión de rotura de una fibra individual.

Por último el modelo calcula la contribución a la resistencia al corte debido a la fuerza última de tracción desarrollada por las fibras. Esta fuerza depende de la presión normal que actúa sobre las fibras, la que es considerada de manera simplificada igual a la presión normal al plano de falla. La tensión de corte equivalente (S_{eq}) es definida como la resistencia al corte del suelo sin reforzar (S) más la tensión distribuida aportada por las fibras (t):

$$S_{eq} = S + t \quad (13)$$

La tensión distribuida aportada por las fibras resultará el mínimo valor del obtenido por las ec. (10) y (12).

Como resultado se obtiene una envolvente de falla bilineal, que se corresponde a los dos modos de falla de las fibras: deslizamiento de las fibras para presiones de confinamiento bajas, y rotura de las fibras para altas presiones de confinamiento, según se observa en la Fig. 5.

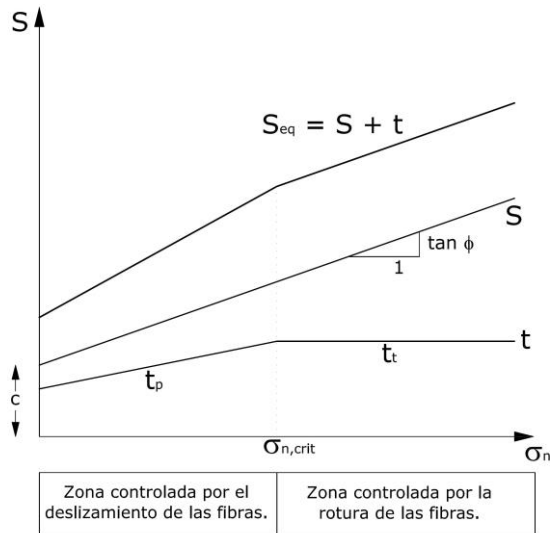


Fig. 5: Representación de la resistencia al corte equivalente, obtenida mediante el modelo propuesto por Zornberg (2002).

Este modelo presenta una aproximación sencilla del comportamiento del suelo reforzado con fibras, que se ajusta razonablemente bien para suelos granulares reforzados con fibras de polipropileno. Una de las principales limitaciones que presenta el modelo, es que se obtiene la resistencia última del suelo reforzado sin considerar el nivel de deformaciones necesario para alcanzar este estado de falla.

DIFERENTES INTERPRETACIONES DEL SUELO REFORZADO CON FIBRAS

El estudio del comportamiento del suelo reforzado con fibras puede realizarse en base a dos enfoques diferentes.

El primer enfoque consiste en considerar al suelo reforzado como la suma de dos materiales diferenciados (suelo y fibras). Las fibras son inclusiones que ocupan los espacios vacíos del suelo, sin modificar su estructura original. Bajo esta interpretación, el volumen de fibras a adicionar se encuentra limitado por el volumen de vacíos del suelo. Uno de los objetivos de este enfoque es poder cuantificar de manera directa el efecto de la inclusión de fibras al mantener constantes las propiedades del suelo original, es decir, este enfoque permite comparar el comportamiento de dos suelos con idéntica matriz de suelo (relación de vacíos, peso unitario y estructura) pero con diferentes contenidos de fibras. Sin embargo, la inclusión de fibras en los vacíos del suelo produce un efecto de densificación aparente en el suelo reforzado que complica el análisis. Entre los autores que basan su estudio en esta metodología puede citarse a Ibrahim y Fourmont (2006) y Diambra et al. (2010).

El segundo enfoque se basa en interpretar al suelo reforzado como un material compuesto. Suelo y fibras conforman la fase sólida de un nuevo material, mientras que los vacíos sólo son ocupados por aire o agua. Bajo esta perspectiva, las variables de control no están relacionadas a las propiedades del suelo original, sino a parámetros atribuibles tanto al suelo reforzado como al suelo sin reforzar, como ser la relación de vacíos, la densidad relativa y la energía de compactación para la preparación de las

muestras, entre otros. Bajo este enfoque es posible comparar el comportamiento de mezclas de suelos con fibras con idéntica relación de vacíos, pero con diferentes contenidos de fibras, lo que se traduce en diferentes arreglos entre partículas. Algunos de los autores que basan su trabajo en esta perspectiva de análisis son Michalowski y Cermak (2003) y Consoli et al. (2007).

Ibrahim y Fourmont (2006) observaron que la presencia de fibras provee una resistencia extra a la compactación, causando un empaquetamiento menos denso a medida que aumenta el contenido de fibras. Por lo tanto, si se usa la energía de compactación como variable de control, lo que significa comparar el comportamiento de suelos con diferentes contenidos de fibras pero logrados con la misma energía de compactación, se obtendría una menor compactación del suelo reforzado respecto al suelo sin reforzar. Luego, los resultados de los estudios que se basan en este enfoque difieren en gran manera con los resultados que se obtendrían utilizando el primer enfoque, ya que las relaciones de vacíos en las muestras de suelo reforzado son diferentes. La gran cantidad de variables y la dificultad de controlarlas explica la gran disparidad de resultados presentes en la literatura del tema.

Por esta razón, resulta de suma importancia definir la metodología de análisis y las variables de control empleadas en el estudio de suelos reforzados con fibras, para poder interpretar los resultados de manera adecuada.

APLICACIONES

Son numerosas las potenciales aplicaciones de suelos reforzados con fibras: estabilización de taludes, construcción de terraplenes, refuerzos de bases de pavimentos y mejoramiento de suelos potencialmente licuables, entre otros.

El mejoramiento de suelos mediante la adición de fibras tiene las siguientes ventajas (Li, 2005):

- El refuerzo de fibras puede realizarse mediante el uso de equipos convencionales de construcción. La compactación del suelo reforzado con fibras puede efectuarse con los métodos tradicionales de compactación, sin riesgo de dañar el refuerzo.
- A diferencia de otros métodos de refuerzo y/o estabilización, como la adición de cemento o cal, la incorporación de fibras no se encuentra afectada por las condiciones climáticas.
- Los materiales que pueden ser usados para las fibras son de muy bajo costo, haciendo a este tipo de refuerzo altamente competitivo.

Los suelos reforzados con fibras han probado ser eficientes en la reparación de fallas en taludes existentes como así también para la construcción de nuevos taludes (Gregory, 2006). A diferencia de los geosintéticos, las fibras no requieren de una zona extendida de anclaje para poder desarrollar toda su resistencia, minimizando de esta manera la necesidad de excavaciones.

En su tesis doctoral, Gregory (2006) estudia el comportamiento de suelos reforzados con fibras en dos proyectos llevados a cabo en los Estados Unidos. Uno de ellos, fue la construcción de la autopista "President George Bush Turnpike" en Dallas, Texas. El proyecto consistió en

la construcción de un tramo de autopista de 6 carriles a través de una extensa área de suelos residuales. El terraplén de la autopista fue construido con el suelo del lugar, con taludes 4:1. A los fines de prevenir fallas superficiales en el terraplén, se reforzó la parte superior de los taludes con fibras tal como se ilustra en la Fig. 6. El segundo proyecto consistió en la reparación de 2000 m lineales de un terraplén a lo largo del lago Joe Pool en la ciudad de Grand Prairie, Texas. El terraplén había sido construido en la década del 80 por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, y estaba conformado por arcillas expansivas. Para el año 2003, las fallas en los taludes del terraplén eran importantes y comenzaron a dañar parte del pavimento. Se adoptó para la reparación del mismo el uso de suelos reforzados con fibras. Para ambos proyectos se utilizaron fibras de polipropileno con un tratamiento de carbono para limitar el daño por los rayos UV de la luz solar.



Fig. 6: Construcción del terraplén reforzado con fibras de polipropileno en el proyecto "President George Bush Turnpike" (Gregory, 2006)

Por otro lado, en la construcción de pavimentos, el refuerzo con fibras podría usarse a los fines de estabilizar una gran variedad de suelos de base o subbase, desde arenas hasta arcillas altamente plásticas (Li, 2005). Diversos investigadores han reportado que el número de ciclos para alcanzar la falla en pruebas de campo sobre pavimentos aumenta al adicionar fibras en la capa de base del mismo (Grogan and Johnson, 1993; Santoni, et al., 2001).

Por último, Ibraim et al. (2010) reportó que la inclusión de fibras en arenas sueltas reduce el potencial de licuación. Por lo tanto, esta técnica de mejoramiento podría resultar útil para estratos de fundación susceptibles a sufrir licuación.

CONCLUSIONES

Se presentó una revisión y análisis de la bibliografía existente sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Las principales conclusiones arribadas en el trabajo son:

- El estudio de suelos reforzados con fibras implica el manejo de una gran cantidad de variables, lo que dificulta la interpretación de resultados.

- La adición de fibras tanto en suelos granulares como cohesivos aumenta la resistencia al corte a grandes niveles de deformación.

- En suelos granulares con baja compacidad reforzados con fibras, diversos investigadores han reportado que las curvas de tensión - deformación no alcanzan un límite asintótico de resistencia como en los modelos hiperbólicos clásicos, sino que la resistencia crece indefinidamente aún para niveles de deformación superiores al 20 %.

Por este motivo, la resistencia debe ser definida para una deformación específica máxima tolerable. Bajo este criterio de falla, la inclusión de fibras puede traducirse incluso en una desmejora de la resistencia al corte respecto al suelo sin reforzar cuando la falla se define para niveles de deformación bajos.

- No existe acuerdo en la bibliografía sobre el efecto que la inclusión de fibras tiene en la rigidez del suelo reforzado. Esta disparidad de conclusiones es consecuencia de los diferentes enfoques con que se abordan las investigaciones sobre suelos reforzados con fibras.

- La inclusión de fibras en el suelo produce una disminución de la densidad debido a que las fibras son más livianas y a que proveen mayor resistencia a los métodos de compactación usuales.

- Las fibras son sometidas a tensiones de tracción debido al movimiento relativo de los granos de suelo. Por lo tanto el refuerzo de fibras contribuye a la resistencia al corte del suelo a partir de un cierto nivel de deformación.

- Los modelos predictivos existentes plantean dos mecanismos de falla de las fibras que atraviesan el plano de rotura: deslizamiento para bajas presiones de confinamiento, y fluencia para altas presiones de confinamiento. Esto se traduce en una envolvente de falla bilineal del suelo reforzado.

- Se encuentran en la bibliografía diferentes enfoques o interpretaciones del suelo reforzado con fibras, que conducen a bases de comparación distintas. Esto se traduce en heterogeneidad en los resultados obtenidos por los distintos estudios.

- Son muchas las potenciales aplicaciones del suelo reforzado con fibras. Sin embargo se requiere de estudios de campo más profundos y mayor experiencia basada en el uso de la técnica para cuantificar con mayor confianza el efecto de las fibras en el comportamiento del suelo reforzado.

REFERENCIAS

- [1] Ahmad F., Bateni F., Azmi M. (2010), "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp. 93-99.
- [2] Akbulut S., Arasan S., Kalkan E. (2007), "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers". *Applied Clay Science*. Vol. 38, pp. 23-32.
- [3] Clariá J. J., Vettorelo P. (2010), "Refuerzo de arenas mediante la adición de fibras sintéticas". *Memorias del XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Mendoza, Argentina. ISBN: 978-950-42-0129-8.
- [4] 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.

- [5] Consoli N. C., Montardo P. J., Prietto P. D. M., Pasa G. S. (2002), "Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. Vol. 128, No. 6, pp. 462-472.
- [6] Consoli N. C., Heineck S. K., Casagrande M. D. T. (2003), "Large Strain Behavior of Polypropylene Fiber- Reinforced Sandy Soil". *Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.
- [7] Consoli N. C., Casagrande M. D. T., Coop M. R. (2005), "Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 11, pp 1434-1436.
- [8] Consoli N. C., Heineck S. K., Casagrande M. D. T., Coop M. R., Phil D. (2007), "Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. Vol. 133, No. 11, pp. 1466-1469.
- [9] Consoli N. C., Casagrande M. D. T., Thome A., Rosa D. F., Fahey M. (2009a), "Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand". *Geotechnique*, Vol. 59, No 5, pp. 471-476.
- [10] Consoli N. C., Vendruscolo M. A., Fonini A., Dalla Rosa F. (2009b), "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 27, pp. 196-203.
- [11] Diambra A., Ibraim E., Muir Wood D., Russell A.R. (2010), "Fibre reinforced sands: Experiments and modeling". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp. 238-250.
- [12] 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.
- [13] Gray D. H., Ohashi H. (1983), "Mechanics of fiber-reinforcement in sand." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.
- [14] Gregory G. H. (2006), "Shear Strength, Creep and Stability of Fiber-Reinforced Soil Slopes". *Tesis doctoral, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, Estados Unidos*.
- [15] Grogan, W. P., Johnson, W. G. (1993), "Stabilization of high plasticity clay and silty sand by inclusion of discrete fibrillated polypropylene fibers (Geofibers®) for use in pavement subgrades." *US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, CPAR-GL-93-3*.
- [16] Hataf N., Rahimi M.M. (2006), "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds". *Construction and Building Materials*. Vol. 20, pp. 910-916.
- [17] Ibraim E., Fourmont S. (2006), "Behavior of Sand Reinforced With Fibres". *Proceedings of the Geotechnical Symposium: Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*. Roma, Italia.
- [18] Ibraim E., Diambra A., Muir Wood D., Russell A. R. (2010), "Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp. 374-385.
- [19] Jadhao D. P., Nagarnaik P. B. (2008), "Influence of Polypropylene Fibers on Engineering Behavior of Soil-Fly Ash Mixtures for Road Construction". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 13.
- [20] Khattak M. J., Alrashidi M. (2006), "Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures". *The International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 7, No. 1, pp 53-62.
- [21] Kumar A., Walia B. S., Mohan J. (2006), "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay". *Construction and Building Materials*. Vol. 20, pp. 1063-1068.
- [22] Li C. (2005), "Mechanical Response of Fiber-Reinforced Soil". *Tesis doctoral, Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, Estados Unidos*.
- [23] Li J., Ding D.W. (2002), "Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 22, pp. 977-983.
- [24] Maher, M. H., Gray, D. H. (1990), "Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 11, pp. 1661-1677.
- [25] Marandi S.M., Bagheripour M. H., Rahgozar R., Zare H. (2008), "Strength and Ductility of Randomly Distributed Palm Fibers Reinforced Silty-Sand Soils". *American Journal of Applied Sciences*. Vol. 5, No. 3, pp. 209-220.
- [26] 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.
- [27] Park S. S. (2009), "Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 27, pp. 162-166.
- [28] Prabakar J., Sridharb R.S. (2002), "Effect of Random Inclusion of Sisal Fibre on Strength Behaviour of Soil". *Construction and Building Materials*, No. 16, pp. 123-131.
- [29] Santoni, R. L., Tingle, J. S., Webster, S. L. (2001), "Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 3, pp. 258-268.
- [30] Sivakumar Babu G. L., Vasudevan A. K. (2008), "Strength and Stiffness Response of Coir Fiber-Reinforced Tropical Soil". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 571-577.
- [31] Sobhan K., Mashnad M. (2002), "Tensile Strength and Toughness of Soil-Cement-Fly Ash Composite Reinforced with Recycled High-Density Polyethylene Strips". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 177-184.
- [32] Tang C., Shi B., Gao W., Chen F., Cai Y. (2007), "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 25, pp. 194-202.
- [33] Tang C., Shi B., Zhao L. Z. (2010), "Interfacial shear strength of fiber reinforced soil". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp 54-62.
- [34] Zhang M. X., Javadi A. A., Min X. (2006), "Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 24, pp. 201-209.
- [35] Zornberg, J. G. (2002) "Discrete framework for limit equilibrium analysis of fiber reinforced soil." *Géotechnique*. Vol. 52, No. 8, pp. 593-604.