

Arenas reforzadas con fibras: eficiencia del refuerzo en función de la compacidad

Fiber reinforced sands: efficiency as a function of compaction degree

Paula V. Vettorelo; Juan José Clariá

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

paulavettorelo@gmail.com

Resumen

Desde la antigüedad el hombre ha desarrollado diversas técnicas para mejorar las propiedades de los suelos y adaptarlas a sus necesidades. Entre éstas, la inclusión de diversos tipos de fibras ha captado el interés de los investigadores en las últimas décadas. En este trabajo se presenta un resumen con los principales resultados de un amplio estudio experimental llevado a cabo sobre una arena aluvial silicea reforzada con fibras de polipropileno. Se investiga el efecto que la inclusión de fibras ejerce en el comportamiento mecánico de la arena tanto en estado suelto como en estado denso. Los parámetros de resistencia al corte y de deformabilidad tanto de la arena sin reforzar como de la arena reforzada son obtenidos a partir de ensayos de laboratorio de compresión triaxial, corte directo y de medición de velocidad de ondas. Se analiza y compara la eficiencia del refuerzo con fibras para estados de compacidad suelto y denso.

Abstract

Since ancient times the man has developed several techniques in order to improve the soil properties and fit its behavior to the requirements. Between the most relevant soil improvement methods, the fiber inclusion has been widely studied in the last decades. This paper presents the main results of an experimental study carried out in laboratory aimed to characterize the mechanical behavior of a clean alluvial sand reinforced with polypropylene fibers. The behavior of the sand is analyzed for a loose and a dense state. Direct shear, drained triaxial and confined compression with shear wave velocity tests are carried out in order to measure the shear strength and stiffness of the reinforced sand. The efficiency of the fiber inclusion is analyzed for the sand in a loose and dense state.

1 INTRODUCCIÓN

Durante años el hombre ha desarrollado numerosos métodos para mejoramiento de suelos que incluyen la adición de materiales de refuerzo. Entre ellos, la adición de fibras resulta una técnica de refuerzo económica y de fácil ejecución. Por este motivo, el comportamiento de suelos reforzados mediante la adición de fibras ha adquirido interés en las últimas décadas.

Diversos investigadores se han centrado en el comportamiento de suelos granulares reforzados con fibras. Los principales estudios buscan cuantificar la mejora producida en el comportamiento tenso-deformacional del suelo reforzado en relación al suelo sin reforzar. Si bien los autores de dichos estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al adicionar fibras al suelo, no existe una respuesta concluyente respecto a los cambios que se producen en la rigidez del suelo reforzado.

En este artículo, se presentan los principales resultados de un estudio experimental llevado a cabo sobre una arena aluvial silíceo reforzada con fibras de polipropileno, a los fines de determinar la eficiencia del refuerzo de fibras bajo diferentes estados de compactación de la arena.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Son numerosas las variables que intervienen en el comportamiento de los suelos reforzados con fibras, complejizando su estudio. Entre ellas se encuentran propiedades de las fibras (tipo, forma, longitud, rugosidad, entre otros); características del suelo a reforzar (distribución granulométrica, tamaño y forma de partículas, etc.), y propiedades del suelo reforzado como ser el contenido de fibras, la forma de preparación y compactación del suelo reforzado y la orientación de las fibras (Gray y Ohashi, 1983; Consoli et al., 2003; Michalowski y Cermak, 2003; Ibraim y Fourmont, 2006; Jadhao y Nagarnaik, 2008).

En general, las fibras de refuerzo son hechas de materiales sintéticos caracterizados por una alta resistencia mecánica y durabilidad. Las fibras más frecuentemente utilizadas son las de polipropileno (Consoli et al., 1998; Ibraim y Fourmont, 2006; Tang et al., 2007; Zhang et al., 2006; Jadhao y Nagarnaik, 2008). También se utilizan fibras de monofilamento de poliamida (Michalowski y Cermak, 2003), alcohol de polivinilo (Park, 2009), polietileno tereftalato PET (Consoli et al., 2002) y polietileno de alta densidad (Sobhan y Mashnad, 2002).

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 3.0% 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. Las longitudes de fibra más comunes se encuentran entre los 10 mm y los 60 mm.

Los especímenes de suelo reforzados con fibras son preparados mediante un procedimiento de mezclado del suelo y las fibras (con o sin adición de agua) y una posterior compactación de la muestra ya sea mediante apisonado o por vibración de acuerdo al tipo de suelo. Ibraim 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.

Diversos investigadores han concluido 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; Zhang et al., 2006).

Cuando un suelo reforzado es sometido a corte, las fibras en el interior de la matriz del suelo sufren dos tipos de 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 aportar resistencia al corte una vez que los granos de suelo se han reacomodado 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.

Un aspecto muy importante observado en suelos arenosos reforzados con fibras es que la envolvente de falla en el espacio $\tau - \sigma$ presenta un punto de quiebre. Por este motivo se ha propuesto el uso de una ecuación bilineal para aproximar la resistencia al corte del suelo reforzado con fibras (Consoli et al., 2007). Según Consoli et al. (2007), este punto de quiebre indica un cambio en el comportamiento de la fibra de refuerzo: para bajas presiones de confinamiento la falla se presenta por el deslizamiento de las fibras respecto a las partículas de suelo, mientras que para altas presiones de confinamiento la falla se da principalmente porque las fibras de refuerzo alcanzan tensiones cercanas a la de fluencia, produciéndose grandes deformaciones.

Por otro lado, diversos autores han reportado que en ensayos triaxiales realizados sobre arenas sueltas reforzadas con fibras sintéticas, la curva tensión desviadora versus deformación específica parece aumentar de manera lineal para grandes deformaciones sin que pueda apreciarse una tensión desviadora máxima, incluso para niveles de deformación superiores al 20% (Diambra et al., 2010; Consoli et al., 2007). Por esta razón los investigadores se ven obligados a tomar un valor de deformación de referencia (o deformación máxima permitida) para comparar la resistencia al corte del suelo reforzado y el suelo sin reforzar. Un estudio experimental desarrollado por los autores en una arena aluvial reforzada con fibras

de polipropileno, demostró que al reducir la deformación máxima permitida 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).

Existe poco acuerdo entre las investigaciones actuales respecto al efecto que la inclusión de fibras ejerce en el módulo de deformación de suelos granulares. 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, ya que las mismas comienzan a actuar a partir de grandes deformaciones. Así también Heineck et al. (2005) concluyeron que en arenas, el módulo de rigidez obtenido para niveles de deformaciones bajos (del orden de 10^{-5}) no se ve afectado al incorporar fibras en contenidos de 0.5% respecto al peso de suelo seco. 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).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales

Se utilizó una arena silíceica de origen aluvial, limpia de finos, y granulometría bien graduada. Los granos de arena son subredondeados. Las principales propiedades físicas de la arena se resumen en la Tabla 1. En la Fig. 1 se presenta la curva de distribución granulométrica de la arena ensayada.

Tabla 1. Propiedades de la arena ensayada

S.U.C.S.	C_U	C_C	%PT#200	G_s
SW	7.9	1.4	4.9	2.68

S.U.C.S.: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; C_U : coeficiente de uniformidad; C_C : coeficiente de curvatura; %PT#200: porcentaje pasante Tamiz IRAM N. 200 (0.074 μm); G_s : gravedad específica de los sólidos.

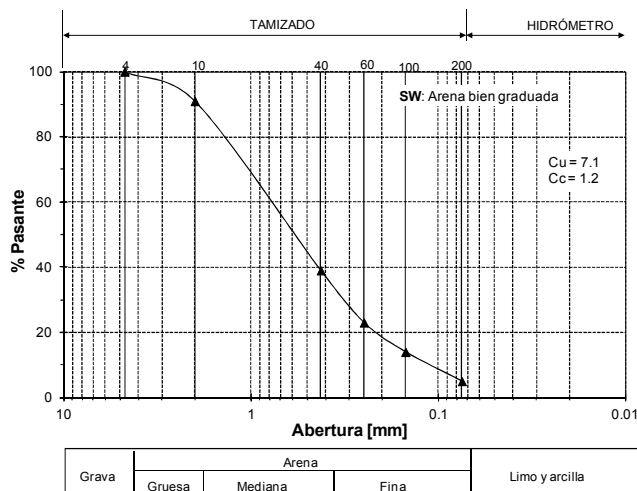


Figura 1. Curva de distribución granulométrica de la arena ensayada.

Esta arena fue reforzada mediante la adición de fibras de polipropileno de 10 mm de longitud. Las fibras tienen forma aplanada, con una sección aproximada de 2 mm por 0,1 mm. La longitud de las fibras fue elegida en base a los resultados obtenidos por Clariá y Vettorelo (2010).

3.2 Preparación de muestras

Las muestras de arena con fibras fueron preparadas mediante compactación y vibración hasta alcanzar la densidad deseada. Se utilizaron contenidos de fibras en porcentaje con respecto al peso de suelo seco de 0.0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0; y 4.0 %. No se adicionó agua en ninguna muestra ya que se buscó eliminar el efecto del agua en las muestras de suelo tanto reforzado como sin reforzar.

Durante este estudio experimental, se consideró al suelo reforzado como un material compuesto, donde los granos de arena y las fibras conforman la fase sólida de un nuevo material. Bajo este enfoque, se eligió como parámetro de control y comparación entre las diferentes muestras preparadas, a la densidad relativa. Para ello fue necesario determinar las relaciones de vacíos máxima y mínima correspondiente a cada contenido de fibra. Estos valores fueron calculados considerando que la gravedad específica de la mezcla arena-fibras se ve modificada en función del contenido de fibras.

Las muestras de arena reforzada y sin reforzar fueron preparadas de manera de lograr dos estados de compacidad, denso, con una densidad relativa de entre 80 y 90%, y suelto, con densidades relativas de entre 30 y 40%.

3.3 Ensayos ejecutados

3.3.1 Ensayos triaxiales y de corte directo

Con el fin de caracterizar la resistencia al corte de la arena reforzada con fibras, se ejecutaron ensayos triaxiales y de corte directo en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las muestras fueron ensayadas en estado seco y se aplicaron velocidades de deformación lo suficientemente lentas como para garantizar que los procesos de corte se desarrollen en condiciones asimilables a drenadas.

Los ensayos triaxiales se ejecutaron sobre muestras de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Los ensayos de corte directo fueron realizados sobre muestras de 63.5 mm de diámetro y 37.5 mm de altura.

3.3.2 Ensayos de velocidad de ondas en edómetro modificado

Para caracterizar la rigidez a pequeños niveles de deformación (del orden de 10^{-5}) de la arena reforzada con fibras, se ejecutaron ensayos de medición de velocidad de propagación de ondas de corte en un edómetro modificado mediante la incorporación de cristales piezocerámicos (bender elements) en sus cabezales superior e inferior. Una descripción detallada de este equipo fabricado en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba puede apreciarse en Clariá y Rinaldi (2000) y Santamarina (2001).

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Relación de vacíos

En la Fig. 2 se observa la influencia del contenido de fibras en la relación de vacíos del suelo reforzado. Los valores de relación de vacíos mínima fueron obtenidos mediante la técnica de compactación por apisonado y vibración combinados, mientras que los valores de relación de vacíos máxima fueron obtenidos por pluviación. De la Fig. 2 puede concluirse que la presencia de fibras genera un empaquetamiento más suelto del suelo reforzado.

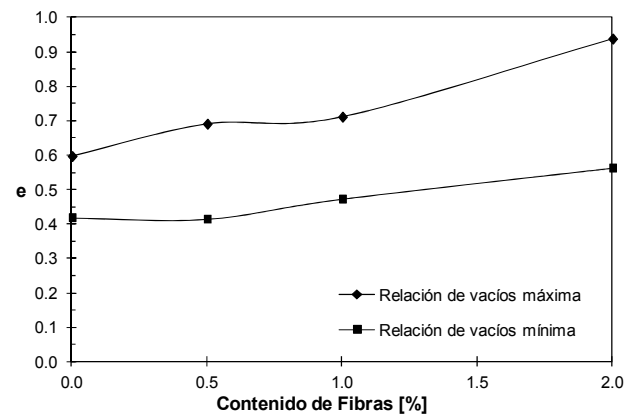


Figura 2. Variación de la relación de vacíos máxima y mínima con el contenido de fibras.

4.2 Resistencia al corte

Las Fig. 3 y 4 muestran la variación de la tensión desviadora máxima con el contenido de fibras para la arena de estudio con un estado de compactación denso y suelto, respectivamente.

Durante los ensayos triaxiales ejecutados en la arena reforzada en estado suelto, la tensión desviadora mostró un aumento indefinido con la deformación específica vertical. Por este motivo, se escogió de manera arbitraria una deformación específica máxima de 12% para definir la máxima tensión desviadora que se ilustra en la Fig. 4. Esto no sucedió en las muestras preparadas en estado denso, donde se observó un claro valor de tensión desviadora máxima.

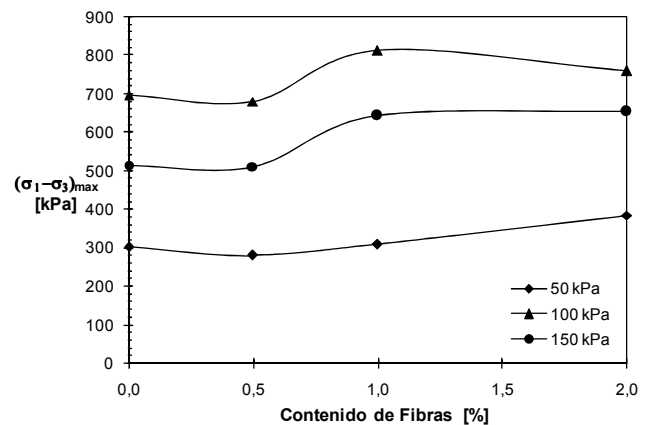


Figura 3. Variación de la tensión desviadora máxima en función del contenido de fibras en arena densa para presiones de confinamiento de 50, 100 y 150 kPa.

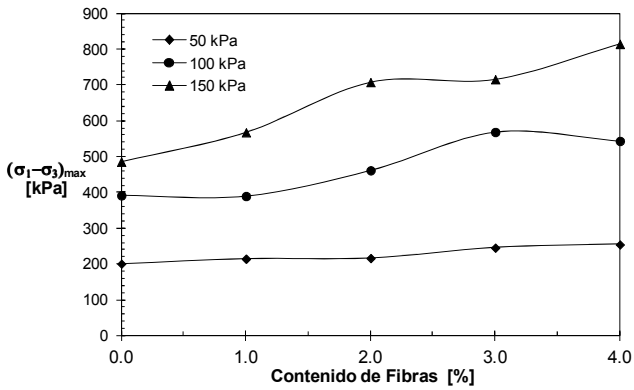


Figura 4. Variación de la tensión desviadora máxima en función del contenido de fibras en arena suelta, para presiones de confinamiento de 50, 100 y 150 kPa.

De las Fig. 3 y 4 se deduce que si bien en ambos estados de compactación la resistencia al corte aumenta con el contenido de fibras, este incremento es más notorio cuando la arena se encuentra en estado suelto. Asimismo, la eficiencia de la incorporación de fibras resulta mayor a medida que el confinamiento crece.

Por otro lado, la deformación específica axial necesaria para alcanzar la máxima tensión desviadora cuando la arena se encuentra en estado denso, aumenta con el contenido de fibras, tal como se aprecia en la Fig. 5. Es decir que si bien la adición de fibras produce un aumento en la resistencia al corte, el suelo debe alcanzar mayores niveles de deformación para poder desarrollar dicha resistencia.

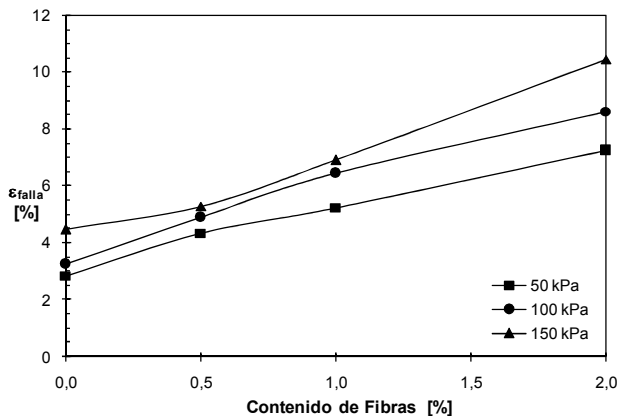


Figura 5. Variación de la deformación axial de falla con el contenido de fibras en arena densa, para presiones de confinamiento de 50, 100 y 150 kPa.

4.3 Rigidez

En base a las curvas de tensión desviadora versus deformación específica axial obtenidas en los ensayos de compresión triaxial, se calcularon los módulos de deformación secante correspondientes a un nivel de deformación específica axial igual a 1% ($E_{1\%}$). En las Fig. 6 y 7 se aprecia la variación del módulo de deformación secante con el contenido de fibras para arenas reforzadas en estado denso y en estado suelto respectivamente. En ambos casos se observa una disminución del módulo secante con el contenido de fibras para todas las presiones de confinamiento ensayadas.

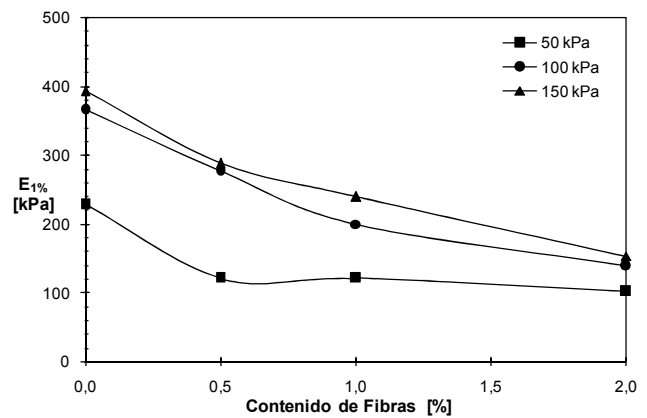


Figura 6. Variación del módulo de deformación correspondiente a un 1% de deformación axial en función del contenido de fibras en arena en estado denso, para presiones de confinamiento de 50, 100 y 150 kPa.

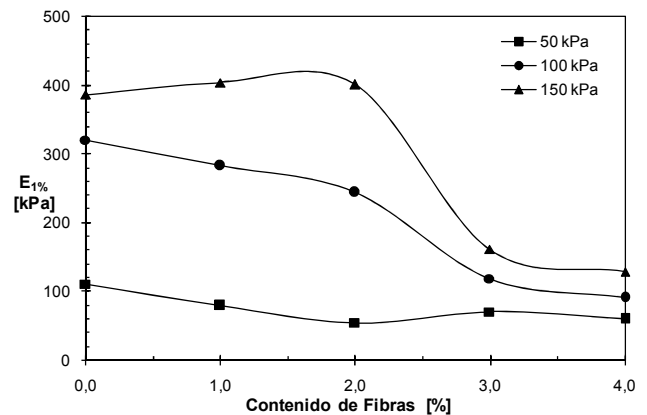


Figura 7. Variación del módulo de deformación correspondiente a un 1% de deformación axial en función del contenido de fibras en arena en estado suelto, para presiones de confinamiento de 50, 100 y 150 kPa.

Para evaluar el efecto de la inclusión de fibras sobre la rigidez del suelo reforzado a niveles de

deformación bajos (del orden de 10^{-5}) se ejecutaron ensayos de compresión confinada dentro de una celda edométrica modificada con bender elements que permitieron medir la velocidad de propagación de ondas de corte (ondas S).

A partir de la velocidad de ondas S (V_S) y de la densidad de la arena (ρ) se determinó el módulo de corte máximo (G_{max}) como:

$$G_{max} = V_S^2 \cdot \rho \quad (1)$$

En las Fig. 8 y 9 se presenta la variación del módulo G_{max} obtenido por medio de la ecuación 1 con el porcentaje de fibras agregado a la arena, para estados de compacidad denso y suelto respectivamente.

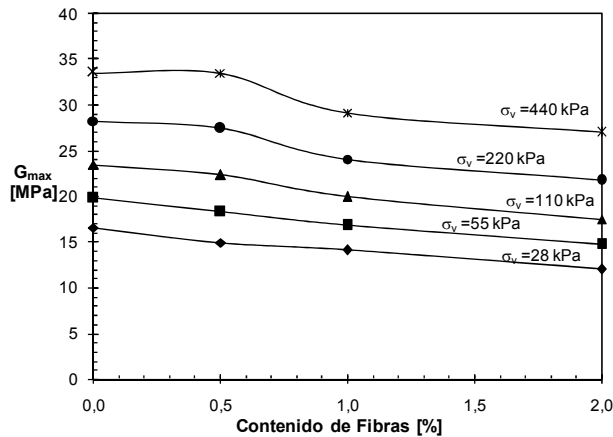


Figura 8. Variación del módulo de corte máximo en función del contenido de fibras en arena en estado denso, para diferentes presiones verticales.

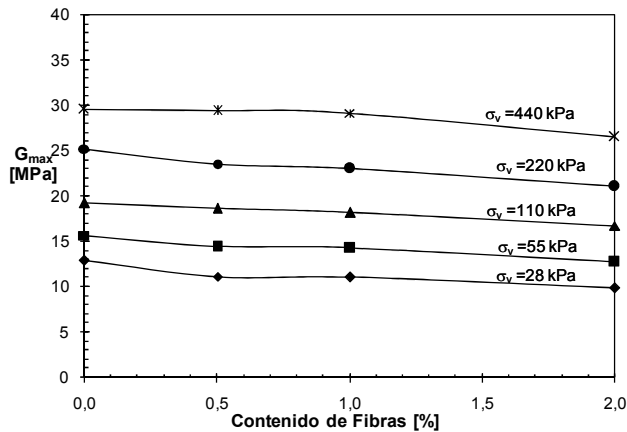


Figura 9. Variación del módulo de corte máximo en función del contenido de fibras en arena en estado suelto, para diferentes presiones verticales.

En concordancia con lo observado a niveles de deformación medios ($\epsilon = 10^{-2}$), a pequeñas deformaciones ($\epsilon = 10^{-5}$) la rigidez también decrece con el contenido de fibras, aunque en menor proporción.

5 EFICIENCIA DEL REFUERZO Y APLICACIONES

En base a los resultados obtenidos durante este estudio experimental, se analiza la eficiencia del refuerzo de fibras sobre arenas en estados de compacidad suelto y denso.

Para arenas en estado suelto, la incorporación de fibras hace que el suelo reforzado no presente un estado de falla tal como se aprecia en arenas sin reforzar, ya que la resistencia al corte aumenta indefinidamente con la deformación. Sin embargo, la inclusión de fibras produce un decremento en la rigidez tanto a niveles de deformación bajos (10^{-5}) como medios (10^{-2}). Debido a esto, se concluye que el empleo de arenas sueltas reforzadas con fibras resulta apropiado en casos en los que se necesite incrementar la resistencia al corte a grandes deformaciones, sin importar la pérdida de rigidez. Un ejemplo de ello podría ser el de arenas refuladas en zonas sísmicas.

Entre las diferentes investigaciones donde se ha estudiado el refuerzo de arenas sueltas con fibras, se nombra a Ibrahim et al. (2010), quienes reportaron que la inclusión de fibras en arenas sueltas reduce el potencial de licuación.

Por otro lado, para el caso de arenas en estado denso reforzadas con fibras, se observó que el incremento en la resistencia al corte es menor que en el caso de arenas sueltas. Así también la rigidez correspondiente a niveles de deformación bajos a medios (10^{-5} a 10^{-2}) disminuye con el contenido de fibras. Por lo tanto se concluye que el refuerzo de fibras resulta menos eficiente en arenas densas que en arenas sueltas.

6 CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

- ◆ La inclusión de fibras a la arena produce un empaquetamiento más suelto del suelo reforzado, resultando que para iguales densidades relativas la arena reforzada con fibras presenta una relación de vacíos mayor que la arena sin reforzar.

- ◆ En arenas reforzadas con fibras con un estado de compacidad suelto, la resistencia al corte se incrementa notoriamente, pero se reduce la rigidez expresada por medio del módulo de deformación tanto a niveles de deformación bajos como medios. El incremento de la resistencia al corte crece con el confinamiento, ya que la fibra necesita de confinamiento para poder aportar resistencia mecánica al suelo.
- ◆ En arenas con estados de compacidad densos reforzadas con fibras, el incremento en la resistencia al corte es menos notorio que en arenas sueltas, y la rigidez disminuye tanto a niveles de deformación bajos como medios.
- ◆ Las posibles aplicaciones de este tipo de refuerzo deben orientarse a situaciones en las que el suelo se encuentre sometido a grandes niveles de deformación, de manera que pueda desarrollar por completo su resistencia al corte.

7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica (SAIG).

8 REFERENCIAS

Clariá J. J. y Rinaldi V. A. (2000). "Velocidad de Onda en Loess Compactado e Inalterado en Estado de Compresión Confinada". Memorias del XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones (GEOBA 2000), Buenos Aires, pp. 123-132.

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.

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.

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.

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, USA.

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.

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.

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.

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.

Gray D. H., Ohashi H. (1983), "Mechanics of fiber-reinforcement in sand." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.

Heineck, C.S., Consoli, N.C., Coop, M.R., (2005). "Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains". Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE 131 (8), 1024-1033.

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.

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.

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.

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.

Santamarina, J. C., Klein K. A. y Fam M. A. (2001). "*Soils and Waves*". Wiley & Sons LTD..

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.

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.

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.