



# Comportamiento de suelos limoso con agregado de fibras sintéticas y cemento

## Silty soil behavior with fibre and cement

Eberhardt, Marcelo <sup>1</sup> ✉ - Arrúa, Pedro <sup>1</sup> - Aiassa Martínez, Gonzalo <sup>1</sup>

Recibido: 10 de agosto de 2012 • Aceptado: 12 de septiembre de 2013

### Resumen

*En Córdoba Argentina, las estructuras geotécnicas emplean frecuentemente el suelo limoso bajo condiciones de compactación para el mejoramiento del desempeño de las construcciones. Los mantos superiores correspondientes a limos de origen eólico (loess) se encuentran ampliamente disponibles en sectores de llanuras y áreas cercanas a las sierras de la provincia. La incorporación de materiales minerales o sintéticos, no es una actividad frecuente en la región debido, posiblemente, a la escasez de resultados experimentales que expliquen el desempeño de las mezclas. No se ha encontrado en la literatura estudios locales que estudien materiales compuestos por fibras, aglutinantes y suelo loésico. Este trabajo presenta un estudio de suelo limoso para el incremento del desempeño de las estructuras geotécnicas por compactación, adición de cemento y fibra sintética. El trabajo experimental incluye ensayos de compresión simple, tracción por compresión diametral y ensayos CBR. Se presenta como se modifica resistencia y rigidez con la incorporación de cemento. Finalmente se muestra como varía el hinchamiento debido a la incorporación de fibras.*

**Palabras Claves:** limo, cemento, fibra, tensión-deformación.

### Abstract

*Geotechnical structures in Cordoba Argentina frequently use silty soil compaction for improving the performance construction. The eolian silt (loess) is widely available in areas of plains and areas near the mountains of the province. The addition of mineral or synthetic materials is not a frequent activity in the region, possibly due to the scarcity of experimental results that explain the performance of the mixtures. We did not found local studies that consider composite fibers, binders and loess soil. This paper presents a study of silty soil to increase the performance of geotechnical structures by compaction, addition of cement and synthetic fiber. The experimental work includes unconfined compression tests, tensile tests and CBR.*

*The strength and stiffness of soil cement is presented in this paper. Finally, the control of swelling by incorporating fibers is shown.*

**Keywords:** Silts, cement, fibre, stress-strain.

1. GIGEF, Grupo de Investigación y Transferencia en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional

✉ meberhardt@civil.frc.utn.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

Los suelos loésicos presentan una mineralogía con un elevado contenido de componentes de origen volcánico (*Reginatto 1970, Zarate 2003*). La distribución de tamaños de granos comprende arena fina (1%-10%), limo (50%-80%) y arcilla (5%-20%). En estado natural el loess posee una estructura abierta, de bajo peso unitario, altamente dependientes de las condiciones externas, caracterizados por su inestabilidad volumétrica frente al humedecimiento y/o cambios en el estado tensional (*Arrúa y Aiassa 2009*).

Con la adición de materiales minerales y sintéticos se busca estabilizar el material. Las condiciones ambientales, como la temperatura y humedad, influyen de forma significativa en las características resistentes de las mezclas (*Liu et al, 2010*). La cantidad de cementante incorporado, expresada en términos de porcentaje de peso de agregado en relación con el peso seco del suelo, se relaciona generalmente con la resistencia y rigidez asignada al material en la etapa de diseño y cálculo (*Arrúa et al. 2011, Haofeng 2009*). No obstante, esta definición puede ser insuficiente si no se consideran en las resistencias finales las condiciones ambientales a las que se encuentra sometido el material durante la etapa de hidratación.

Las fibras sintéticas han sido estudiadas con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y prevenir la formación de fisuras en suelos arenosos y limo-arcilloso compactados (*Plé y Le 2012, Claria y Vettorelo 2010, Tang et al. 2007, Kumar et al. 2006, Consoli et al. 1998*).

Este trabajo presenta un estudio que caracteriza el desempeño del loess mejorado con cemento y fibras sintéticas. Se estudian las variables que inciden en la fabricación de las muestras. Se evalúa la influencia del contenido de cemento, humedad, temperatura y peso unitario, y se definen las condiciones óptimas de preparación. Con este propósito, se realizaron ensayos de compresión simple y ensayos CBR. Los ensayos CBR han sido ampliamente utilizados en muestras compuestas de suelo-fibra (*Hazirbaba y Gullu 2010, Yetimoglu et al. 2005*) y suelo cemento (*Goodary et al. 2012, Oyediran y Kalejaiye 2011, Millogo et al. 2008, Siddique y Rajbongshi 2002*).

## MATERIALES

### Suelo loésico y cemento

El suelo empleado en este trabajo ha sido extraído del sector sur de la Ciudad de Córdoba y corresponde a las formaciones geológicas Post-Pampeanas y Pampeana (*Reginatto 1970*). La distribución de partículas y las principales propiedades físicas del suelo en estudio se presentan en la Figura 1. Donde  $G_s$ =gravedad específica,  $L_p$ = límite plástico,  $IP$  = índice de plasticidad,  $\gamma_d$  = peso unitario seco,  $w_{op}$ = humedad óptima. La morfología de las partículas, rugosidad y esfericidad, se ha determinado por medio de imágenes obtenidas por microscopio electrónico tipo LEO 1450 VP (SEM), del Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis de la Universidad de San Luis (*Arrúa et al. 2011*).

En la Tabla 1 se presentan las características generales del limo loésico de la región central del país.

Como agente de cementante se ha empleado cemento comercial Portland normal fabricado en la planta de Minetti ubicada en Ciudad de Malagueño. Los fabricantes indican que su composición química corresponde a  $SiO_2 = 15,42\%$ ,  $Al_2O_3 = 4,60\%$ ,  $Fe_2O_2 = 3,35\%$ ,  $CaO = 65,71\%$ ,  $MgO = 2,79\%$ ,  $K_2O = 1,97\%$ ,  $Na_2O = 0,59\%$ ,  $SO_3 = 5,10\%$ ,  $TiO_3 = 0,47\%$ .

La Figura 2 presenta una imagen de las partículas de cemento Portland obtenidas mediante microscopio electrónico.

### Fibras

Se utilizaron fibras sintéticas, inertes químicamente, fabricadas con polímeros vírgenes de polipropileno en hilos independientes de 19 mm de longitud (Figura 3). El Fabricante de estas Fibras (BGP de LISTA SRL. Policemento Argentina) sugieren que estas fibras se utilizan en morteros y hormigón para proveer un refuerzo adicional para esfuerzos de tracción. Indican que se reducen las fisuras y la permeabilidad.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades características de las fibras empleadas en este trabajo aportadas por el fabricante (BGP de LISTA SRL. Policemento Argentina). El material empleado en la manufactura corresponde a polipropileno 100%.

### Mezclas de suelo

El cemento, suelo y fibras se han combinado para establecer la incidencia de las variables en el desempeño mecánico. El suelo extraído del yacimiento, fue secado en estufa a 105 °C durante 24 horas. Se desagregaron manualmente las partículas de gran tamaño con mortero. Se tamizó el suelo recogiendo el pasante por Tamiz 40. Se incorporó el cemento o las fibras en diferentes proporciones, mezclando de manera manual e intensa durante al menos 3 minutos. Finalmente, se acopió la mezcla en doble bolsa plástica de poliestileno de alta densidad hasta la construcción de las mezclas. En la preparación y ensayo de las muestras se emplearon moldes metálicos de 0,10m de altura, 0,05m de diámetro y 0,006m de espesor para la compactación estática. La relación entre la longitud de las fibras y el diámetro de la muestra no es elevada. En consecuencia no se descarta la posibilidad de existencia de efectos de escala. Futuros trabajos pueden explorar que ocurre con muestras de gran tamaño. Las muestras se construyeron a peso unitario seco constante, compactadas dentro de cada recipiente en tres capas iguales por medios mecánicos. Posteriormente fueron extraídas del molde mediante un extractor hidráulico de avance milimétrico.

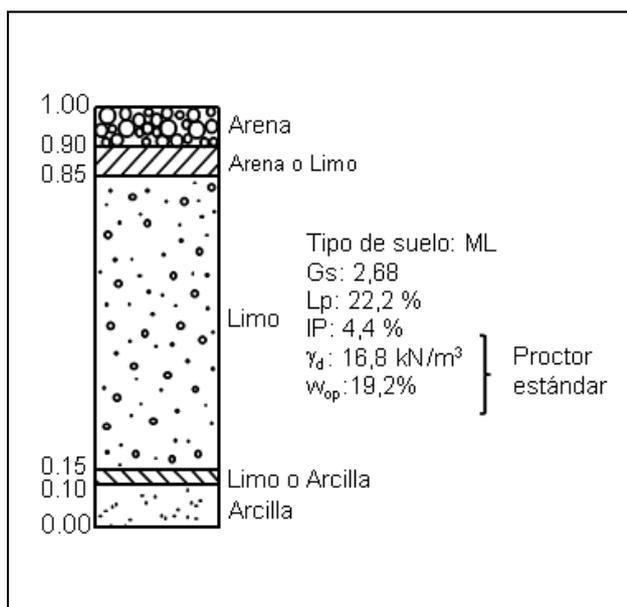
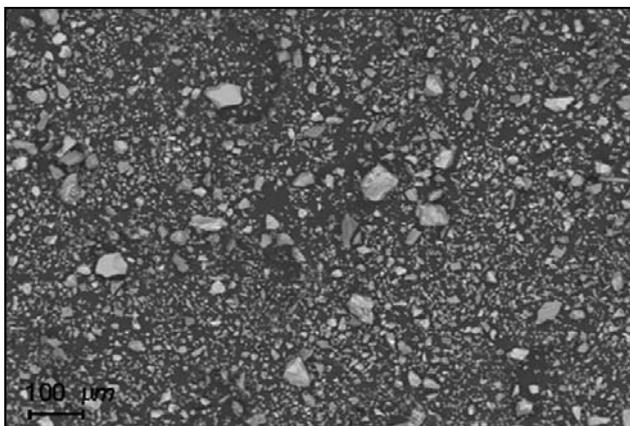
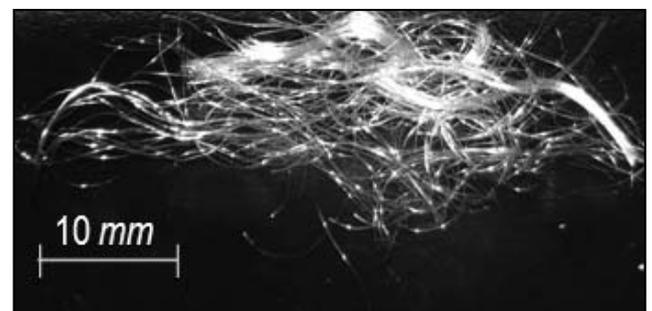


Figura 1. Distribución de partículas y propiedades físicas del suelo

**Tabla 1. Características generales del suelo ensayado**

Propiedad	Descripción	Valor
SUCS	Limo Arcilloso. Baja Plasticidad	CL - ML
Condiciones naturales	Contenido de humedad (%)	12,7 - 23,0
	Peso unitario seco [kN/m <sup>3</sup> ]	12,5 - 13,5
	Gravedad específica	2,66 - 2,68
	Índice DCP (Dynamic Cone Penetration). ASTM D-6951 (mm/golpe)	18 - 24
Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	23,0 - 30,0
	Índice de plasticidad	4,2 - 4,9
Composición química	Silicio (%) (SiO <sub>2</sub> )	65
	Aluminio (%) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15
	Óxido de hierro (%) (Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	5
	Óxido de calcio (%) (CaO)	3
	Óxido de sodio (%) (Na <sub>2</sub> O)	3
	Otros (%)	9
Tamaño de partículas	Pasante tamiz (#200) (%)	85 - 95
	Contenido de arcilla (< 2 μm) (%)	7,0 - 10,0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Máxima densidad seca (KN/m <sup>3</sup> )	16,4 - 17,0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Contenido de humedad óptima (%)	18,5 - 20,0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Índice DCP para condiciones optimas ensayo Procter estandar (mm/golpe)	4 -- 8


**Figura 2. Micrografía del cemento Portland utilizado.**

**Figura 3. Fibra sintética de 19 mm incorporada al suelo limoso (Policemento La Fibra MF).**
**Tabla 2. Propiedades de la fibra, aportadas por el fabricante (Policemento La Fibra MF)**

Propiedad	Ud.	Método	Media	Tolerancia
Título	Denier	ITQ-4,10-002	15,03	14,8-15,8
Resistencia	N	ITQ-4,10-002	0,52	>0,40
Elongación	%	ITQ-4,10-002	216,84	>150
Finish	%	ITQ-4,10-008	0,65	0,60-0,85
Longitud	mm	ITQ-4,10-002	19	19
Humedad	%	ITQ-4,10-002	0,11	<0,1

Las probetas obtenidas se acopiaron en bolsas plásticas hasta la edad de ensayo. Las temperaturas empleadas para la conservación de las muestras corresponden a 20°C. Para las mezclas de suelo con fibra o suelo fibra cemento se ha procedido de manera equivalente a la explicitada en el párrafo anterior. Los porcentajes empleados para la secuencia de experiencias se presentan en la Tabla 3.

Para los ensayos de tipo CBR (California Bearing Ratio) se puso de manifiesto un problema operativo durante el proceso de compactación cuando se incorporan fibras, las cuales impiden un correcto enlazado al final de la compactación. La Figura 4 presenta una imagen de la mezcla de suelo-fibra.

## CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

### Compresión no confinada

La resistencia a compresión no confinada es uno de los índices de control de mezclas de materiales frecuentemente empleada para caracterizar el desempeño de la construcción (Arrúa et al. 2012, Raymond et al. 2007, Bahar et al. 2004, ACI 318). En las mezclas de materiales pétreos con cemento, ven favorecidas sus propiedades de resistencia a corto plazo con el incremento de temperatura (ACI 305R-99) aunque a largo plazo se obtienen resistencias entre un 10% y 15% menores a las diseñadas (Gaynor et al. 1985). Se ejecutaron pruebas de resistencia a compresión no confinada uniaxial para establecer rigidez y resistencia. Para esto se utilizó una prensa mecánica instrumentada con celda de carga y comparador digital.

Las muestras se han preparado a peso unitario seco de 15 kN/m<sup>3</sup>, bajo compactación estática. El contenido de humedad inicial se ha definido al 21%. La incorporación de cemento al

suelo limoso provoca una notable disminución de la plasticidad. La Figura 5 muestra que el incremento de resistencia no es directamente proporcional al porcentaje de cemento incorporado. Al 5% de incorporación de cemento se logra una resistencia de 2,3 MPa, mientras que al duplicar el contenido de cemento (10%) la resistencia se eleva a 6,2 MPa. Este aumento es notable y oscila en un 270%. Esta tendencia se mantiene ya que para contenido de cemento del 15% la resistencia a compresión es de 10,4 MPa (incremento del 450%). Se aprecia que es posible esperar variaciones de hasta 1 MPa para un mismo porcentaje de cemento.

Se han saturado un grupo de probetas mediante inundación para evaluar su resistencia a la compresión simple, la Figura 5 presenta la tendencia de características similares a las enunciadas con un leve desfase en el origen. Esto es debido a que la muestra con un contenido del 2,5% de cemento posee un valor muy bajo de resistencia, alrededor de 0,4 MPa. característica que se revierte al duplicar el contenido de cemento, ya que al 5% de aglutinante se obtiene una resistencia de 1,6 MPa, entonces con este agregado se logra cambiar el comportamiento del suelo frente a la inestabilidad de un agente externo como el agua, logrando un incremento de resistencia del orden del 400%. Esta tendencia continúa con el incremento del contenido de cemento, teniendo el mayor incremento relativo en la resistencia a la compresión simple, entre el 10 y 15%.

Se prepararon muestras al 21% de humedad, a un peso unitario seco de 15 kN/m<sup>3</sup>, para establecer la influencia de la incorporación de fibras al suelo loessico. Se han realizado ensayos de compresión simple según los contenidos definidos en la Tabla 3. Se ha obtenido la relación entre la deformación axial en falla y el contenido de fibra dentro de la masa de suelo, lo que se presenta en la Figura 6.

Tabla 3. Programa de ensayos

Mezcla	Contenido del material incorporado referido al peso de suelo seco				
Suelo-Cemento	2,5 %	5,0 %	7,5%	10,0 %	---
Suelo-Fibra	1,0 ‰	2,0 ‰	5,0 ‰	10,0 ‰	15,0 ‰
Suelo-Cemento*- Fibra	1,0 ‰	2,0 ‰	5,0 ‰	10,0 ‰	---

\*El contenido de cemento se ha fijado en el 7,5% en peso seco



Figura 4. Mezcla de suelo loésico con 7,5% de cemento y 2‰ de fibras.

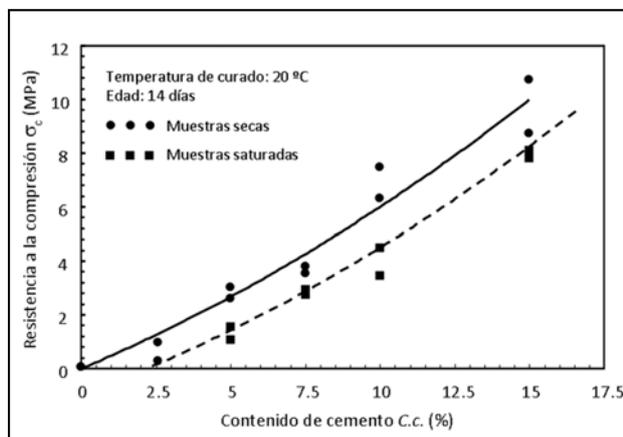


Figura 5. Influencia del contenido de cemento en la resistencia máxima a compresión.

Se puede observar que la tendencia en el aumento de la resistencia a compresión para el aumento en el contenido de fibra, se encuentra interrumpida por dos valores que decaen en la tendencia general.

Respecto a la resistencia a compresión simple se puede dividir la relación en tres sectores: el inicial, entre el 1‰ y 2‰ en el cual el incremento de deformación en falla es poco considerable. Un segundo sector: entre el 2‰ y 10‰ donde la deformación en falla aumenta sensiblemente. Y el final: entre el 10‰ y 15‰ donde la deformación desarrollada tiene características similares al primer tramo.

La Figura 7 presenta el cambio de resistencia a compresión bajo modificaciones del contenido de cemento, para muestras elaboradas con un contenido de fibras del 2‰, curadas a 20°C y ensayadas a 14 días de edad. En la Figura 7, se puede apreciar la tendencia de la resistencia a compresión respecto al contenido de cemento. Notar que es una tendencia análoga al de la figura 5, con la diferencia del aporte de fibra en cantidad constante para todas las probetas ensayadas.

Observando algunos puntos característicos en ambas tendencias, es sencillo verificar que existe una coincidencia muy amplia entre las probetas de suelo-cemento y las de suelo-cemento-fibra, esto es asignado al efecto predominante del cemento por sobre el de la fibra de polipropileno, observación basada en términos de resistencia.

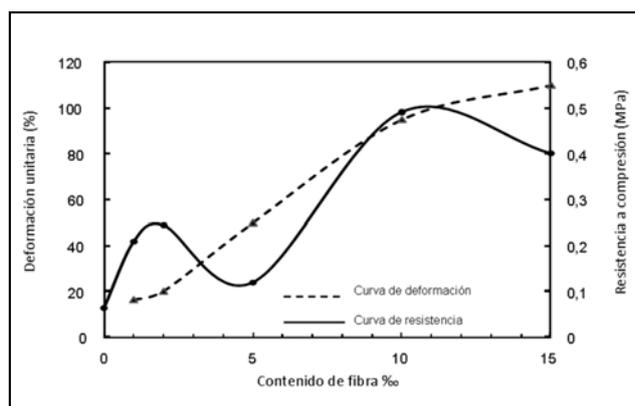


Figura 6. Relación entre el contenido de fibra y el desempeño de las probetas bajo solicitaciones de compresión.

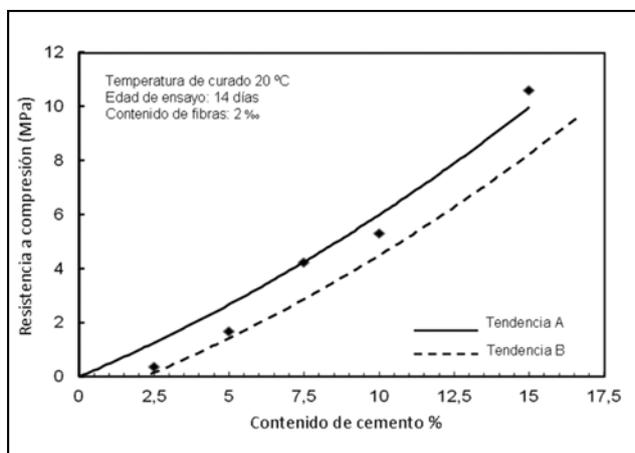


Figura 7. Relación entre el contenido de cemento y la resistencia a compresión para muestras con el 2 ‰ de fibras sintéticas.

### Tracción por compresión diametral

La Figura 8 muestra la relación entre resistencia a compresión y resistencia a la tracción por compresión diametral para muestras secas y saturadas, curadas a 20°C y ensayadas a 14 días de edad. En general, la resistencia a la tracción aumenta con el contenido de aglutinante. Las muestras no saturadas, no presentan un aumento significativo en la resistencia a la tracción entre el 0% y el 2,5% CC (0.01MPa). Entre 2,5 y 5% C.c. el incremento medio es de 0,32 MPa. Entre los 5% a 7,5% C.c. es 0,21 MPa, 7,5% a 10% C.c. es 0,19 MPa y 10% a 15% C.c. es de 0,53 MPa. Aproximadamente, un aumento de 1,0% Cc, provoca un aumento en la fuerza de tensión de 84 kPa.

La Figura 9 muestra la deformación diametral en falla y la resistencia a la tracción respecto del contenido de fibra de polipropileno. Se puede apreciar la misma tendencia que en la Figura 6, donde el aumento de la cantidad de fibra provoca un aumento de la resistencia a tracción.

La función que representa a los valores de resistencia a compresión simple, se puede dividir en dos sectores: el inicial, entre el 1 y 2 ‰ donde el incremento de deformación en falla es poco considerable. Un segundo sector: entre el 2 y 15‰ donde la deformación en falla aumenta sensiblemente, con cambios puntuales en la pendiente general desarrollando el aumento sostenido de la deformación.

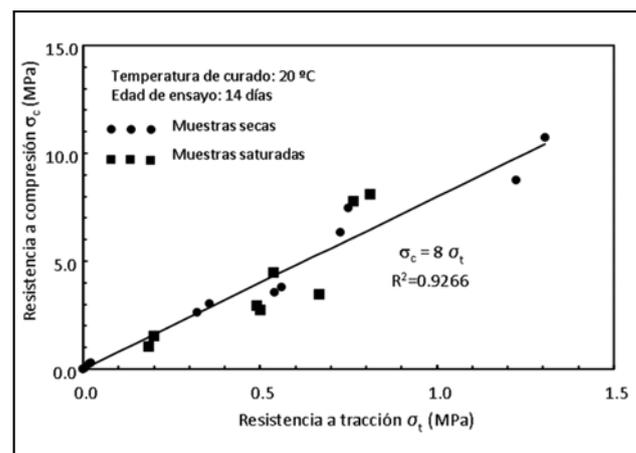


Figura 8. Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción por compresión diametral.

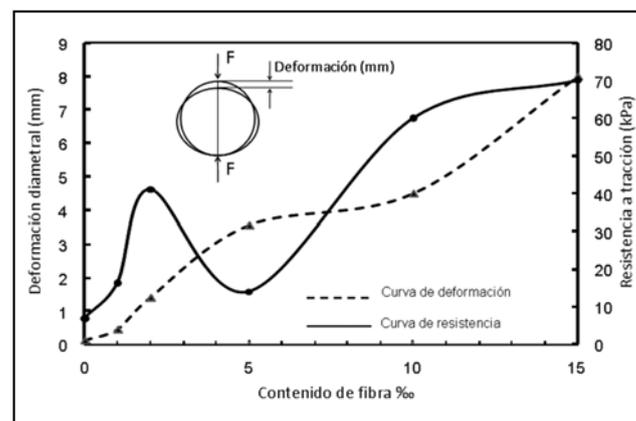


Figura 9. Relación entre el contenido de fibra y el desempeño de las probetas bajo solicitaciones de tracción por compresión diametral.

En la Figura 10 se relaciona la resistencia a compresión y a tracción por compresión diametral. Para un contenido del 2‰ de fibras y cemento desde el 2,5% al 15%. Comparando los resultados de la Figura 10 con los obtenidos en la Figura 8, se aprecia que se mantiene la misma pendiente en la recta de aproximación.

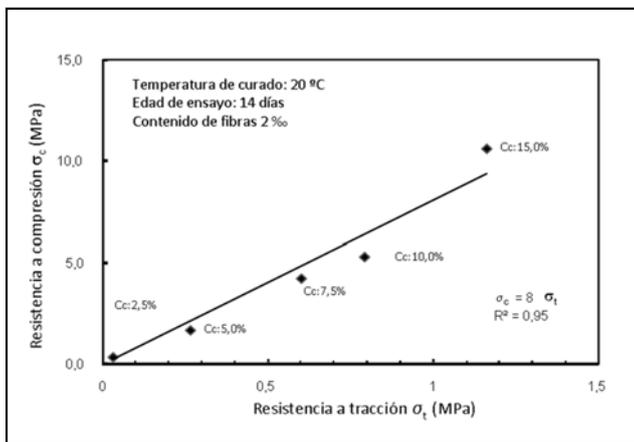


Figura 10. Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción con un contenido de fibras del 2‰.

### Relación de capacidad de carga (CBR)

Se ejecutaron dos grupos de ensayos de compresión tipo CBR. (a) Se incorporó fibra, (b) se incorporó cemento. En ambos grupos se realizó la incorporación de fibra o cemento en porcentajes referidos a peso de suelo loessico seco.

Los ensayos CBR se realizaron construyendo las muestras a una humedad de compactación del 19%. Luego se inundaron las probetas durante 150 horas con una sobrecarga de 45 N. Se registraron hinchamientos en función del tiempo. En todos los casos se alcanzó la estabilización del proceso. Los resultados indican una contribución de las fibras en la reducción de la expansión (Figura 11). La mejora es notable aún con la incorporación de pequeños porcentajes de fibra (1 ‰), no obstante la mejora se incrementa en menor medida con el incremento del contenido de fibra.

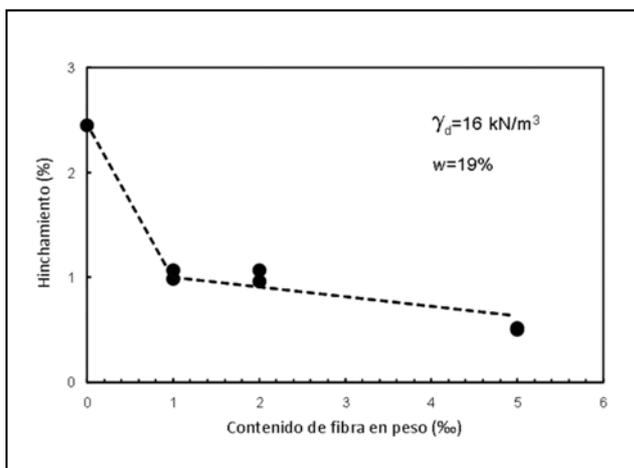


Figura 11. Resultado de hinchamiento en las muestras luego de un proceso de inundación durante 150 horas.

La caracterización mecánica mediante el ensayo CBR se determinó para una penetración del pistón de 2,54 mm (Fig. 12). Los resultados señalan una mejora en el material inundado con el agregado de fibra. Este efecto, es posible que se encuentre ligado con la reducción en el hinchamiento durante el proceso de inundación. Por otro lado, el material sin inundar presentó reducciones en el valor CBR con el incremento en el contenido de fibras. La reducción en el valor de CBR del material sin inundar, puede asociarse a una disminución en la rigidez del material con el agregado de fibras.

En el segundo grupo de ensayos de compresión tipo CBR se modificó y evaluó la respuesta de las probetas para diferentes contenidos de cemento sin la incorporación de fibras. Los resultados se presentan en la Fig. 13, para muestras con 7 días de edad. El incremento en el contenido de cemento mejora considerablemente la rigidez del material.

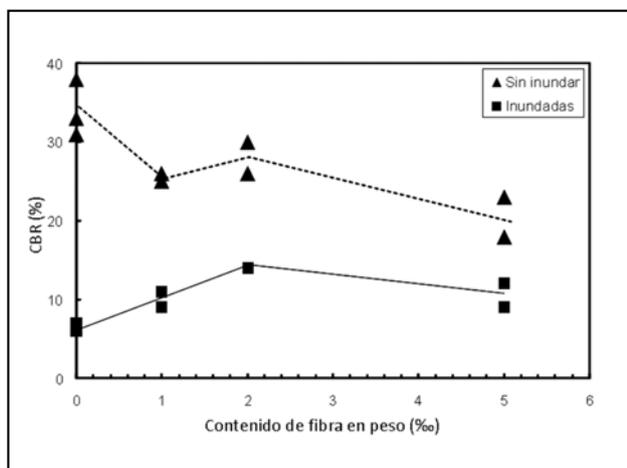


Figura 12. Valor CBR del suelo limoso sin inundar y luego de 150 horas de inundación. En todos los casos  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ,  $w = 19\%$ .

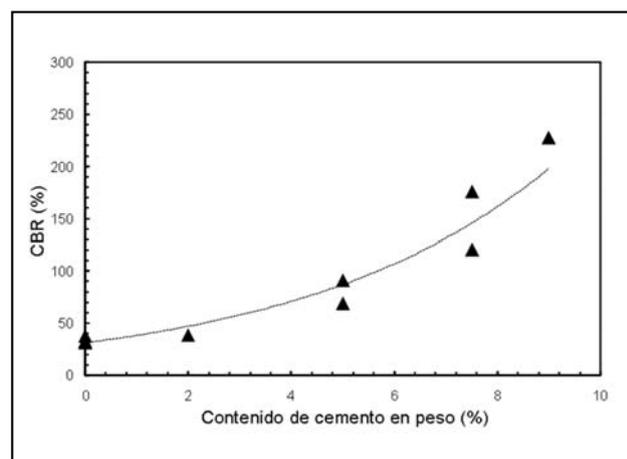


Figura 13. Valor CBR del suelo limoso con diferentes contenidos de cemento. Edad de muestras: 7 días.

### CONCLUSIONES

En este estudio se han presentado los resultados de caracterización mecánica para materiales compuestos por suelo limoso, cemento y fibra sintética. Se han ejecutado ensayos de compresión simple, tracción por compresión diametral y California Bearing Ratio (CBR). Se ha presentado que la

incorporación de cemento al suelo limoso compactado mejora la resistencia y rigidez del material obtenido. Hasta los porcentajes de cemento utilizados en este trabajo, el crecimiento en la resistencia y rigidez del material es del tipo exponencial. La incorporación de fibra de polipropileno en la masa de suelo sin la incorporación de cemento, mejora al desempeño de la mezcla controlando los niveles de expansión. La fibra de polipropileno aporta mayor consistencia al material, mejorando su ductilidad. Se ha verificado que la resistencia a la tracción aumenta con el contenido de cemento, este efecto ha sido verificado en muestras saturadas y no saturadas.

La combinación del suelo loésico con fibras de polipropileno indica que el incremento de resistencia a tracción es más clara, que el incremento de resistencia a compresión simple. Se observó una disminución en los valores CBR del material sin inundar, y un incremento en el material inundado producto de la incorporación de fibras. En principio, puede que el incremento en el material inundado se encuentre ligado a la reduc-

ción del hinchamiento. No obstante, para formular una explicación general de este comportamiento se deberán efectuar ensayos complementarios de compresión simple y CBR con suelo limoso compactado, en donde se amplíen los contenidos de fibra empleados. El agregado de fibra al suelo limoso compactado reduce el hinchamiento medido en moldes CBR bajo condición de inundación.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, y al Departamento de Ingeniería Civil, de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional y a los integrantes del Grupo GIGEF. Se agradece especialmente al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba, y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, FONCYT, por los fondos suministrados a través del proyecto PICT.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARRÚA P. Y AIASSA G. 2009.  
Curvas de transferencia de carga horizontal p-y para suelos loésicos.  
*Revista EIA, Vol. 11, pp. 131-143.*
- ARRÚA P., AIASSA G. AND EBERHARDT M. 2012.  
Loess soil stabilized with cement for civil engineering applications.  
*International Journal of Earth Sciences and Engineering. Vol. 05, Nro. 1, pp. 10-18.*
- ARRÚA P., AIASSA G., EBERHARDT M. AND ALERCIA BIGA C. 2011.  
Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation.  
*International Journal of GEOMATE. Vol. 01, Nro. 2, pp. 130-135.*
- BAHAR R., BENAZZOUG M., KENAI S. 2004.  
Performance of compacted cement-stabilised soil.  
*Cement & Concrete Composites 26: 811-820*
- CLARIÁ J.J. Y VETTORELO P.V. 2010.  
Refuerzo de arenas mediante la adición de fibras sintéticas.  
*XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Mendoza, Argentina.*
- CONSOLI N.C., PRIETTO P.N. AND ULBRICH L.A. 1998.  
Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil.  
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 124, Nro. 12, pp. 1211-1214.*
- GAYNOR, R. D.; MEININGER, R. C. AND KHAN, T. S. 1985.  
Effects of Temperature and Delivery Time on Concrete Proportions.  
*Temperature Effects on Concrete. STP-858, ASTM, Philadelphia: 68-87.*
- GOODARY R., LECOMTE-NANA G.L., PETIT C., AND SMITH D.S. 2012.  
Investigation of the strength development in cement-stabilised soils of volcanic origin.  
*Construction and Building Materials. Vol. 28, pp. 592-598.*
- HAOFENG XING, XIAOMING YANG, CHAO XU AND GUANBAO YE 2009.  
Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement.  
*Engineering Geology, 103, p. 33-38.*
- HAZIRBABA K. AND GULLU H. (2010).  
California Bearing Ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid.  
*Cold Regions Science and Technology. Vol. 63, pp. 50-60.*
- KUMAR A., WALIA B.S. AND MOHAN J. 2006.  
Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay.  
*Construction and Building Materials. Vol. 20, pp. 1063-1068.*
- LIU J., WANG T. AND TIAN, Y. 2010.  
Experimental Study on the Dynamic Properties of Cement- and Lime-Modified Clay Subjected to Freeze-Thaw Cycles.  
*Cold Regions Science and Technology, 61, 1, pp. 29-33.*

- MILLOGO Y., HAJJAJI M., OUEDRAOGO R. AND GOMINA M. 2008.  
Cement-lateritic gravels mixtures: Microstructure and strength characteristics.  
*Construction and Building Materials*. Vol. 22, pp. 2078-2086.
- OYEDIRAN I.A. AND KALEJAIYE M. 2011.  
Effect of increasing cement content on strength and compaction parameters of some lateritic soils from southwestern Nigeria.  
*The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 16, pp. 1501-1514.
- PLÉ O. AND LÊ T.N.H. 2012.  
Effect of polypropylene fiber-reinforced on the mechanical behavior of silty clay.  
*Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 32, pp. 111-116.
- RAYMOND N. YONG, VAHID R. OUHADI, 2007.  
Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils.  
*Applied Clay Science* 35: 238-249
- REGINATTO A. (1970).  
Suelos colapsibles. Predicción de la Susceptibilidad al Colapso.  
*2º Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*. Córdoba, Argentina.
- ROCCA R., REDOLFI E. Y TERZARIOL R. 2006.  
Características geotécnicas de los loess de argentina.  
*Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2) 149-166
- SIDDIQUE A. AND RAJBONGSHI B. 2002.  
Mechanical properties of a cement stabilized coastal soil for use in road construction.  
*Journal of Civil Engineering*. Vol. 30, N°1, pp. 51-67.
- TANG C., SHI B., GAO W., CHEN F. AND CAI Y. 2007.  
Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayed soil.  
*Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 25, pp. 194-202.
- YETIMOGLU T., INANIR M. AND INANIR O.E. 2005.  
A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fill overlying soft clay.  
*Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 23, pp. 174-183.
- ZÁRATE M. 2003.  
Loess of southern South America.  
*Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 1987-2006.