

Mejoramiento por compactación y conformación de materiales compuestos en suelos limosos de Córdoba

G. M. Aiassa, P. A. Arrúa y M. G. Eberhardt

gaiassa@scdt.frc.utn.edu.ar , parrua@cbasicas.frc.utn.edu.ar , meberhardt@civil.frc.utn.edu.ar

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

RESUMEN: Los terraplenes son una de las principales estructuras geotécnicas. Estas estructuras se componen de capas de suelo local compactado apoyadas sobre el manto de suelo natural. Los suelos limosos de origen eólico (loess) corresponden al suelo local ampliamente disponible en las llanuras y sectores pre-serranos de la Provincia de la Córdoba. La inclusión de materiales finos con propiedades reactivas ante la presencia de agua (cemento), o bien materiales gruesos inertes (arenas), mezclados y compactados con suelos limosos locales, permite mejorar las características mecánicas. Por otro lado, en la actualidad se dispone de materiales sintéticos como fibras o geosintéticos que contribuyen a mejorar las propiedades del material compuesto. En este trabajo, se presenta un estudio sobre el mejoramiento de suelos limosos de Córdoba mediante compactación, en forma conjunta con el agregado de cemento y fibra sintética. El trabajo experimental incluye ensayos tipo CBR y compresión simple. Se presenta un análisis a micro escala de las morfologías de partículas por medio de imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados obtenidos permiten concluir sobre mezclas óptimas y especificaciones de compactación convenientes para el empleo de suelos limosos de Córdoba compuesto con cemento y fibra sintética. Las aplicaciones se orientan a su empleo en obras de terraplenes en general, tales como bases viales o plateas de fundación.

Palabras clave: LIMOS – MEJORAMIENTO – COMPRESIÓN

ABSTRACT: The embankments are one of the main geotechnical structures. These structures are composed of layers of compacted local soil on the natural soil. Silty soils of aeolian origin (loess) are widely available to local soil in the plains and near mountain areas of the Cordoba Province. The inclusion of fine materials with reactive properties in the presence of water (cement), or coarse inert materials (sand), mixed and compacted with local silty soils, improves the mechanical properties. Furthermore, currently available synthetic materials such as fibers or geosynthetic that contributes to improve the properties of the composite. In this paper, we present a study of silty soil from Cordoba improvement by compaction, together with the addition of cement, and synthetic fiber. The experimental work includes CBR tests and unconfined compression. It is Presents a micro-scale analysis of the morphologies of particles through images of scanning electron microscopy (SEM). The results obtained lead to the conclusion on optimal mixture and compaction specifications suitable for the use of silty soils from Cordoba in compacted embankment works. The applications are aimed at use in construction of embankments in general, such as road base or raft foundation.

KEY WORDS: SILTS – IMPROVEMENT – COMPRESSION

1 INTRODUCCIÓN

Los suelos loésicos presentan una mineralogía con un elevado contenido de componentes de origen volcánico [1]. 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 [2].

Con la adición de agentes cementantes se busca estabilizar el material. Las condiciones ambientales, como la temperatura y humedad, influyen de forma significativa en las características resistentes de las mezclas suelo-aglomerante [3]. 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 [4]. 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 [6, 10, 11, 12, 13].

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 [18, 19] y suelo-cemento [14, 15, 16, 17]. El agregado de cemento y fibras a los suelos limosos locales, ha permitido generar un material noble y de costos reducidos, aplicable a diversas obras de ingeniería civil.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características del suelo

El suelo empleado en este trabajo ha sido extraído del sector sur de la Ciudad de Córdoba. Este sector se designa geomorfológicamente como zona IV, y corresponde a las formaciones geológicas Post-Pampeanas y Pampeana [5]. Las principales propiedades físicas del suelo en estudio se presentan en la Tabla 1. 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. La Fig. 1 la micrografía de la muestra. La partícula grande corresponde a limo, y la más pequeña a arcilla.

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo utilizado

Propiedad	Unidad	Valor
Gravedad específica	---	2,68
Límite líquido	%	26,7
Límite plástico	%	22,2
Índice Plástico	%	4,4
Partículas <0,250 mm	%	100
Partículas <0,075 mm	%	97
Partículas <0,002 mm	%	5
Clasificación	---	ML
Peso Unitario Máximo (Proctor Estándar)	kN/m ³	16,8
Humedad óptima (Proctor Estándar)	%	19,2

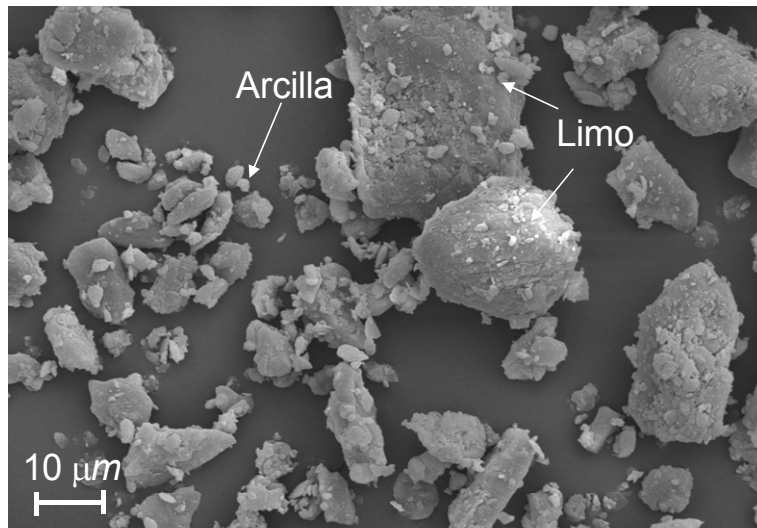


Figura 1. Micrografía del suelo limoso de Córdoba.

2.2 Materiales agregados

Se utilizaron fibras sintéticas, inertes químicamente, fabricadas con polímeros vírgenes de polipropileno en hilos independientes de 19 mm de longitud (Fig. 2). En general, estas fibras se utilizan en morteros y hormigón y provén un refuerzo adicional y protege al hormigón de esfuerzos de tracción [6]. De esta forma, se reducen las fisuras y la permeabilidad.

Por otro lado se utilizó cemento comercial Portland normal. Ambos materiales fueron incorporados a la matriz de suelo en diferentes porcentajes, y posteriormente compactada en el molde correspondiente.

La Fig. 3 presenta una imagen de las partículas de cemento Portland obtenidas mediante microscopio electrónico. Puede observarse que las mismas son inferiores a las del suelo limoso. La Fig. 4 muestra una imagen de mezcla suelo-cemento para un contenido de cemento en peso igual al 15%. Cuando el contenido de cemento es suficiente, se desarrolla una cementación estable que establece vínculos entre las partículas de limo. Este fenómeno provoca un incremento de rigidez y resistencia en las mezclas suelo-cemento. Las elipses indican en la Fig. 4 las zonas en las que se desarrollaron los vínculos productos del proceso de hidratación.



Figura 2. Fibra sintética de 19 mm incorporada al suelo limoso.

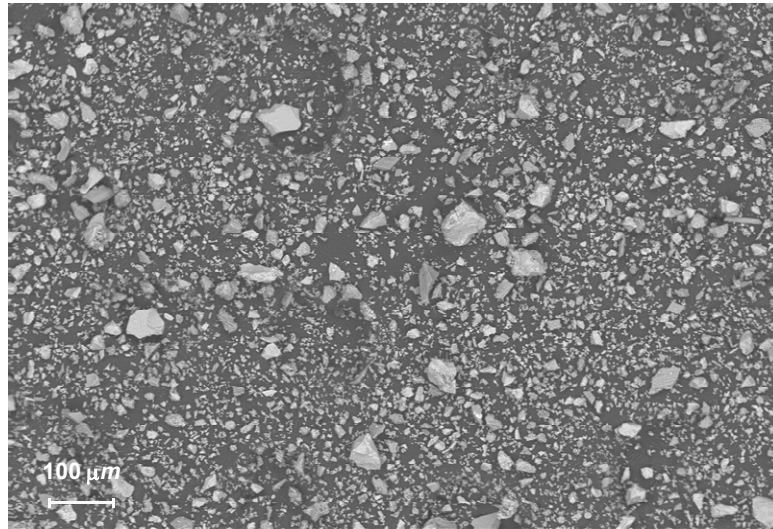


Figura 3. Micrografía del cemento Portland utilizado.

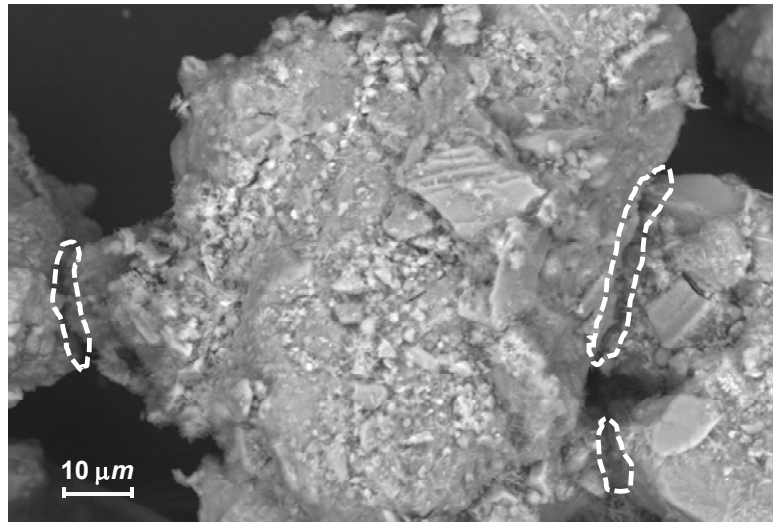


Figura 4. Micrografía muestra suelo-cemento al 15% de contenido de cemento.

2.3 Ensayos

Se efectuaron dos tipos de ensayos de compresión. Se efectuaron ensayos de compresión simple y ensayos de compresión del material confinado en el molde de compactación tipo CBR (California Bearing Ratio). En ambos casos se empleó una prensa mecánica instrumentada con una celda de carga con capacidad de 50kN y un comparador digital para el registro de los desplazamientos con una precisión de 0,001 mm.

En las muestras preparadas dentro de los moldes CBR se variaron los porcentajes de fibra sintética agregada y el contenido de cemento. Se consideraron ensayos sobre la muestra compactada parcialmente saturada, y luego de un proceso de inundación superior a 150 horas, período en el que verificó la estabilización del proceso de expansión. Para el cemento se contempló también como variable el tiempo de curado. En este casos las muestras se prepararon en el molde por compactación dinámica, con la energía Proctor Estándar. El peso unitario seco, γ_d , aproximado que resultó en las muestras luego del proceso de compactación fue de 16 kN/m³, para la humedad gravimétrica utilizada en la compactación, w ,

de 19%. Los ensayos de compresión se efectuaron mediante el pistón de 49,6 mm de diámetro, y con una sobrecarga de 45 N.

Para las muestras ensayadas a compresión simple se utilizaron contenidos de cemento (C.c.) de: 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10% y 15%. Se construyeron muestras bajo diferentes condiciones de humedad para distintos tiempos y temperaturas de curado. La compactación estática de las muestras se realizó en moldes cilíndricos metálicos (H=100mm, D=50mm, e=6mm). Las muestras se generaron por compactación dentro del molde, a condición de peso unitario seco constante. La construcción de las mismas se realizó en tres capas iguales con escarificación entre las mismas. Posteriormente, fueron extraídas del molde mediante un extractor hidráulico. Las probetas obtenidas se acopiaron hasta la edad de ensayo. Las mismas fueron clasificadas y dispuestas en diferentes condiciones de curado. Se adoptaron diferentes temperaturas variables entre -20°C a 120°C. Finalizado el tiempo de curado, se dividieron las muestras en dos grupos. Uno se ensayó en forma inmediata en su condición natural (muestras secas), y el otro fue sometido a inundación por un período de 24 horas (muestras saturadas). Durante el período de inundación se registraron variaciones en las dimensiones de las probetas, sin la aplicación de ninguna carga. El grupo de muestras que se ensayó luego de la saturación, fue construido con los porcentajes de cemento indicado, bajo idénticas condiciones de compactación y curado que las muestras ensayadas en condición natural. El tiempo adoptado para el curado fue de 15 días. La Fig. 5, presenta los moldes de compactación empleados para la construcción de las muestras y la rotura típica a compresión no confinada, que posee una serie de muestras con diferentes porcentajes de cemento.

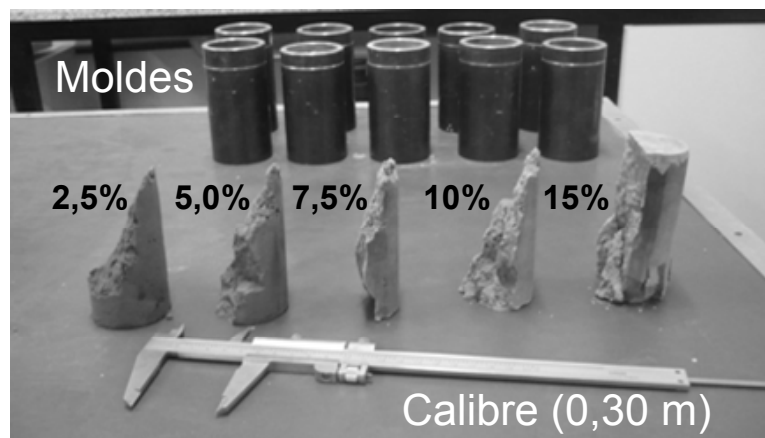


Figura 5. Moldes utilizados para ensayos de compresión simple y típica falla de muestras suelo-cemento con diferentes contenidos de cemento [8].

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 *Compresión simple*

La Fig. 6 presenta los resultados de compresión no confinada sobre muestras curadas a 20 °C, durante 15 días, a 15 kN/m³ de peso unitario seco aproximadamente, para diferentes porcentajes de humedad inicial a diferentes contenidos de cemento. Se observa que, a valores extremos del contenido de humedad la resistencia a la compresión disminuye, cualquiera sea el contenido de cemento que posee la probeta. Se presume que ésta tendencia puede estar provocada por el déficit y exceso de agua disponible en la matriz del suelo para la hidratación de las partículas del cemento. Los resultados obtenidos permiten definir una humedad óptima de hidratación del cemento, para la cual se producen las mayores resistencias a compresión, y que oscila entre el 19% y 21% independientemente del porcentaje de cemento.

El contenido de cemento proporciona estabilidad entre las partículas. Si se consideran los valores máximos de resistencia, para cada porcentaje de cemento en peso de suelo seco, se obtiene una tendencia

exponencial para los contenidos de cementos utilizados (Fig. 7). La dispersión de los resultados establece un límite superior e inferior que posibilita el análisis de resistencia característica, producto de las leves modificaciones en las condiciones de fabricación, distribución de humedad en el suelo, aglomeración de material, etc. Los resultados obtenidos señalan que es posible esperar variaciones ± 1 MN/m² para un mismo contenido de cemento.

La Fig. 8 presenta resultados sobre la influencia de la temperatura de curado en la resistencia a compresión no confinada. Las muestras fueron almacenadas en refrigerador, piletas de curado y estufa con regulación controlada de temperatura. Se aprecia que existe un óptimo entre 20 °C y 30 °C. Luego la resistencia a compresión no confinada decae hasta un 40 % para condiciones de temperatura extremas. El decaimiento en la resistencia sobre los extremos superior e inferior de temperatura, podría ser el resultado de la inhibición por congelamiento o evaporación del agua disponible para la hidratación del cemento, lo cual impediría el fragüe y la generación de vínculos cementados entre partículas. La menor resistencia en los resultados se presenta para bajas temperaturas, posiblemente por el incremento de volumen del agua contenida en la matriz de suelo además de la disminución del agua disponible para la hidratación.

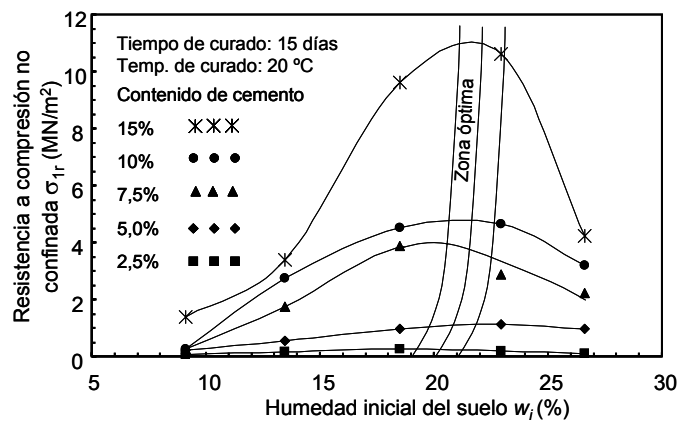


Figura 6. Variación de la resistencia a compresión con la humedad inicial del suelo [8,9].

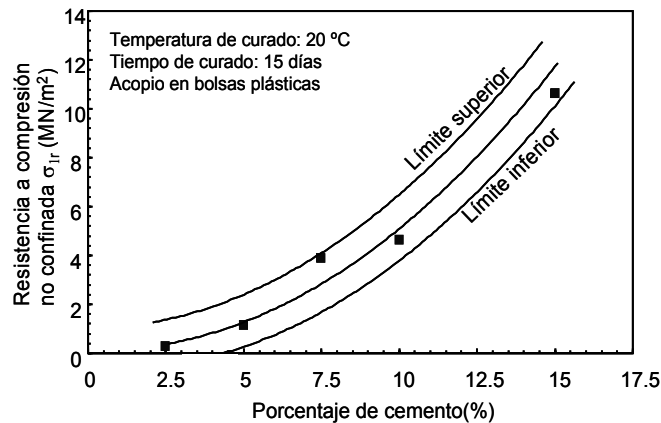


Figura 7. Influencia del contenido de cemento en la resistencia a compresión máxima [8,9].

El tiempo de curado tiene influencia en los valores de resistencia obtenida. Para evaluar la ganancia de resistencia con el tiempo se fabricaron muestras al 9% de contenido de cemento, 21% de contenido de humedad inicial y se conservaron a 20 °C. De esta forma, se conservaron constantes las condiciones de fabricación de las muestras, así como la temperatura durante el período de curado. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 9. Puede notarse que a edades tempranas inferiores a 15 días, se produce una ganancia instantánea de resistencia por hidratación de las partículas de cemento. Esto permite definir

un modelo reológico de comportamiento bilineal con un punto de cambio de pendiente que ocurre aproximadamente a los 15 días de edad.

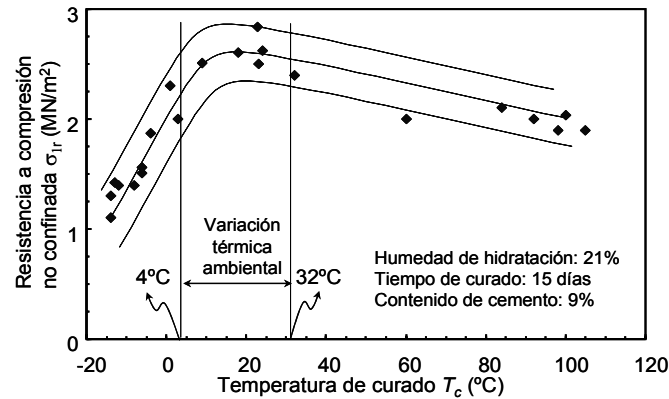


Figura 8. Variación de la resistencia a compresión no confinada con la temperatura de curado [8,9].

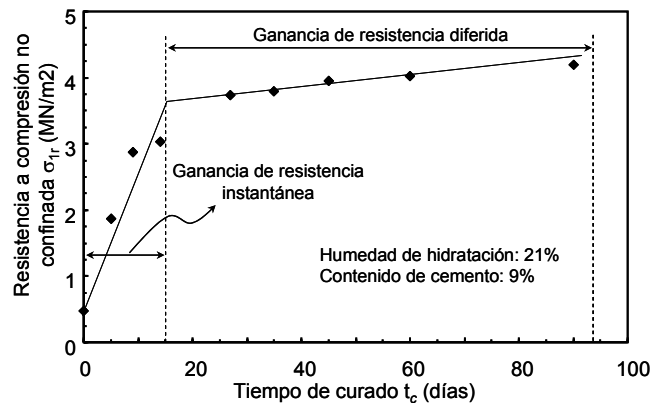


Figura 9. Variación de la resistencia a compresión no confinada con el tiempo de curado [8,9].

3.2 Compresión CBR

En el primer grupo de ensayos de compresión tipo CBR se consideró el agregado de fibra en diferentes porcentajes. Los ensayos de compresión se realizaron a humedad de compactación, en el momento posterior a que la muestra fue confeccionada, y luego de un proceso de inundación por un periodo de 150 horas con la sobrecarga de 45 N. Durante el proceso de inundación, se registraron hinchamientos a lo largo del tiempo y en todos los casos se alcanzó la estabilización del proceso. Los resultados señalan una contribución de las fibras en la reducción de la expansión (Fig. 10). 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.

Los resultados del ensayo CBR se determinaron para una penetración del pistón de 2,54 mm (Fig. 11). 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 los ensayos de compresión tipo CBR también se evaluó la influencia del contenido de cemento. Los resultados se presentan en la Fig. 12, para muestras con 7 días de edad. El incremento en el contenido de cemento mejora considerablemente la rigidez del material.

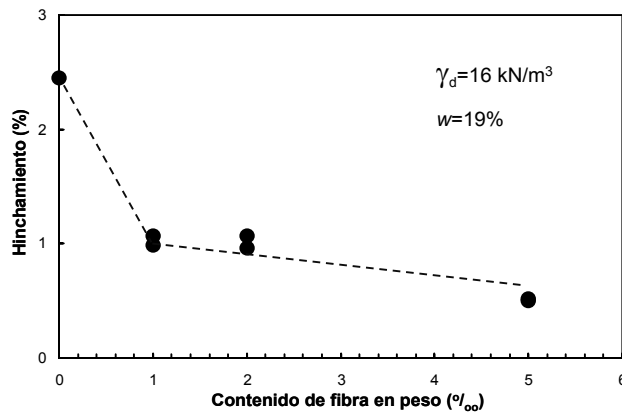


Figura 10. Resultado de hinchamiento en las muestras luego de un proceso de inundación durante 150 horas.

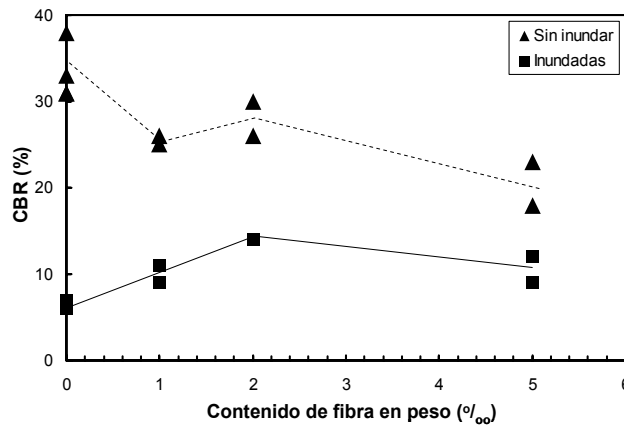


Figura 11. Valor CBR del suelo limoso sin inundar y luego de 150 horas de inundación. En todos los casos $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$, $w = 19\%$.

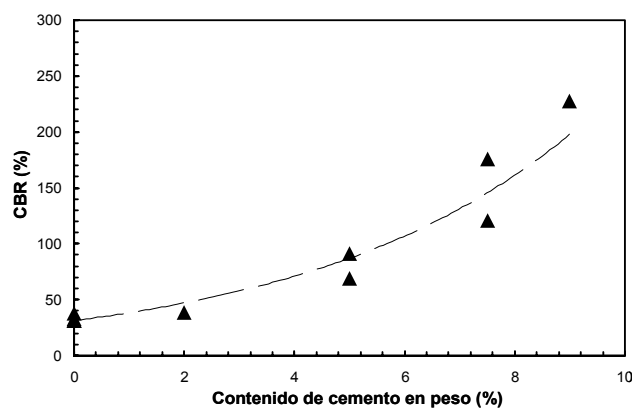


Figura 12. Valor CBR del suelo limoso con diferentes contenidos de cemento. Edad de muestras: 7 días

4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales y el análisis presentado, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- 1) El valor de humedad gravimétrica inicial de las muestras que aporta la mayor resistencia a la compresión simple, independientemente del porcentaje de cemento, oscila alrededor del 20%.
 - 2) El peso unitario que permite confeccionar muestras con facilidad para efectuar ensayos de compresión simple, es de 15kN/m³. El mismo puede tomarse de referencia para evaluar las otras variables.
 - 3) Las temperaturas extremas de curado influyen de manera significativa en el proceso de hidratación del cemento. A temperaturas ambiente (entre 15 y 20 °C) los resultados obtenidos muestran los mayores valores de resistencia a la compresión simple.
 - 4) El tiempo de curado provoca un incremento de resistencia. Los resultados obtenidos, muestran que a 15 días se ha logrado el 80% de la resistencia a largo plazo.
 - 5) 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.
 - 6) El agregado de fibra al suelo limoso compactado reduce el hinchamiento medido en moldes CBR bajo condición de inundación.
 - 7) El comportamiento mecánico del material se ha modificado producto de la incorporación de fibra. Se observó una disminución en los valores CBR del material sin inundar, y un incremento en el material inundado. En principio, puede que el incremento en el material inundado se encuentre ligado a la reducción 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.
- En estudios futuros se planea evaluar el efecto combinado de fibra y cemento, e incrementar el contenido de fibra y cemento más allá de los adoptados para este trabajo. Por otro lado, se propone evaluar estas variables mediante otro tipo de ensayos a mayor escala, como pequeños terraplenes de prueba a escala de laboratorio o campo.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaria de Ciencia y Tecnología, al Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo brindado para la ejecución del trabajo. 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.

6 REFERENCIAS

- [1] Zárate M. (2003). *Loess of southern South America*. Quaternary Science Reviews, Vol. 22, pp. 1987-2006.
- [2] Arrúa P. y Aiassa G. (2009). *Curvas de transferencia de carga horizontal p-y para suelos loésicos*. Revista EIA, Vol. 11, pp. 131-143.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Reginatto A. (1970). Suelos colapsibles. Predicción de la Susceptibilidad al Colapso. 2º Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Córdoba, Argentina.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Arrúa P., Aiassa G., Eberhardt M., y Alercia I. (2011). *Estabilización de Suelos loésicos mediante la incorporación de un aglomerante mineral*. 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Toronto, Ontario, Canadá, Octubre 2011.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.