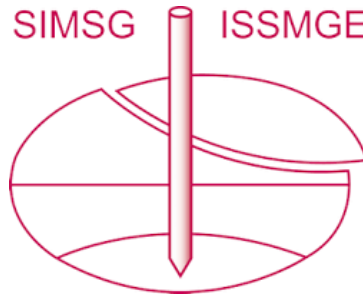


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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

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

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

Estabilización de suelos loessicos mediante la incorporación de un aglomerante mineral

Pedro A. Arrúa, Gonzalo M. Aiassa & Marcelo G. Eberhardt
*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, GIGEF
Grupo de Investigación y transferencia en Geotecnia, Estructuras y
Fundaciones, Departamento de Ingeniería Civil, Córdoba, Argentina.*

Inés C. Alercia

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Grupo GIGEF, Departamento de Ingeniería Civil, Córdoba, Argentina.



ABSTRACT

In the center of Argentina, many construction companies of geotechnical structures have used mixes of silty soil and cement to improve soil behavior. At design stage a certain dosification is proposed. After construction, an evaluation of the material is obtained by CBR tests (California Bearing Ratio), DCP (Dynamic Cone Penetration) or UC (Unconfined Compression). In relation to stiffness and strength, there is uncertainty with respect to influence of the moisture content at mixing time, this related to temperature and curing time.

In this paper, we present the results of experimental program to establish optimal conditions of temperature, soil water content, soil-binder and stiffness in collapsible soils. The experimental results showed that a proper choice of the initial conditions in the soil investigated improve the final performance of material obtained.

RESUMEN

En el centro de Argentina numerosas empresas han empleado el limo loésico para la construcción de estructuras geotécnicas con adición de agentes cementantes en búsqueda de mejoras tenso-deformacionales. Generalmente en la etapa de diseño, el contratista procura establecer porcentajes de suelo-aglomerante para la confección de las mezclas. Una vez ejecutada la obra, se realiza una evaluación del material obtenido con ensayos de tipo CBR (*California Bearing Ratio*), DCP (*Dynamic Cone Penetration*) o UC (*Unconfined Compression*). Pero en relación a la rigidez y resistencia, poco se conoce sobre la influencia de la humedad inicial del suelo al momento del mezclado, relación con la temperatura y tiempo de curado.

En este trabajo se presentan los resultados de un programa experimental cuyo objetivo ha consistido en establecer las condiciones óptimas de temperatura, humedad, relación suelo-aglomerante y variación de rigidez-resistencia en el tiempo para mezclas de loess colapsable y cementante. Los resultados obtenidos, muestran que las condiciones iniciales al momento de generación de mezclas provocan una gran influencia en el desempeño final del nuevo material obtenido.

1 INTRODUCCIÓN

Un problema que enfrentan los constructores de estructuras geotécnicas en el centro de Argentina se presenta cuando pretenden estabilizar suelo con aglomerantes minerales para reducir los costos directos. Esto frecuentemente conlleva enfrentamientos entre la inspección y quien lleva adelante la obra, sobre los resultados obtenidos en el proceso de compactación.

El problema surge cuando se pretende caracterizar la rigidez y resistencia del paquete estructural in situ y a largo plazo. Generalmente se discute sobre la metodología a emplear para los ensayos en campo y su relación con las hipótesis adoptadas en el cálculo durante la etapa de diseño. Las importantes diferencias entre los resultados obtenidos en campo y laboratorio, hacen necesario un estudio que permita establecer como influyen las condiciones de estabilización y curado del material.

En la región existen grandes depósitos disponibles de suelos limosos de origen eólico tipo CL-ML (Quintana

Salvat y Barbeito 2000). Estos materiales poseen alta relación de vacíos y un comportamiento altamente inestable cuando se modifica su estado tensional inicial o el contenido de humedad (Aiassa y Arrúa 2009).

La experiencia empírica en la práctica ingenieril indica que las condiciones ambientales, las proporciones de mezcla del material, junto a una buena técnica constructiva hace la diferencia entre paquetes estructurales de bajo o alto desempeño (Haofeng et al. 2009, Li Chen y Deng-Fong 2009).

La elaboración controlada de materiales mejorados mediante compactación o incorporación de agentes cementantes requiere de condiciones meteorológicas favorables. La zona central de Argentina se caracteriza por su clima tipo templado pampeano-serrano, con sectores de transición a clima semiárido y árido. Estas condiciones permiten controlar en obra sin grandes dificultades, el contenido de humedad inicial del suelo al momento del mezclado (Aiassa y Arrúa 2007).

Las condiciones climáticas, en particular temperatura y humedad, influyen de forma importante en las

características resistentes de las mezclas suelo-aglomerante. La cantidad de aglomerante incorporado (en % de peso), se relaciona generalmente con la resistencia y rigidez asignada al material en la etapa de diseño y cálculo. No obstante, esta definición puede ser insuficiente si no se consideran en las resistencias finales alcanzadas, producto de las condiciones ambientales a las que se encuentra sometido el material en obra durante la etapa de hidratación. La variación térmica es un indicador de los porcentajes necesarios de aglomerante para lograr la rigidez y resistencia contempladas en los modelos de material empleado en el cálculo.

En este trabajo se ha desarrollado un programa experimental de laboratorio que permite establecer la influencia aislada o combinada del porcentaje suelo-aglomerante, humedad inicial de la matriz del suelo, la temperatura de curado, en la rigidez y resistencia del material resultante.

Los resultados obtenidos, muestran que es posible definir las condiciones iniciales de elaboración de las mezclas para lograr los supuestos considerados en la etapa de diseño.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Suelo loésico

El suelo empleado en este trabajo ha sido extraído de un depósito ubicado en el sector sur de la ciudad de Córdoba, Argentina, designada geomorfológicamente como zona IV, correspondiente a las formaciones geológicas "Post-Pampeanas" y "Pampeana" (Rocca y Quintana Crespo 1997, Zárate 2003).

La Figura 1 presenta los resultados de una perforación con barreno mecánico hasta 110 metros de profundidad empleado en la caracterización e identificación del perfil estratigráfico.

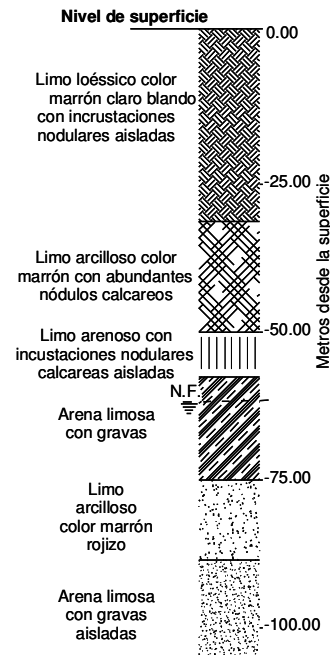


Figura 1. Perfil estratigráfico típico del sector sur de Córdoba

Se muestra que los primeros 30 metros corresponden a limo blando color marrón con incrustaciones cementadas aisladas de características inestables y propensos al colapso por incremento aislado o combinado de humedad y nivel tensional. Éste material es el frecuentemente empleado en la construcción de las estructuras geotécnicas.

Los valores promedio de las principales propiedades físicas, químicas y mecánicas de la matriz de suelo hasta 25 metros de profundidad se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características 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 ³]	12.5 – 13.5
	Gravedad específica	2.66 – 2.67
	Índice (<i>Dinamic Cone Penetration</i>) (mm/golpe)	18 – 24
Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	23.0 – 30.0
	Índice de plasticidad	4.2 – 4.9
Composición química	Silicio (%) (SiO ₂)	65
	Aluminio (%) (Al ₂ O ₃)	15
	Óxido de hierro (%) (Fe ₂ O ₂)	5
	Óxido de calcio (%) (CaO)	3
	Óxido de sodio (%) (Na ₂ O)	3
	Otros (%)	9
Tamaño de partículas	Pasante tamiz (#200) (%)	85 – 95

	Contenido de arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) (%)	7.0 – 10.0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Máxima densidad seca (KN/m^3)	16.4 – 17.0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Contenido de humedad óptima (%)	18.5 – 20.0
Ensayo Proctor (ASTM D698)	Índice (<i>Dinamic Cone Penetration</i>) (mm/golpe)	4 – 8

Debido a que las características tensodeformacionales inherentes de los suelos se encuentran en relación directa con la forma de sus partículas y el vínculo entre ellas (Mitchell y Soga 2005), se han tomado fotografías microscópicas (Microscopio electrónico de barrido LEO 1450 VP) para establecer la rugosidad y esfericidad del limo arcilloso (Figura 2).

A partir de la rugosidad y forma de la partícula, es posible establecer el ángulo de fricción crítico o residual (ϕ), con el ajuste lineal propuesto por Santamarina y Cho (2004), tal como se muestra en la ecuación [1]:

$$\phi_r = 42 - 17 R = 42^\circ - 17^\circ \cdot 0.8 \approx 28^\circ \quad [1]$$

Siendo, R = coeficiente de forma. El ángulo de fricción obtenido por la ecuación es acorde a los resultados de ensayos triaxiales consolidados y drenados (Aiassa et al. 2011).

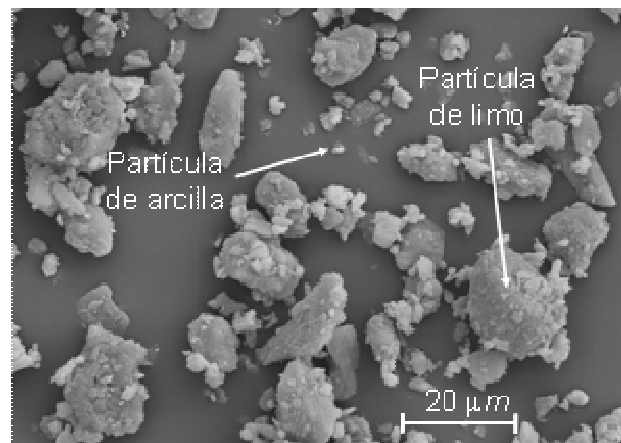


Figura 2: Microfotografía de las partículas de loess

2.2 Mezclas de suelo-cemento investigadas

Como aglomerante de estabilización se empleó cemento Portland Normal (CP40) en porcentajes de peso seco del 2.5%, 5.0%, 7.5%, 10% y 15%. Se construyeron muestras bajo diferentes condiciones humedad para distintos tiempos y temperaturas de curado.

2.3 Preparación de los materiales para ensayo

El suelo extraído del yacimiento presentado en la Figura 1, 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 en diferentes proporciones, mezclando de manera manual e intensa durante al menos 3 minutos. Finalmente, se acopió la mezcla en doble bolsa plástica de poliestireno de alta densidad hasta la construcción de las mezclas.

2.4 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. 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.

Las probetas obtenidas se acopiaron en bolsas plásticas hasta la edad de ensayo, clasificadas y dispuestas en estufa, refrigerador o inmersión según las temperaturas designadas para el curado. El rango de temperaturas empleadas para la conservación de las muestras se comprende entre -20°C hasta 120°C .

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 (Bahar et al. 2004, Raymond et al. 2007). 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. La Figura 3, presenta los moldes empleados y la rotura típica que posee una serie de muestras con diferentes porcentajes de cemento.



Figura 3: Rotura típica de una serie de ensayos

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Influencia del contenido de humedad inicial

En estado natural, las partículas de limo se encuentran vinculadas por puentes cementados que rigidizan la matriz y son las responsables de la estructura estable cuando el suelo se encuentra en condición inalterada (Mitchell y Soga 2005). Durante la inundación, se produce colapso espontáneo por disolución de los agentes cementantes generalmente carbonatos de calcio (Lu y Likos 2004). En base a estas consideraciones se intenta reproducir la vinculación entre partículas con un aglomerante que no pierda su rigidez y resistencia durante el proceso de variación de las condiciones de humedad.

La Figura 4 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.

Las curvas muestran 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.

La Figura 4 permite 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.

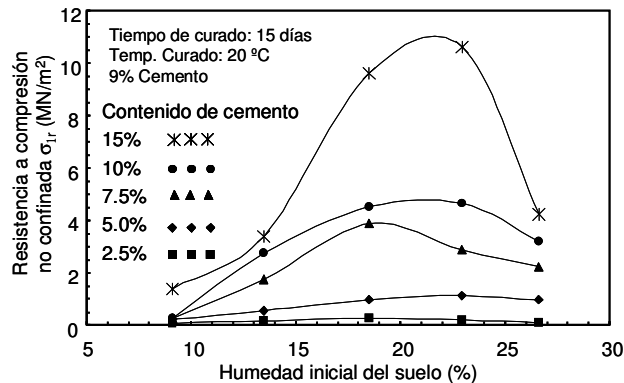


Figura 4. Variación de la resistencia a compresión con la humedad inicial del suelo

Por su parte, el contenido de cemento proporciona la estabilidad entre partículas. Si se consideran los valores máximos de resistencia para cada porcentaje de cemento en peso de suelo seco, se obtiene la tendencia exponencial presentada en la Figura 5.

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.

Tal como se muestra en la Figura 5, es posible esperar variaciones de hasta 1 MN/m² para un mismo porcentaje de cemento. La cuantificación de la dispersión

de los resultados requiere un análisis probabilístico, donde una Función de Distribución de Probabilidades (FDP) permita definir una resistencia media (σ_{sm}) y la resistencia característica (σ_{sk}) de la mezcla estabilizada (Harr 1987).

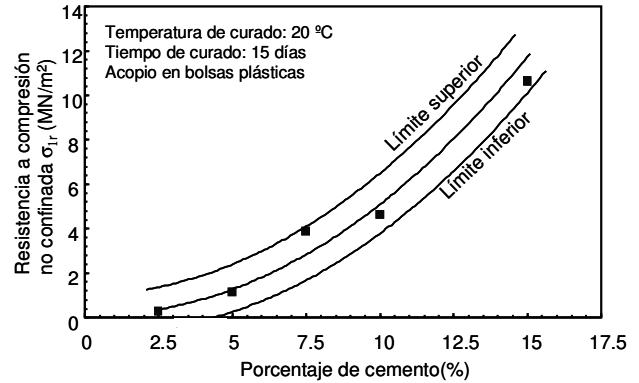


Figura 5. Influencia del contenido de cemento en la resistencia a compresión máxima

La Figura 6 presenta el histograma y una curva de distribución gaussiana ajustada a los resultados de compresión no confinada obtenida sobre 40 especímenes preparados de la misma mezcla de material, con igual peso unitario seco, contenido de humedad, tiempo y temperatura de curado.

Los resultados indican que el valor medio de tensión de rotura es de 3 MN/m², siendo la resistencia característica de 2 MN/m², entendida como el valor para el cual el 95% de los resultados superan la magnitud indicada. Esto permite establecer el coeficiente de variación (COV) como indicador de la certeza en la obtención de mezclas de diseño, y se establece como la relación entre la desviación estándar y la media. Para la serie de ensayos ejecutados el COV=0,15.

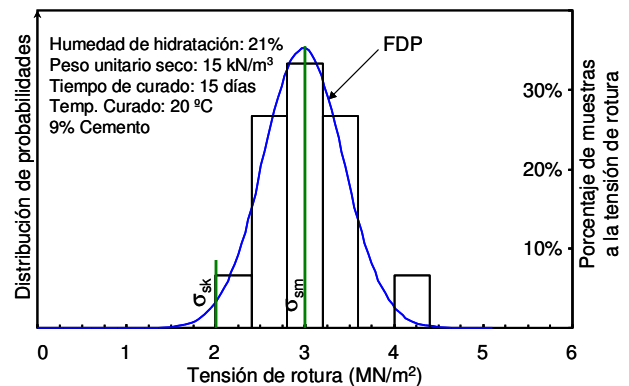


Figura 6. Distribución de probabilidad para muestras de iguales condiciones de fabricación

3.2 Influencia del peso unitario de compactación

Diferentes autores han mostrado que el nivel de compactación sobre muestras de suelo modifica su condición de resistencia y estabilidad (Seed et al. 1960,

Attom 1997, Rollins et al. 1998, Cetin et al. 2007). Para evaluar el incremento de resistencia con el nivel de compactación se han construido 24 muestras al 9% de contenido de cemento. Se muestra en la Figura 7, la tendencia lineal que permite relacionar la tensión vertical de rotura en MN/m^2 (σ_{1r}), con el peso unitario seco en kN/m^3 (γ_d) a partir de la ecuación:

$$\sigma_{1r} = 1.04 \gamma_d - 12.7 \quad [2]$$

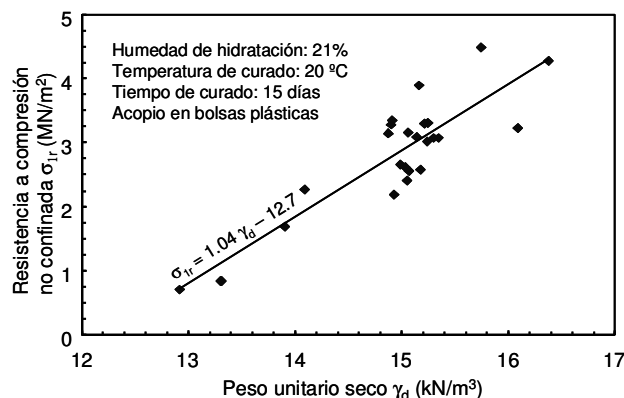


Figura 7. Variación de la resistencia a compresión con el incremento de peso unitario seco

La experiencia obtenida en este trabajo, en la fabricación de muestras compactadas estáticamente, indica que valores de pesos unitarios inferiores a 15 kN/m^3 no presentan ningún problema operativo. Los autores consideran que 15 kN/m^3 es un nivel adecuado para la ejecución de tareas constructivas en campo, mientras que valores superiores a 16 kN/m^3 la energía de compactación es elevada lo que genera grandes complicaciones para su obtención y fabricación.

3.3 Influencia de la temperatura de curado

En trabajos de compactación en campo, las condiciones de temperatura son poco controlables. No obstante, en el centro de Argentina las variaciones son de baja magnitud. Y resulta de importancia conocer la modificación de resistencia que sufre el material por la acción aislada de temperatura. La Tabla 2, muestra los antecedentes históricos de la región.

Tabla 2. Temperatura máxima/mínima promedio entre 1873-2010

Estación	Máxima	Mínima	Fuente
Primavera	26	10.3	República Argentina. Ministerio de Defensa. Servicio Meteorológico Nacional*
Verano	31.5	16.1	
Otoño	25	10.8	
Invierno	21	4	

*Latitud: $31^\circ 24'$ Sur. Longitud: $64^\circ 11'$ Oeste. Altitud: 425,00 metros sobre el nivel del mar.

La Figura 8 presenta resultados que relacionan la temperatura de curado y la resistencia a compresión no

confinada. Las muestras fueron almacenadas durante el fraguado 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 extremas.

El decaimiento en la resistencia sobre los extremos superior e inferior de temperatura, puede ocurrir producto de la inhibición por congelamiento o evaporación del agua disponible para la hidratación del cemento, lo cual impide el fragüe y la generación de vínculos cementados entre partículas.

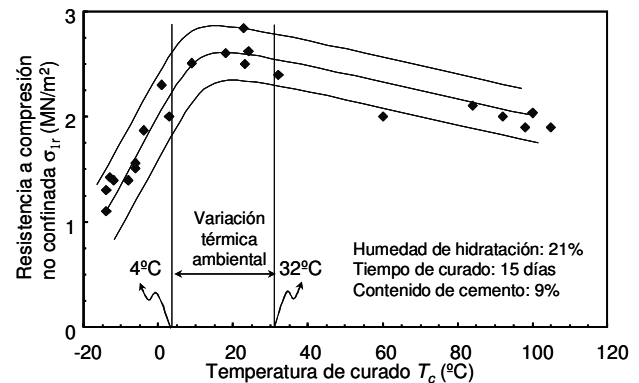


Figura 8. Variación de la resistencia a compresión no confinada con la temperatura de curado

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.

3.4 Influencia del tiempo de curado

La relación entre la resistencia a compresión no confinada con el tiempo de curado para especímenes fabricados al 9% de contenido de cemento, 21% de contenido de humedad inicial y 20°C , se evalúa en la Figura 9.

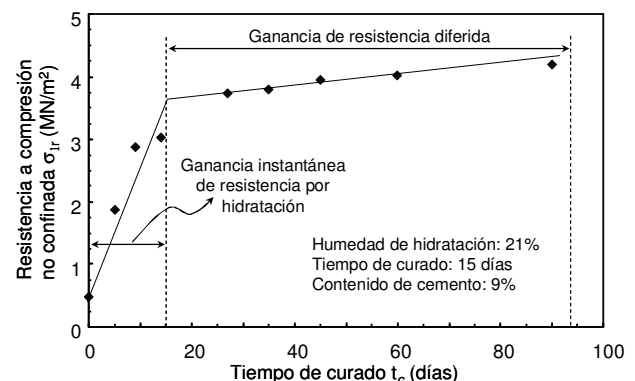


Figura 9. Variación de la resistencia a compresión no confinada con el tiempo de curado

A edades tempranas e inferiores a 15 días, se produce la 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.

A partir del punto de cambio de pendiente se presenta la ganancia de resistencia diferida que no supera el 20% de la resistencia inicial. Es importante notar que existe una resistencia a tiempo cero que tiene relación con la fricción interpartícula y los efectos de succión en el suelo producto de la humedad de compactación.

4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales y el análisis presentado en este trabajo sobre mezclas de suelo loésico del centro de argentina con aglomerante cementicio, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- (1) Las partículas, poseen rugosidad y forma que permiten obtener el ángulo de fricción residual (ϕ_r), equivalente con el ángulo de fricción obtenido de ensayos triaxiales consolidados drenados.
- (2) El valor de humedad gravimétrica inicial de las muestras que aporta la mayor resistencia, independientemente del porcentaje de cemento, oscila alrededor del 20%.
- (3) Con el 9% de cemento en peso, a 20% de humedad y 15 días de curado es posible obtener un material cuya resistencia característica a compresión no confinada es de 2 MN/m^2 .
- (4) El peso unitario que permite fácil fabricación del material compactado es de 15 kN/m^3 . El mismo puede tomarse de referencia para evaluar las otras variables.
- (5) Las temperaturas extremas de curado influyen de manera significativa en el proceso de hidratación del cemento. A temperaturas ambiente los resultados obtenidos muestran las mayores magnitudes de resistencia.
- (6) Tal como se ha relevado en la literatura, 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.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SCyT-UTN, el apoyo del personal del Grupo de Investigación y transferencia en Geotecnia Estructuras y Fundaciones (GIGEF) y al Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Se agradece especialmente al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba, y al FONCYT por el financiamiento PICT-2010-0900.

REFERENCIAS

- ACI 305R (1999). Hot Weather Concreting. American Concrete Institute. Reported by ACI Committee 305
- Aiassa G, Arrúa, P and Eberhardt, M. 2011. Geotechnical and hydrogeological considerations for landfill site selection in Argentina loess region. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. ISSN-0974-5904. (4)1 28-39.
- Aiassa G. y Arrúa P. 2009. Desempeño de barreras sanitarias simples de suelo loésico compactado. *Tecnología y Ciencia*, 8, 17: 24-34.
- Aiassa, G. y Arrúa, P. 2007. Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 (7), 51-61.
- Attom, M.F. 1997. The effect of compactive energy level on some soil properties. *Applied Clay Science*. 12: 61-72.
- Bahar R., Benazzoug M., Kenai S. 2004. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement & Concrete Composites* 26: 811-820
- Cetin, H.; Fener, M.; Söylemez, M. and Günaydin, O. 2007. Soil structure changes during compaction of a cohesive soil. *Engineering Geology*. 92: 38-48.
- 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.
- Haofeng Xing, Xiaoming Yang, Chao Xu, Guanbao Ye, 2009. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement. *Engineering Geology* 103: 33-38.
- Harr, M. 1987. *Reliability-Based Design in Civil Engineering*, Dover Publications, Inc., New York.
- Lachemi, M., Hossain K., Shehata M. y Thaha, W. 2008. Controlled low strength materials incorporating cement kiln dust from various sources. *Cement & Concrete Composites* 30: 381-392.
- Li Chen, Deng-Fong Lin. 2009. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials* 162: 321-327.
- Lu, N. and Likos, W.J. 2004. *Unsaturated soil mechanics*. 1st Edition. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Mitchell J. y Soga K. 2005. *Fundamentals of soil behaviour*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Quintana Salvat F. y Barbeito O.S., 2000. Carta geomorfológica de la Ciudad de Córdoba. *Congreso Nacional del Agua*, Santiago del Estero, Argentina.
- 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
- Rocca, R. y Quintana Crespo, E. 1997. La Gestión de la Información Geotécnica de la Ciudad de Córdoba, GT'97 Congreso Argentino de Ingeniería Geotécnica, Sesión VII: Exploración de Suelos y Zonificación Geotécnica, pp. 1-16.
- Rollins, K., Jorgensen, S. y Ross, T. 1998. Optimum moisture content for dynamic compaction of collapsible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124: 699

- Santamarina C. and Cho G. 2004. Soil Behaviour: The role of particle shape, *Advance in Geotechnical Engineering: The skempton conference*, Thomas Telford, London, (1), 604-617.
- Seed, H.; Mitchell, J. and Chan C. 1960. The strength of compacted Cohesive Soil". *Research Conference on Shear Strength of cohesive soil*, ASCE, University of Colorado, Boulder, Colorado 877-964.
- Zárate, M.A. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*. PERGAMON. 22: 1987-2006.