

# Comportamiento de limos loessicos contaminados con hidrocarburos estabilizados y solidificados con cemento Portland

F. M. Francisca

Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vélez Sarsfield 1611, CP. 5016, Córdoba, Argentina.  
Email: ffrancis@efn.uncor.edu

## RESUMEN

La estabilización/solidificación (E/S) es una de las técnicas más utilizadas para remediar suelos contaminados. El comportamiento obtenido en las mezclas depende en gran medida de los contenidos de contaminante, cementante y tipo de suelo. En este trabajo se presentan resultados experimentales de estabilización de un suelo limoso de origen loésico contaminados con hidrocarburos. Para la estabilización se utilizan distintos contenidos de cemento Portland, determinando en cada caso la conductividad hidráulica y la resistencia a la compresión simple de la mezcla de limo-hidrocarburo-cemento solidificada. Los resultados obtenidos muestran que la caída de resistencia producida por el contaminante orgánico es muy importante en este tipo de suelo. En general, los suelos estabilizados y solidificados alcanzan sólo un 20% de la resistencia determinada para el suelo limpio. Además, la conductividad hidráulica se incrementa significativamente por la presencia de la fase orgánica ya que restringe el acceso del cemento a las superficies de las partículas del suelo. Las muestras contaminadas y estabilizadas resultaron aproximadamente un orden de magnitud más permeables que el mismo suelo sin hidrocarburo.

Palabras clave: cemento, geotecnia, hidrocarburo, Loess, suelo

## ***Behavior of loessical silts contaminated with hydrocarbons and stabilized and solidified with Portland cement***

### ABSTRACT

*Stabilization/Solidification (S/S) is one of the more accepted techniques for the remediation of contaminated soils. The expected behavior depends mainly on the contaminant type and concentration, stabilizing agent content and soil type. This work presents experimental results of the stabilization of a loessical silty soil contaminated with hydrocarbons. The S/S was performed by using Portland cement as stabilizing agent and by controlling the hydraulic conductivity and unconfined strength of the solidified mixtures. Obtained results show that the hydrocarbon produces an extremely high decrease of strength in this type of soils, with upper values close to the 20% of that registered in clean soil mixed with the same amount of cement. In coincidence with this trend, the hydraulic conductivity increases significantly due to the presence of organic contaminants since the cement-particle contact is restricted by the organic phase. Experimental results show that the hydraulic conductivity of the specimens containing encapsulated hydrocarbon increases one order of magnitude.*

*Key words: cement, geotechnique, hydrocarbon, Loess, soil*

## Introducción

En todo proceso productivo e industrial existen riesgos potenciales de contaminación del ambiente (aire, agua o suelo). En el caso particular del suelo, algunas de las fuentes potenciales de contaminación son: a) derrames accidentales de contaminantes, b) pérdidas en tanques de almacenamiento, válvulas o tuberías, c) lixiviado de plantas de tratamiento de residuos químicos, domiciliarios e industriales, d) infiltración de productos químicos, e) aplicación de pesticidas, etc. (Fetter, 1999). Estos contaminantes afectan factores ambientales tales como el suelo, y las aguas superfi-

ciales y subterráneas con los consecuentes riesgos para la sustentación de la vida humana y la función ecológica del agua en el medio ambiente (Irwin *et al.*, 1997).

Los fluidos orgánicos se encuentran dentro de los contaminantes peligrosos para la calidad del agua subterránea más frecuentemente encontrados en los Estados Unidos (Fetter, 1999). En Argentina, al igual que en muchos países en vías de desarrollo, la situación no difiere demasiado en cuanto a la frecuencia relativa de contaminación observada por este tipo de sustancia. Estos compuestos pueden encontrarse como productos orgánicos naturales o como produc-

tos industriales (Schwille, 1984). En la mayoría de los países, cuando se produce un derrame de un hidrocarburo, el suelo contaminado es considerado por las regulaciones vigentes como un residuo peligroso. Ante este panorama se desarrolla un interés fundamental en la contención y remediación del suelo contaminado.

Para la remediación existen numerosas alternativas, muchas de ellas con registro de propiedad, las cuales incluyen desde la excavación, transporte y gestión en vertedero del suelo, incineración, biodegradación, fitoremediación, lavado y tratamiento, confinamiento, estabilización y solidificación, vitrificación, etc. (Sharma y Reddy, 2004). En todos los casos la selección del método apropiado depende de condiciones técnico-económico-ambientales, las cuales se encuentran limitadas por condicionantes particulares de cada sitio. Estudios más sofisticados pueden incluir hasta un estudio de riesgo para la evaluación y selección de alternativas de remediación.

Entre las alternativas de remediación, la estabilización y solidificación se presenta como una opción ventajosa por poder implementarse tanto como alternativa *in situ* como *ex situ*, reduciendo notablemente los riesgos asociados con el manejo y transporte del suelo contaminado y por consiguiente las posibles rutas de exposición y el riesgo asociado. Existen numerosos casos con evidencia histórica que demuestran el potencial uso de esta herramienta para remediar suelos contaminados con hidrocarburos (eg. Ezeldin *et al.*, 1995; EPA, 1999; USACE, 2000; Stavridakis, 2006). Sin embargo, en todos los casos el método debe ser diseñado para las condiciones locales y para el tipo de suelo encontrado en el lugar ya que el comportamiento final depende no sólo del tipo y concentración de contaminante y contenido de cemento sino también del tipo de suelo (Ezeldin *et al.*, 1992). El estudio y desarrollo de esta alternativa resulta de alto interés por las ventajas de posibilidad de reutilización del suelo contaminado y un menor costo de manejo y transporte.

En este trabajo se estudian las condiciones particulares de la estabilización de suelos limosos de origen loésico contaminados con hidrocarburos. En particular se analizan los suelos limosos del centro de Argentina. Estos suelos presentan características físico-mecánicas particulares las cuales han justificado estudios específicos cuyas principales contribuciones han sido recopiladas por Rocca *et al.* (2006) y Rinaldi *et al.* (2007).

El propósito de este trabajo es determinar el comportamiento hidráulico y resistencia a la compresión de suelos limosos contaminados con hidrocarburos y

estabilizados con cemento Portland. Para ello se realizan ensayos de conductividad hidráulica y de resistencia a la compresión simple en mezclas de suelo contaminado con distintos porcentajes del estabilizante. Se evalúa el comportamiento en el tiempo y se compara la respuesta obtenida con la correspondiente del suelo sin contaminar sometido al mismo tratamiento con el objeto de cuantificar la influencia de la presencia del hidrocarburo en el comportamiento del suelo y en las mezclas de suelo-cemento.

### **Comportamiento de los Limos Loésicos Argentinos**

Los loess cubren en Argentina un área de 600.000 km<sup>2</sup> y un volumen aproximado entre 34.000-45.000 km<sup>3</sup>. Su composición mineralógica difiere de los depósitos de Europa, Asia y América del Norte, principalmente por la presencia de minerales de origen volcánico y por ser un suelo alcalino en estado natural. Estos suelos presentan una estructura abierta cuyo arreglo de partículas está compuesto por una fracción granular unida entre sí a través de materiales cementantes (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos). Estos suelos se encuentran compuestos por partículas muy finas de arena, limo y arcillas transportadas por la acción eólica (Zárate, 2003). La estabilidad y resistencia de la masa de suelo es altamente dependiente de la resistencia de las uniones y contactos entre partículas. La alteración de los contactos por incrementos de cargas, contaminación del suelo o aumento de la humedad afecta significativamente el comportamiento de la masa de suelo. La ruptura de los vínculos entre partículas, la disolución de sales e hidratación de los puentes de arcilla producen un aumento notable en la deformabilidad del suelo (Reginatto y Ferrero, 1973; Francisca, 2007).

Los limos loésicos presentan características granulométricas particulares, estando formados por una fracción del tamaño de las arenas, una fracción importante del tamaño de limos, arcillas y carbonatos de calcio. Las fracciones granulométricas usuales del loess son: arena 1%-10%, limo 50%-80% y arcilla 2%-20% (Teruggi, 1957; Moll y Rocca, 1991). La fracción de arena está compuesta principalmente por plagioclasas, cuarzo, ortoclasas, vidrios volcánicos, labradorita, feldespatos alterados, fragmentos de rocas volcánicas y ópalos orgánicos. La fracción de limo, respecto a la anterior varía en la angulosidad de las partículas, el incremento en la proporción de vidrios volcánicos y la presencia de montmorillonita e illita (Teruggi, 1957).

En el cuadro 1 se presentan las propiedades físico-mecánicas típicas del loess del centro de Argentina.

Propiedad física o mecánica	Unidad	Valores <sup>(1)</sup>
Peso unitario seco	kN/m <sup>3</sup>	12,2 – 14,5 (13,0)
Peso unitario húmedo	kN/m <sup>3</sup>	14,9 – 16,8 (15,2)
Límite Líquido (LL)	%	20,8 – 32,2 (24,0)
Índice de Plasticidad (IP)	%	0 – 8,0 (3,5)
Fracción arenosa (> 0,1 mm)	%	5 – 15
Fracción limosa (0,1 mm - 0,002 mm)	%	40 – 75
Fracción arcillosa (< 0,002 mm)	%	7 – 25
Conductividad hidráulica (ks)	cm/s	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-5</sup>
Resistencia a la compresión simple <sup>(2)</sup>	kN/m <sup>2</sup>	45 – 130 (85)

Nota: <sup>(1)</sup>entre paréntesis se indica el valor más probable; <sup>(2)</sup>Pueden encontrarse valores más elevados en muestras cementadas.

Cuadro 1. Propiedades físicas y mecánicas típicas de los limos loésicos argentinos  
 Table 1. Typical physic and mechanical properties of argentinean loessical silts

Las importantes variaciones encontradas, tanto en las propiedades físicas como mecánicas, se deben al origen y a la composición química y mineralógica de los sedimentos (presencia de sales, carbonatos, cenizas volcánicas, etc.). Mayor información sobre las propiedades físico-químicas de los loess argentinos puede encontrarse en Teruggi (1957) y Reginatto y Ferrero (1973).

Las propiedades de estos suelos de mayor relevancia para este estudio son la conductividad hidráulica y la resistencia a la compresión simple. Además de estos parámetros de fundamental importancia en el comportamiento geotécnico, en general también se requiere de la evaluación de posible presencia de contaminante en el líquido lixiviado a través del suelo solidificado.

La conductividad hidráulica es el parámetro fundamental que controla el flujo de masa a través del suelo, y representa la habilidad para transportar agua y contaminantes mediante advección a través de la masa de suelo. Existen numerosos factores que controlan y/o afectan la conductividad hidráulica. En general, los parámetros más relevantes son la porosidad, grado de saturación, tamaño de partícula, estructura, y propiedades del fluido (Mitchell y Soga, 2005). La conductividad hidráulica típica de los suelos limosos del centro de argentina varía desde  $1 \times 10^{-3}$  cm/s a  $1 \times 10^{-5}$  cm/s en estado natural, pudiendo disminuir hasta valores próximos a  $3,0 \times 10^{-7}$  cm/s en estado compactado y logrando valores tan bajos como  $3,5 \times 10^{-8}$  cm/s cuando se lo mezcla y compacta con bentonita (Francisca *et al.*, 1998; Nieva y Francisca, 2009).

La resistencia a la compresión simple es muy variable y depende del estado o estructuración del

suelo. En general, valores típicos de resistencia a la compresión simple en los suelos limosos en estudio en condición no saturada resultan entre 70 y 125 kN/m<sup>2</sup>, disminuyendo notablemente cuando se incrementa el contenido de humedad y aumentando significativamente cuando el suelo se encuentra cementado ya sea por la presencia de silicatos o carbonatos naturales. Cuando se preparan mezclas de suelo-cemento con este material, las resistencias encontradas dependen del contenido de humedad de amasado, el contenido de cemento y el tiempo de curado (Moll *et al.*, 1988; Terzariol *et al.*, 2000).

#### **La estabilización y solidificación de suelos contaminados**

La técnica de solidificación/estabilización se aplica con el objeto de incluir a la fase contaminante dentro de una matriz sólida. La estabilización se refiere a la alteración química del contaminante de manera que se modifique su movilidad o su toxicidad. De esta manera se elimina cualquier posible exceso de líquido y se reduce el riesgo de que los contaminantes se escapen. Con la solidificación se busca que mediante la adición de cemento se forme un sólido monolítico con el contaminante atrapado o formando parte de la matriz sólida. La técnica se utiliza para la remediación y transformación de líquidos y de residuos semivolátiles a una forma más segura y compatible con el ambiente.

Para lograr la estabilización se requiere de la adición de aditivos que cumplen la función de mejorar la calidad del suelo y de encapsular la fase contaminante. La selección y tipo de material estabilizante depen-

de del tipo de suelo y de la propiedad o mejora deseada (EPA, 1999). En general se requieren bajos contenidos de aditivos para la estabilización o para lograr mayor resistencia y trabajabilidad (Stavridakis, 2006), aunque altos contenidos deben utilizarse cuando se pretende aislar un contaminante evitando que el mismo pueda lixiviar o sea arrastrado durante el transporte de agua a través del suelo estabilizado (USACE, 2000).

Mediante la transformación del material contaminado en un bloque sólido se reduce el área superficial (superficie por unidad de masa), o superficie de exposición, disminuyendo así la interacción con el medio que lo rodea. De esta manera se evita el contacto del contaminante con el ambiente ya que el mismo se encuentra macroencapsulado en el bloque sólido. Para evitar el escape de componentes volátiles es posible agregar residuos o cenizas de hornos de cemento. De esta forma se contribuye a la estabilización de los contaminantes y mediante la adición del cemento se transforman los mismos en el bloque sólido.

Los criterios básicos para el diseño de la estabilización en general comprenden: a) selección del material estabilizante (usualmente cemento portland, aunque también se utilizan cenizas volantes, resinas, etc. EPA, 1999), b) determinación de la relación óptima de mezcla o diseño de la mezcla, c) determinación del tiempo de curado y d) evaluación de los posibles cambios de volumen del producto solidificado. Cualquiera de estas etapas resulta compleja cuando el tipo de contaminante es un líquido orgánico no miscible con el agua, tal como los derivados del petróleo, ya que los mismos pueden reaccionar con los materiales estabilizantes inhibiendo el proceso de solidificación (Cruz *et al.*, 2006).

## Materiales y métodos

El suelo ensayado en este trabajo es un limo de origen loessico, designado como CL-ML en el sistema unificado de clasificación de suelos y las principales características del mismo se resumen en el cuadro 2. Los resultados mostrados en el cuadro 2 corresponden a ensayos realizados sobre el material parental sin efectos de contaminación y siguiendo procedimientos estandarizados (normativa ASTM).

Las muestras ensayadas fueron en todos los casos mezclas de limo-cemento o mezclas de limo contaminado con hidrocarburos, estabilizadas con cemento. El hidrocarburo utilizado en este trabajo es combustible comercial del tipo diesel. El contenido de hidrocarburos de petróleo totales en el suelo determinado

Propiedad	Limo	Norma
Limite líquido, %	25,2	ASTM D4318
Índice plástico, %	3,9	ASTM D4318
Pasante tamiz 200, %	96,5	ASTM D422
Partículas menores a 2 m, %	4,9	ASTM D422
Gravedad específica	2,66	ASTM D1118

Cuadro 2. Principales propiedades físicas del suelo estudiado.  
*Table 2. Relevant physical properties of the tested soil.*

mediante absorción infrarroja fue de 50000 ppm (5%). Para la preparación de las mezclas se siguieron los lineamientos del USACE (1984), teniendo en cuenta que el propósito del estudio es caracterizar el material para evaluar el potencial de la técnica de estabilización y solidificación de suelos contaminados. Como condición particular, por tratarse de un estudio geoambiental, los contenidos iniciales de cemento Portland fueron superiores a los sugeridos para el tipo de suelo en estudio en ausencia de contaminación.

Todas las mezclas fueron preparadas en mezcladoras. La designación de las muestras ensayadas como así también las cantidades de agua, suelo limpio o suelo contaminado y cemento se presenta en el cuadro 3. En todos los casos, el cemento fue hidratado previo a ser mezclado con el suelo para evitar la pérdida de humedad necesaria para el fragüe e hidratación del mismo. Una vez preparadas las mezclas, el material fue vertido en moldes de 7 cm de alto y 3,5 cm de diámetro. Las probetas así obtenidas fueron colocadas en recipientes cerrados para su curado, evitando así la pérdida de humedad por evaporación.

Para cada mezcla se determinó en laboratorio la conductividad hidráulica y resistencia a la compresión simple a los 7 y 28 días de curado en cámara húmeda. En el caso de las mezclas con suelo contaminado, la conductividad hidráulica sólo se determinó luego de 28 días de curado. La compresión simple, determinada siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1633, permite caracterizar la resistencia de la mezcla estabilizada mientras que la conductividad hidráulica provee información relacionada con el flujo de agua a través del material del suelo estabilizado, de fundamental importancia en el control de lixiviado.

Los ensayos de conductividad hidráulica se realizaron en permeámetros de pared rígida utilizando agua deionizada como fluido permeante y siguiendo la metodología carga variable según las recomendaciones de la norma ASTM D5856.

Mezcla	Suelo	Suelo contaminado	Cemento	Agua
M1 (12,1)	62,1	-	7,5	30,4
M2 (8,1)	64,5	-	5,2	30,3
M3 (4,0)	-	67,1	2,7	30,2
M4 (7,1)	-	65,1	4,6	30,3
M5 (10,0)	-	63,3	6,3	30,4
M6 (13,0)	-	61,5	8,0	30,5
M7 (16,0)	-	59,9	9,6	30,5
M8 (19,0)	-	58,3	11,1	30,6

Nota: los valores entre paréntesis corresponden a los porcentajes de cemento referido al peso de suelo seco.

Cuadro 3. Dosificación de las mezclas ensayadas, en (%) referidos al peso total.

Table 3. Mixtures composition, in (%) respect to the total weight.

## Resultados

En la figura 1 se presentan los resultados de conductividad hidráulica de las mezclas ensayadas a los 28 días de curado. Los valores medidos en las mezclas de suelo-cemento sin la presencia de hidrocarburo se presentan como valores de referencia, al igual que la conductividad del limo sin cemento ni contaminante. Observe que a mayor contenido de cemento menor es la conductividad hidráulica del material. La presencia del cemento cumple en este caso la función de

restringir el paso de agua a través de los poros del suelo una vez que se produce la hidratación del mismo. Es decir que, luego del fraguado, la porosidad efectiva de la muestra, o fracción de los poros del suelo disponible para el flujo, se reducen significativamente ya que luego del fraguado se bloquean parcialmente los canales entre los poros del suelo. Como consecuencia de ello, la conductividad hidráulica disminuye desde  $7 \times 10^{-5}$  cm/s hasta valores próximos a los  $3 \times 10^{-5}$  cm/s.

Además, se observa que la presencia del hidrocarburo incrementa significativamente la conductividad hidráulica de la muestra, respecto de los resultados obtenidos en mezclas de limo-cemento puro. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos en las muestras con hidrocarburo resultaron aproximadamente un orden de magnitud superiores a las observadas para las muestras de suelo-cemento sin el contaminante orgánico. Esta tendencia indica que parte del cemento no ha podido cumplir la función de reducir la porosidad efectiva de la muestra. En ningún caso se pudo observar arrastre de la fase hidrocarburo durante el permealdo, por lo que la máxima lixiviación posible de hidrocarburo estaría determinada por la solubilidad del mismo en agua.

La figura 2 presenta los resultados de resistencia a la compresión simple de las mezclas ensayadas a 7 días (Fig. 2a) y a los 28 días de curado (Fig. 2b). Para ambos tiempos se muestran los resultados obtenidos en muestras sin y con contaminación. Las tendencias obtenidas demuestran que la presencia del hidrocarburo disminuye significativamente la resistencia de rotura de estas mezclas de suelo fino solidificado por la acción del cemento. La disminución de la resistencia alcanzada, producto de la contaminación, resultó aproximadamente del 80%. El cemento luego del fraguado produce una unión e inmovilización de la masa

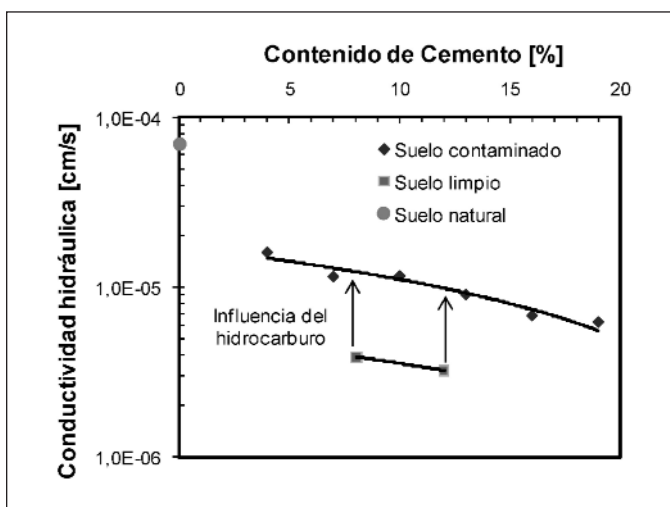


Figura 1. Conductividad hidráulica a los 28 días de colado en mezclas de limo-cemento y limo contaminado-cemento. Contenido de hidrocarburos de petróleo totales = 5%. Porcentaje de cemento referido al peso de suelo seco.

Figure 1. Hydraulic conductivity of silt-cement and contaminated silt-cement mixtures measured at 28 days. Total petroleum hydrocarbons = 5%. Cement content is in [%] respect to the dry weight of soil.



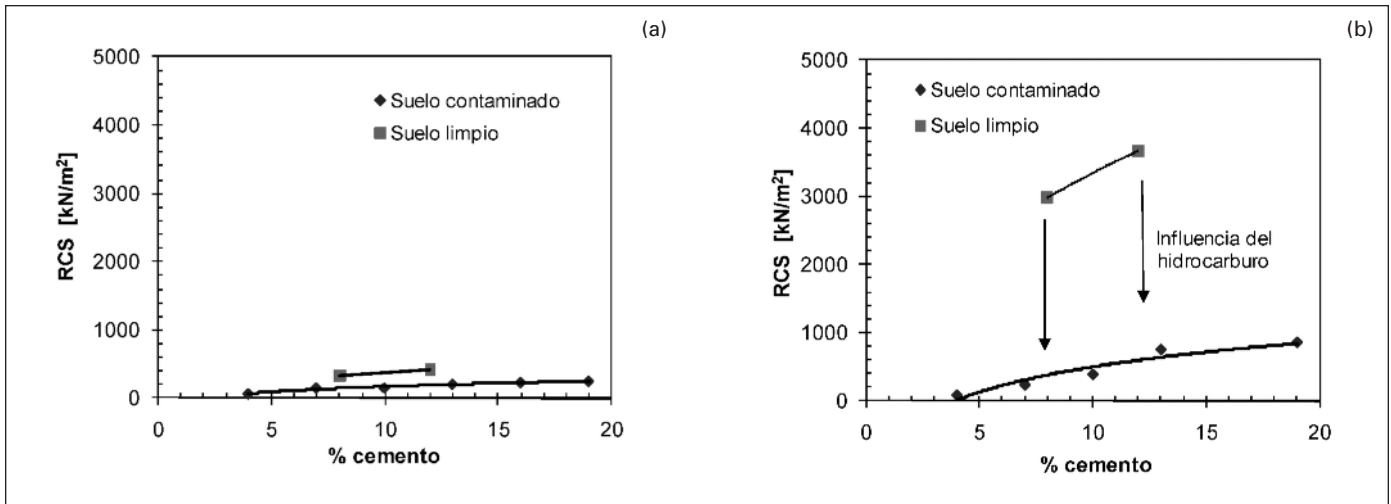


Figura 2. Resistencia a la compresión simple a los 7 días (a) y 28 días (b) en mezclas de limo-cemento y limo contaminado-cemento. Contenido de hidrocarburos de petróleo totales = 5%. Porcentaje de cemento referido al peso de suelo seco.  
 Figure 2. Unconfined strength of the silt-cement and contaminated silt-cement mixtures measured at 7 (a) and 28 (b) days. Total petroleum hydrocarbons = 5%. Cement content is in [%] respect to the dry weight of soil.

del suelo, con un consecuente aumento en la resistencia y rigidez del esqueleto del mismo. En el caso de suelos contaminados este efecto se desarrolla sólo en forma parcial y, debido a ello, el aumento en la resistencia observado en las muestras con hidrocarburo es significativamente inferior al determinado en las mezclas sin el orgánico.

La figura 3 muestra la relación entre la resistencia a la compresión simple lograda a los 7 días respecto de la alcanzada a los 28 días de curado para mezclas de suelo-cemento y de suelo-hidrocarburo-cemento. Se observa que la resistencia alcanzada aumenta con el tiempo de curado de manera similar a lo esperado para todo tipo de concreto, y en coincidencia con los resultados mostrados en la figura 2. Sin embargo, el efecto del tiempo de curado es muy importante para las muestras limpias. En particular, en las mezclas suelo-cemento para la RCS se obtuvo incrementos de un orden de magnitud, mientras que en las muestras contaminadas con el orgánico el aumento resultó muy poco significativo. Este resultado restringe significativamente la potencial reutilización de este suelo-cemento como material recuperado para la construcción en usos viales o geotécnicos o como remplazo de materiales finos en la fabricación de concretos especiales (Ezeldin *et al.*, 1995).

En la figura 4 se muestra el efecto ligante del cemento Portland en los granos del suelo. En las figuras 4a y 4b se presentan dos configuraciones típicas de vinculación de contactos y granos de suelo por acción del cemento. Este tipo de comportamiento produce un notable incremento en la rigidez del suelo

y en la resistencia del mismo debido al aumento del área efectiva de contacto (Fernández y Santamarina, 2001). En el caso de suelos con hidrocarburos, la interacción del mismo con el cemento evita que se desarrolle el incremento de resistencia y rigidez en su totalidad. Por lo tanto, en las mezclas de suelo-hidrocarburo-cemento también es posible que se desarrollen sistemas como los mostrados en las figuras 4a y

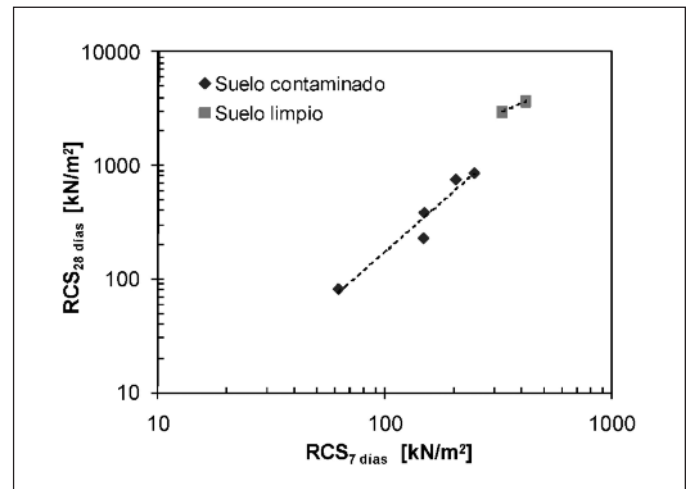


Figura 3. Influencia del hidrocarburo en la relación entre la resistencia a la compresión simple a los 7 días y 28 días en mezclas de limo-cemento. Contenido de hidrocarburos de petróleo totales = 5%.  
 Figure 3. Influence of the oil contamination in the unconfined strength measured at 7 and 28 days. Total petroleum hydrocarbons = 5%.

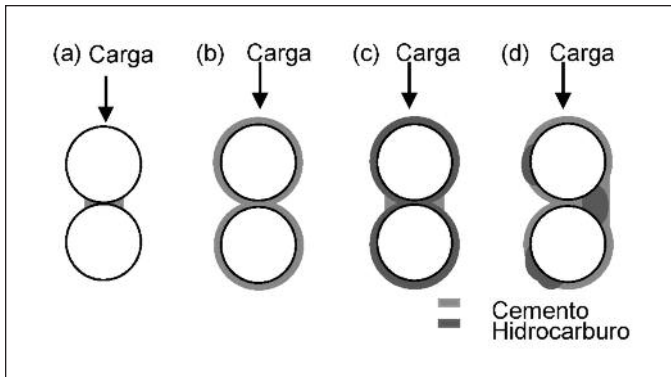


Figura 4. Cementación de suelos contaminados con hidrocarburos: a) cementación del contacto, b) cementación de las partículas, c) cementación de contactos con hidrocarburo adsorbido o en forma de película alrededor de las partículas, d) cementación parcial de las partículas por la presencia de hidrocarburo libre en los poros del suelo

Figure 4. Cementation of soils contaminated with hydrocarbons: a) cementation at particle contact, b) cementation around soil particles, c) cementation at particle contact in presence of adsorbed oil, d) partial cementation around particles due to the presence of free oil.

4b, pero la resistencia de la lechada solidificada es inferior cuando existe el contaminante. El efecto que produce el hidrocarburo consiste fundamentalmente en una inhibición del fraguado del cemento impidiendo que la totalidad de las partículas del ligante entren en contacto con el agua. Esta afectación en la hidratación del cemento produce una caída de la resistencia a la compresión simple alcanzada a edad temprana, tal como lo demuestran los resultados presentados en las figuras 2 y 3.

En las figuras 4c y 4d se incluyen dos configuraciones posibles cuando la fase hidrocarburo se encuentra ya sea rodeando las partículas de suelo o presente en estado libre (no en solución). En estos casos, el cemento no puede actuar ligando el contacto limpio entre partículas (Fig. 4c) y además una parte puede resultar desplazado de la superficie por acción de la fase contaminante no miscible con el agua (Fig. 4d). En estos casos también la resistencia de las mezclas se reduce por la presencia del orgánico. Estos mecanismos coinciden con las observaciones microestructurales de Al-Ansary y Al-Tabbaa (2007) quienes concluyeron que el contaminante orgánico produce variaciones en la distribución espacial de fases y en la hidratación de las mismas. Para estudiar la distribución de fases y localización de la fase hidrocarburo Rinaldi y Francisca (2006) desarrollaron una novedosa metodología basada en mediciones de permitividad dieléctrica.

Además, las configuraciones mostradas en las figuras 4c y 4d producen una disminución reducida de la porosidad efectiva ya que el hidrocarburo ocupa una fracción de los poros del suelo y evita la hidratación completa del cemento por lo que la conductividad hidráulica del sistema debe ser superior que en el caso sin contaminante, tal como lo demuestra la figura 1.

## Conclusiones

En este trabajo se presentan resultados experimentales de estabilización y solidificación de suelos finos loésicos contaminados con hidrocarburos. Las principales conclusiones obtenidas se resumen de la siguiente manera:

- Los limos loésicos presentan propiedades únicas que los diferencian de otros limos. Las mezclas de limo-cemento presentan un comportamiento similar al observado en otros suelos finos. A mayores contenidos de cemento se obtienen mayores resistencias a la compresión simple y menores conductividades hidráulicas. La acción ligante del cemento interrumpiendo los caminos de flujo, reduciendo la porosidad efectiva y rigidizando el esqueleto del suelo controla este comportamiento.
- La contaminación del suelo con hidrocarburo produce una disminución muy significativa de la resistencia del suelo mezclado con cemento, como consecuencia de la acción inhibitoria del fragüe que tienen los hidrocarburos. La pérdida de rigidez de la lechada solidificada y un acceso restringido del agua a las partículas de cemento, y del mismo a las partículas de suelo por acción del hidrocarburo, impiden que se logren resistencias similares a las obtenidas en el mismo suelo sin contaminante y con el mismo contenido de cementante. Esta caída significativa de la resistencia del suelo contaminado y estabilizado restringe la potencial reutilización del suelo en aplicaciones geoambientales. Por lo tanto, cada situación debe ser analizada como un caso particular evaluando la necesidad de una resistencia mínima según sea la aplicación o uso final del material reutilizado.
- La conductividad hidráulica de los limos loésicos contaminados y estabilizados se encuentra controlada por la presencia del hidrocarburo. En general la tasa de flujo de agua a través de las mezclas de suelo-cemento se incrementa por acción del contaminante. Este comportamiento se atribuye a la mayor porosidad efectiva del suelo estabilizado cuando en los poros del mismo se encuentra una fase orgánica libre no miscible con el agua.

## Agradecimientos

El presente trabajo fue parcialmente financiado por CONICET, la Agencia Nacional de Promoción de Ciencia y Tecnología de Argentina (ANPCYT) proyecto PICT 2006-822 y SECYT-UNC. El autor agradece a Marcos Montoro y Daniel Glatstein por sus valiosos comentarios y a los revisores anónimos quienes a través de sus sugerencias y observaciones ayudaron a mejorar el trabajo.

## Referencias

- Al-Ansary M.S. y Al-Tabbaa A. 2007. Stabilization/solidification of synthetic petroleum drill cuttings. *Journal of Hazardous Materials* 141, 410-421.
- EPA. 1999. *Solidification/stabilization resource guide*, EPA/542-B-99-002, U.S. Environmental Protection Agency, Washington.
- Ezeldin S.A., Vaccari D.A., Bradford L., Dilcer S., Farouz E. y Mueller R.T. 1992. Stabilization and solidification of hydrocarbon-contaminated soils in concrete. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 1(1), 61 - 79.
- Ezeldin S., Mikhail R. y Choi B.J. 1995. Properties of concrete containing benzene contaminated soils. *Materials Journal* 92(4), 401-410.
- Fetter C.W. 1999. *Contaminant hydrogeology*. Prentice Hall, New Jersey. 500 pp.
- Fernandez A.L. y Santamarina J.C. 2001. Effect of cementation on the small-strain parameters of sands. *Canadian Geotechnical Journal* 38(1), 191-199.
- Francisca F.M., Cuestas G.A. y Rinaldi V.A. 1998. Estudio de permeabilidad en limos loessicos. Memorias. *Encuentro de Geotécnicos Argentinos GT'98*. Córdoba, Argentina.
- Francisca F.M. 2007. Evaluating the constrained modulus and collapsibility of loess from standard penetration test. *International Journal of Geomechanics* 7(4), 307-310.
- Irwin R., VanMouwerik M., Stevens L., Seese M. y Basham W. 1997. *Environmental contaminants encyclopedia*. National Park Service, Water Resources Division, Fort Collins, Colorado.
- Cruz R.C., Festugato L., Knop A., Heineck K.S. y Consoli N.C. 2006. O uso de cal e carbureto e de cimento Portland no encapsulamento de um solo contaminado por óleo diesel. Memorias. *XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Curitiba.
- Mitchell J. K. y Soga K. 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3er Ed. John Wiley & Sons, New York, 577 pp.
- Moll L.L., Terzariol R.E., Redolfi R, Rocca R.J. y Abbona P. 1988. Experiencias con mezclas de suelo-cemento en suelos loessicos. Memoria. *X Congreso Argentino de Mecánica de suelos e Ingeniería en Fundaciones*, La Plata.
- Moll L.L. y Rocca R.J. 1991. Properties of loess in the center of Argentina. Memoria. *XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Viña del Mar, Chile. Vol. I. pp. 1-14.
- Nieva P.M. y Francisca F.M. 2009. Conductividad hidráulica de mezclas de limo-bentonita compactadas. *Desafíos y avances de la geotecnia joven en Sudamérica (F. Francisca, Ed.)*, Vol. 1, 193-196.
- Reginatto A.R. y Ferrero J.C. 1973. Collapse Potential of Soils and Soil Water Chemistry. Memoria. *Proceedings of the Eight International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol .2, 177-183.
- Rinaldi V.A. y Francisca F.M. 2006. Monitoring the Removal of Immiscible Contaminants from Sandy Soils by Dielectric Measurements. *Journal of Environmental Engineers* 132(8), 931-939.
- Rinaldi V.A., Rocca R.J. y Zeballos M.E. 2007. Geotechnical characterization and behavior of Argentinean collapsible loess. En *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan, Phoon, Hight y Lerouiel (Eds.). Taylor and Francis Group, London, Vol. 4, 2259-2286.
- Rocca R.J., Redolfi E.R., Terzariol R.E. 2006. Características Geotécnicas de los Loess de Argentina. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. 6(2), 149-166.
- Schwille F. 1984. Migration of Organic Fluids Immiscible with Water in Unsaturated Zone. *Pollutants in Porous Media: The Unsaturated zone Between Soil Surface and Groundwater*, Vol. 47, Ecological Studios, Yaron B., Dagan G. y Goldshmid J. (Ed.), Springer Verlag
- Sharma H.D. y Reddy K.R. 2004. *Geoenvironmental Engineering*. John Wiley and Sons. New Jersey, 968 pp.
- Stavridakis E.I. 2006. A solution to the problem of predicting the suitability of silty-clayey materials for cement-stabilization. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 379-398.
- Terzariol R.E., Abbona P. y Redolfi E.R. 2000. Uso de suelo-cemento plástico como relleno de zanjas. Memoria. *XV Congreso Argentino de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica*, Buenos Aires.
- Teruggi M.E. 1957. The Nature and Origin of Argentinean Loess. *Journal of Sedimentology and Petrology* 27(3), 323-332.
- USACE 1984. *Soil Stabilization for Pavements - Mobilization Construction*. US Army Corps of Engineers (USACE), EM 1110-3-137, Washington.
- USACE 2000. *Solidification/stabilization (s/s) of contaminated material*, US Army Corps of Engineers (USACE), UFGS-02160A, Washington.
- Zárate M.A. 2003. Loess of Southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22, 1987-2006.

Recibido: julio 2009

Revisado: octubre 2009

Aceptado: noviembre 2009

Publicado: abril 2010