

Durabilidad de un suelo contaminado y tratado con cemento portland

Durability of a contaminated soil treated with portland cement

José W. Jiménez Rojas*¹, Nilo C. Consoli*, Karla Salvagni Heineck*

* Universidade Federal do Rio Grande do Sul. BRASIL

Fecha de recepción: 22/ 05/ 2008
Fecha de aceptación: 30/ 10/ 2008
PAG. 163 - 170

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo la aplicación de la técnica de solidificación/estabilización de suelos contaminados, analizando específicamente el comportamiento físico del suelo a través de ensayos de durabilidad. El suelo fue contaminado en laboratorio con residuo oleoso y la aplicación de la técnica tuvo como agente de encapsulamiento el cemento Portland CP V-ARI. Los ensayos de durabilidad, realizados según la NBR 13554 (1996), tuvieron como objetivo estudiar el grado de desagregación y vulnerabilidad del material con diversas combinaciones de dosificaciones de cemento y residuo oleoso, así como estudiar la variación volumétrica de los mismos. A partir de los resultados es posible observar que cuanto mayor la cantidad de contaminante, mayor es la pérdida de masa. Sin embargo, cuánto mayor es la cantidad de cemento, menor es la pérdida de masa y menor la variación volumétrica.

Palabras Clave: Solidificación/estabilización, Durabilidad, Residuo oleoso, Cemento Portland

Abstract

This work seeks the application of solidification/stabilization techniques to contaminated soils analyzing specifically the physical behavior of the soil through tests of durability. The soil was contaminated in laboratory with acidic oily sludge industrial residues and the application of that technique had an encapsulate agent, the Portland cement CP V-ARI. The tests were carried out according to NBR 13.554 (1996), and they aimed to study the level of degradation and the vulnerability of the material with several combinations of cement and acidic oily sludge as well as study their volumetric variations. Starting from the results, it is possible to observe that the larger the contamination the larger the mass loss; however the larger the amount of cement, the smaller the mass loss and the more stable the volumetric variation.

Keywords: Solidification/Stabilization, durability, oily sludge, portland cement

1. Introducción

En la industria del petróleo se tiene la generación de grandes cantidades de residuos oleosos y viscosos, formados durante las etapas de producción, transporte y refinado. Según Oliveira (2002), la PETROBRAS, como resultado de una intensa actividad de exploración y producción de petróleo, genera un inmenso volumen de residuo oleoso en todas sus unidades en Brasil. Apenas cerca de 3 millones de toneladas de residuos industriales fueron tratados en el país en 2004, siendo que Brasil genera en torno de 53 millones de toneladas de residuos industriales por año. De acuerdo con Pinto (2006) solamente en la región metropolitana de São Paulo fueron

identificadas cerca de 1800 áreas contaminadas. De estas áreas comprobadamente contaminadas, 279 son de actividades industriales.

En función de este panorama, crecen las iniciativas de programas de preservación y gerencia ambiental, así como también estudios de medidas para el control y remediación de áreas contaminadas, además de estudios tecnológicos capaces de minimizar el volumen y la toxicidad de los residuos industriales.

Azambuja et al., (2002) relatan que existen innumerables procesos de control y remediación de suelos contaminados, entre éstos procesos la mayoría de las soluciones pasa por la remoción del suelo contaminado, confinando el material en rellenos de residuos sólidos o disponiéndolos en landfarmings. Sin

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Av. Borges de Medeiros 1047,
sala 51, CEP 90020-025, Porto Alegre (RS) Brasil,
Teléfono: (55) (51) 3023-3581, E-mail: engrojas@gmail.com

embargo, Schwartz et al., (2006) destacan que la remoción completa del suelo contaminado o del contaminante es imposible y/o excesivamente cara, dentro de eso, la atención principal está siendo dada para el aislamiento y la retención a través de medios que posibiliten el control de la migración del contaminante.

De acuerdo con Rojas et al. (2008), entre los métodos de retención o inmovilización de materiales contaminados se puede citar el proceso de encapsulamiento o estabilización/solidificación de contaminantes, este método es utilizado para transformar materiales sólidos o líquidos potencialmente causadores de polución en materiales sólidos menos o no causadores de polución.

La tecnología de estabilización/solidificación se viene volviendo una importante alternativa en el tratamiento, disposición de residuos peligrosos en rellenos y control de áreas contaminadas, pues provee el mejoramiento de las características físicas y toxicológicas del residuo y/o suelo, facilitando su gerencia de forma segura y eficaz. Además, el costo del proceso de solidificación/estabilización ha sido considerado bajo en relación a otras técnicas de tratamiento, factor éste que ha impulsado el desarrollo de ésta tecnología en los últimos años (Oliveira et al., 2003).

Para el U.S. Army of Corps Engineers (USACE, 1995), luego de la aplicación de la técnica de encapsulamiento, algunos ensayos se tornan necesarios para el análisis de la efectividad del método, los cuales consisten en análisis químicos y físicos del compuesto tratado. Los análisis químicos son realizados con base en ensayos de lixiviación y extracción química. Físicamente, son realizadas análisis de compactación, resistencia a la compresión simple, permeabilidad, durabilidad, entre otros.

La durabilidad de un material es la capacidad de mantener su integridad estructural bajo las condiciones a las cuales es expuesto. Según Marcon (1977), los principales factores que afectan a la integridad estructural de materiales estabilizados son las condiciones ambientales (variaciones de temperatura y humedad) y las sollicitaciones impuestas, que acaban por debilitar el mismo. Según Lina et al. (1993), la durabilidad puede ser definida como siendo la capacidad de un material mantener su integridad cuando sometido a la acción de agentes externos. Entre las formas de evaluación de la durabilidad esta la pérdida de peso o la variación de absorción o expansión al final de determinado tiempo o número de ciclos de una acción periódica, siguiendo el ejemplo del

secado y mojado.

La durabilidad de misturas cementadas es determinada en laboratorio a través de pérdida de peso y/o resistencia decurrente de la aplicación de ciclos de mojado y secado o congelamiento y descongelado (regiones de clima frío), con el objetivo de simular de la mejor forma posible las condiciones de trabajo (LOVATO, 2004).

El American Concrete Institute sugiere dos tipos de ensayos de durabilidad para suelo/cemento. La ASTM D559 (1996), que es la pérdida de masa por ciclos de mojado y secado, y la ASTM D560 (1996), que es la pérdida de masa por ciclos de congelamiento y descongelado, siendo la segunda un ensayo no utilizado en países tropicales como Brasil. La NBR 13554 (1996) es prácticamente igual a la ASTM D559 (1996), siendo que apenas el número de ciclos las diferencia.

Klich et al., (1999) destacan que la técnica de encapsulamiento utilizando materiales cementicios es vulnerable a las mismas degradaciones físicas y químicas presentes en el concreto. La composición química y mineralógica, así como el agente cementante y el tipo de contaminante son factores de los cuales depende la durabilidad del método de encapsulamiento.

Este trabajo presenta la aplicación de la técnica de estabilización/solidificación con cemento Portland cuando el suelo esté contaminado por residuo oleoso, teniendo cómo objetivos analizar el comportamiento físico del compuesto encapsulado a través de ensayos de durabilidad por ciclos de humedecimiento, secado y cepillado.

2. Métodos y materiales

2.1 Materiales utilizados

El suelo utilizado en ésta pesquisa es proveniente de la región metropolitana de Porto Alegre, sur de Brasil, el local de la colecta está ubicado en la provincia geomorfológica denominada Depresión Periférica, cuya litología es caracterizada por la presencia de rocas sedimentares pertenecientes a la Cuenca del Paraná. El suelo posee limite de liquidez (LL) de 21%, limite de plasticidad (LP) de 17%, índice de plasticidad (IP) de 4%, índice de actividad (IA) de 0.18% y peso unitario de los granos (Gs) de 2.72.

Como agente cementante para el encapsulamiento del suelo contaminado, se adoptó el cemento Portland de alta resistencia inicial (CP V-ARI). Además de la utilización de agua destilada, fue utilizado

cómo contaminante el residuo oleoso, oriundo de una refinería que realiza el reprocesamiento de óleos lubricantes usados utilizados en vehículos automotores, éste residuo presenta variabilidad cuanto a su composición debido a las características de la materia prima utilizada y otros factores inherentes al proceso de refino.

2.2 Definición de la Dosificación

Según Ibáñez et al. (1997), la tecnología de estabilización/solidificación consiste en misturar cantidades variadas de agentes cementantes en un contaminante específico. La definición de la dosificación de los materiales utilizados en las misturas fue basada en valores publicados en la literatura (Valls et al., 2000; Asavapisit et al., 2001; Poon et al., 2001; Ylmas et al., 2003; Cruz, 2004; Rojas 2007).

Fueron adoptados 10% y 20% de cemento con relación al peso de los sólidos en el peso unitario seco máximo obtenido por las curvas de compactación Proctor normal realizados para el suelo natural, suelo/cemento y suelo/cemento/residuo oleoso, presentadas en los resultados. Para cada dosificación de cemento fueron adoptadas crecientes combinaciones de residuo oleoso en las cantidades de 0%, 2%, 4% y 6% con relación al peso del suelo.

No fueron realizados ensayos para muestras con 0% de cemento pues no hay como hacer el cepillado debido a baja resistencia del suelo.

2.3 Preparación de las muestras

La mezcla fue realizada en el siguiente orden: [(suelo + cemento) + residuo oleoso] + agua.

Las muestras fueron compactadas en tres camadas estáticas en el interior de un molde metálico debidamente lubricado, de 10,0cm de altura y 5,0cm de diámetro. Fueron aceptados los cuerpos-de-prueba con 10.0 ± 0.2 cm de altura y 5.0 ± 0.2 cm de diámetro. El control de la densidad fue realizado monitoreando la altura y el peso de cada camada. Al final de ésta etapa una muestra de material fue retirada para el control de humedad.

Concluido el proceso de moldeamiento, el cuerpo-de-prueba fue inmediatamente extraído del molde, su peso y medidas debidamente apuntados, con resolución de 0.01gf y 0.1mm, respectivamente, y acondicionados en una bolsa plástica adecuadamente identificada y vedada para evitar variaciones significativas en la humedad. La cura de los cuerpos-de-prueba fue de

7 días.

2.4 Métodos del ensayo de durabilidad

Los procedimientos adoptados para la realización de los ensayos de durabilidad fueron basados en la norma NBR 13554 (1996). Los especímenes de ensayo fueron moldeados en 3 muestras, identificados con los números 1, 2 y 3, y la referida dosificación. Al final de la cura la muestra n°1 fue pesada y medida a fin de determinar el volumen. Las 3 muestras fueron entonces inmersas en agua potable durante 5 horas y retiradas; el agua en exceso contenida en la superficie de las muestras fue secada con el auxilio de un paño húmedo, siendo que la muestra n°1 fue nuevamente medida y pesada y las muestras n°2 y n°3 fueron apenas pesadas. Los tres especímenes de ensayo fueron entonces colocados en estufa a una temperatura de $7 \pm 2^\circ\text{C}$ por 42 horas y retirados, determinándose la masa y el volumen de la muestra n°1 y masa de las muestras n°2 y n°3. Las muestras n°2 y n°3 fueron sometidas al cepillado con un cepillo de tiras de chapa de acero, descrito por la NBR 13554 (1996). El cepillo fue aplicado con su eje longitudinal paralelo al eje longitudinal del especímenes de ensayo y paralelo a sus bases, de manera tal que fue posible cubrir toda la superficie del especímenes de ensayo. Fueron aplicadas 20 cepilladas enérgicas (aproximadamente 15N) a fin de cubrir toda la superficie lateral del cuerpo-de-prueba y 4 cepilladas para cada una de las bases. El ciclo de 48 horas de humedecimiento y secado fue repetido por 5 veces más. Luego de los 6 ciclos, las muestras fueron llevadas a la estufa a una temperatura entre 105 y 110°C , hasta alcanzar masa constante.

3. Resultados y discusiones

3.1 Compactación Proctor normal

Los ensayos de compactación con energía Proctor normal fueron realizados para determinar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo de compactación, los cuales fueron utilizados como parámetros para el moldeado de los cuerpos-de-prueba en los variados ensayos de ésta pesquisa. Fueron realizados ensayos para el suelo natural, así cómo también para el suelo con 10% y 20% de cemento y en mínimo 1 cantidad de contaminante en relación al peso del suelo y del agua. Las curvas de compactación son presentadas en las Figuras 1 y 2.



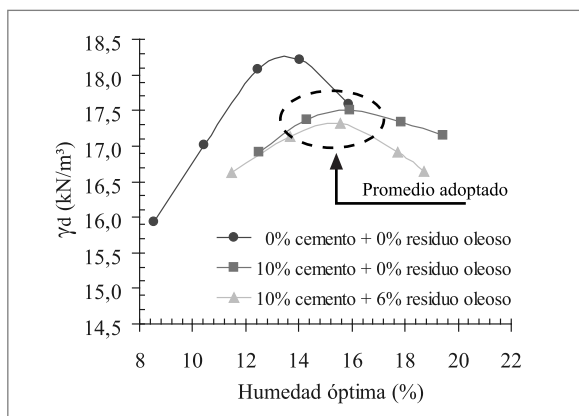


Figura 1. Curvas de compactación para suelo con 10% de cemento y contaminados

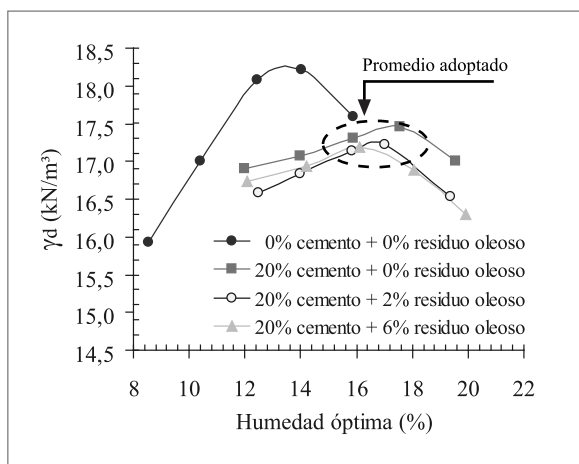


Figura 2. Curvas de compactación para suelo con 20% de cemento y contaminados

La tendencia observada en las curvas de compactación con adición de cemento, cuando comparadas a las curvas de compactación del suelo natural, es de que cuánto mayor el porcentual de cemento en las mezclas, mayor será la humedad óptima y menor el peso unitario máximo seco.

El agente encapsulante (cemento Portland) y el contaminante provocaron un achatamiento en las curvas de compactación cuando comparadas a la curva de suelo natural. Ese comportamiento refleja una menor sensibilidad del peso unitario máximo seco a las variaciones del porcentaje de humedad.

Los resultados tanto de humedad óptima cuanto de peso unitario máximo seco, en muestras cementadas, están muy próximos. En función de eso, se optó por utilizar el promedio de los resultados obtenidos en las curvas de compactación de suelo/cemento y suelo/cemento/borra oleosa ácida (residuo oleoso) como

parámetro de moldeamiento de los cuerpos-de-prueba contaminados y encapsulados. Para la muestra natural la humedad óptima es de 13.5% y el peso unitario es de 18.25kN/m³. En muestras cementadas y contaminadas el promedio de humedad óptima es de 15.73% y 16.82% y el peso unitario promedio es de 17.42 kN/m³ y 17.31kN/m³ para 10% y 20% de cemento, respectivamente.

3.2 Variación volumétrica

Para la determinación de la variación volumétrica producida por ciclos de humedecimiento y secado, los cuerpos-de-prueba sometidos a los ciclos fueron medidos cuánto al diámetro y altura. Fueron realizadas 4 medidas de diámetro y 4 medidas de altura para cada ciclo, en locales establecidos luego del moldeado y de misma forma para todos los cuerpos-de-prueba, anteriormente a la primera inmersión se procedió a la primera medición. La Figura 3 presenta la variación volumétrica versus los ciclos de humedecimiento y secado de los cuerpos-de-prueba con 10% de cemento y 0%, 2%, 4% y 6% de residuo oleoso en relación a los respectivos volúmenes iniciales, medidos luego del moldeado.

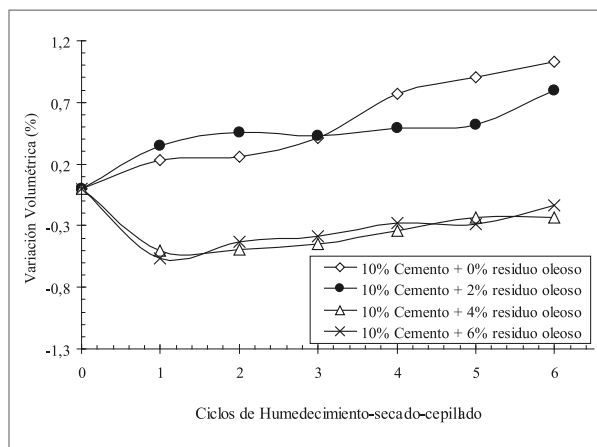


Figura 3. Variación volumétrica del suelo/cemento y suelo/cemento/residuo oleoso (10% de cemento)

Se observó que los especímenes de ensayo conteniendo 0% de residuo oleoso y 10% de cemento presentaron una variación volumétrica irregular hasta el último ciclo. Los especímenes de ensayo con misma cantidad de cemento, sin embargo con 2% de contaminante, presentaron una regularidad hasta el quinto ciclo, donde, luego después, surgió una ligera variación volumétrica.

En el caso de los especímenes de ensayo contaminados con 4% y 6% de residuo oleoso y

encapsulados con 10% de cemento, el comportamiento inicial fué de contracción, habiendo a partir del primer ciclo una expansión gradual de ambas as muestras, llegando a valores muy próximos a los de la muestra inicial.

La Figura 4 presenta la variación volumétrica versus los ciclos de humedecimiento y secado de los cuerpos-de-prueba con 20% de cemento y 0%, 2%, 4% y 6% de residuo oleoso en relación a los respectivos volúmenes iniciales, medidos luego del moldeado.

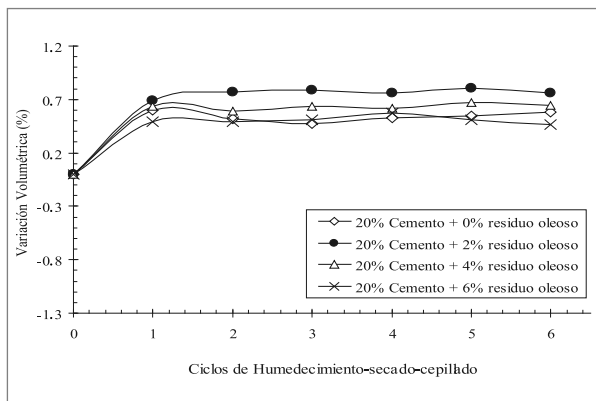


Figura 4. Variación volumétrica del suelo/cemento y suelo/cemento/residuo oleoso (20% de cemento)

En lo que dice respecto a la variación volumétrica del suelo contaminado y estabilizado con 20% de cemento, los especímenes de ensayo, independientemente de la cantidad de residuo oleoso, siguieron un mismo comportamiento. A partir del primer ciclo, donde todos sufrieron una variación volumétrica de misma magnitud en relación a la muestra inicial, los cuerpos-de-prueba presentaron hasta el final de los ciclos propuestos valores estables, entre 0.4% y 0.8%, sufriendo oscilaciones dentro de éste margen.

La Tabla 1 presenta los resultados de los ensayos de variación volumétrica para los especímenes de ensayo de suelo/cemento y suelo/cemento/contaminante para cada ciclo.

Debido a la falta de parámetros específicos para el análisis de la variación volumétrica de los especímenes de ensayo, de suelo/cemento y de contaminante, fueron adoptados valores de referencia para fines de pavimentación. Por lo tanto, en la Tabla 2 son presentados los valores de clasificación de expansión y contracción para fines de pavimentación según Nogami y Villibor (1995). Los valores límites de ésta clasificación fueron obtenidos en ensayos de mini-CBR realizados en suelos lateríticos arenosos sin aglomerantes.

Tabla 1. Variación volumétrica de los especímenes de ensayo en estudio

Cemento (%)	Residuo oleoso (%)	Variación volumétrica para cada ciclo (%)					
		1	2	3	4	5	6
10	0	0.235	0.259	0.413	0.767	0.905	1.030
10	2	0.353	0.452	0.427	0.494	0.517	0.794
10	4	-0.501	-0.492	-0.452	-0.338	-0.237	-0.237
10	6	-0.565	-0.427	-0.387	-0.282	-0.285	-0.138
20	0	0.598	0.522	0.472	0.532	0.544	0.584
20	2	0.685	0.774	0.784	0.759	0.808	0.759
20	4	0.632	0.592	0.636	0.619	0.668	0.644
20	6	0.490	0.495	0.507	0.572	0.511	0.463

Tabla 2. Límites de expansión y contracción propuestas por Nogami y Villibor (1995), para pavimentación de suelos tropicales

Expansión		Contracción	
Elevada	> 3.0%	Elevada	> 3.0%
Mediana	0.5 a 3%	Mediana	0.5 a 3%
Baja	< 0.5 %	Baja	< 0.5 %

Por tratarse del ensayo mini-CBR éstos valores de expansión fueron obtenidos en especímenes de ensayo confinados, diferente del ensayo de expansión libre, que teóricamente expone el especímenes de ensayo a una condición de mayor expansión. Los métodos utilizados por los autores mencionados es otro diferencial, pero el objetivo no es comparar resultados entre autores, y sí, tener parámetros de referencia para la interpretación de los resultados de ésta pesquisa. Vale resaltar que éste mismo procedimiento de interpretación fue adoptado por Costa (2005) para la determinación del limite de expansión y contracción de suelo/cemento y suelo/cal.

En cuanto a los resultados, es posible observar por la Tabla 1 que los especímenes de ensayo presentaron dos comportamientos, expansión y contracción, siendo que éste último solamente ocurrió para muestras con 10% de cemento y 4% y 6% de residuo oleoso, dónde prácticamente todos los ciclos presentaron resultados considerados como de baja contracción. En muestras con las mismas cantidades de cemento, sin embargo contaminadas con 0% y 2% de residuo oleoso, el comportamiento fue de expansión, resultando en valores superiores a 0.5% a partir del 4° ciclo, considerado como promedio de expansión. Para 20% de cemento se observó que el comportamiento, independientemente de la cantidad de residuo oleoso, fue de expansión. Debido a los resultados y a los límites impuestos en la Tabla 2, los especímenes de ensayo encapsulados no contaminados y contaminados fueron considerados de mediana expansión, teniendo como su valor máximo de expansión 0.80%.

3.3 Pérdida de masa

La Figura 5 presenta los resultados de los ensayos de pérdida de masa por ciclos de humedecimiento, secado y cepillado en especímenes de ensayo encapsulados con 10% y 20% de cemento para las combinaciones de 0%, 2%, 4% y 6% de residuo oleoso.

Los resultados obtenidos demostraron que el aumento de residuo oleoso en las muestras encapsuladas hizo con que existiera una creciente pérdida de masa, tanto para muestras con 10% de cemento cuánto para las muestras estabilizadas con 20% de cemento. Sin embargo, en las muestras encapsuladas con 10% de cemento y contaminadas con 6% de residuo oleoso, la pérdida de masa fue más pronunciada, presentando resultado de 10.37%, mientras que para todas las demás muestras, independientemente de la cantidad de contaminante y de cemento, la pérdida de masa no fue superior a 5.35%.

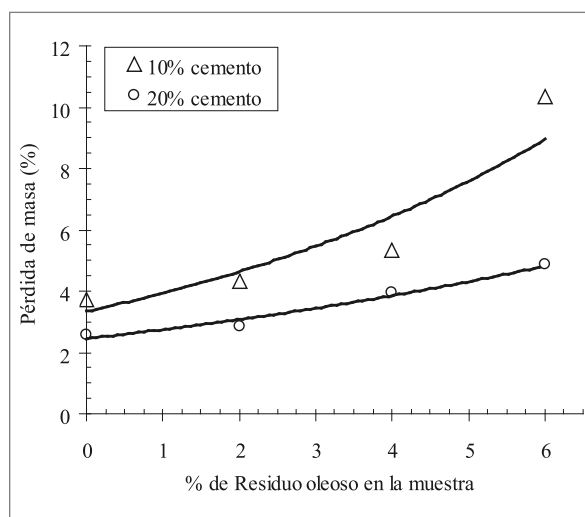


Figura 5. Pérdida de masa del suelo-cemento y suelo-cemento-residuo oleoso

La Tabla 3 presenta los porcentajes de pérdida de masa (PdM) para las crecientes combinaciones de cemento y residuo oleoso (RO).

Tabla 3. Pérdida de masa de las distintas cantidades de cemento y residuo oleoso (RO)

10% de cemento		20 % de cemento	
PdM (%)	RO (%)	PdM (%)	RO (%)
3.73	0	2.55	0
4.31	2	2.86	2
5.35	4	3.95	4
10.37	6	4.85	6

Debido a la falta de límites de referencia para el ensayo de durabilidad por humedecimiento, secado y cepillado propuesto por la NBR 13554 (1996) fueron utilizados los límites establecidos por De la Fuente (1995) y ASTM 559 (1996), los cuales establecen como buena durabilidad la pérdida de masa inferior a 10% para 12 ciclos de humedecimiento, secado y cepillado. Sin embargo, el ensayo propuesto por la norma brasileña asume 6 ciclos de humedecimiento, secado y cepillado.

Para los especímenes de ensayo encapsulados con 10% de cemento conteniendo 0% y 2% de residuo oleoso, se percibió que la durabilidad por pérdida de masa se encontró abajo del límite de 10%, y si comparado, proporcionalmente, el número de ciclos con la mitad del límite establecido, estas muestras atestarían buena durabilidad. Ya para muestras con la misma cantidad de cemento, sin embargo con cantidades mayores de residuo oleoso, los resultados apuntaron una pérdida de masa superior, siendo que para 6% de contaminante para 6

ciclos la pérdida de masa extrapolaría el límite máximo, siendo considerado un material de baja durabilidad.

En los especímenes de ensayo conteniendo 20% de cemento y contaminados con las variadas cantidades de residuo oleoso, se observó que todos los resultados de pérdida de masa están debajo de 5%, siendo que si comparado, proporcionalmente, el número de ciclos con la mitad del límite establecido, éstas muestras atestarían buena durabilidad.

4. Conclusiones

- La variación volumétrica del suelo contaminado con crecientes cantidades de residuo oleoso y encapsulado con 10% de cemento se mostró inestable en todos los ciclos de humedecimiento y secado. Para muestras encapsuladas con 20% de cemento el comportamiento se tornó estable para todos los ciclos analizados, independiente de la cantidad de residuo oleoso.
- El aumento de residuo oleoso provocó creciente pérdida de masa, tanto para muestras encapsuladas con 10% de cemento cuánto para las muestras conteniendo 20% de cemento.
- La pérdida de masa fue más pronunciada para muestras tratadas con 10% de cemento, presentando resultados de hasta 10.37%, mientras que para las demás muestras el resultado de pérdida de masa no fue superior a 5.35%.
- La aplicación de la técnica de solidificación/estabilización utilizando cemento Portland presentó resultados físicos satisfactorios cuanto al comportamiento luego del tratamiento. Los valores de pérdida de masa, para muestras tratadas con 20% de cemento, se mostraron aceptables y satisfactorios ya que ofrecen buena resistencia al desgaste y baja variación volumétrica.
- La utilización de cemento viene consagrándose como tecnología alternativa por ofrecer resultados rápidos y eficaces cuanto al tratamiento de suelos contaminados. Se destaca que el proceso constructivo del suelo/cemento es muy sencillo, pudiendo ser rápidamente asimilado por mano-de-obra no calificada. Entretanto, el empleo de ésta técnica de tratamiento, en especial considerándose los suelos finos, requiere estudios previos de dosificaciones en laboratorio para cada tipo de suelo considerado, pues una cantidad exagerada de cemento, por

motivos técnicos y económicos, podría comprometer la utilización de la solidificación/estabilización.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al PRONEX-FAPERGS al MCT/CNPq y al CNPq (Proyectos de Productividad en Pesquisa n° 301869/2007-3 e Edital Universal 2007 n° 470971/2007-0) por el apoyo financiero para la realización de esta pesquisa. El primer autor agradece al CNPq, por la beca de estudios.

6. Referencias

- ASTM D559 (1996), Test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. ASTM Book of Standards, Soil and Rock, D420-D5611.
- ASTM D560 (1996), Test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures. ASTM Book of Standards, Soil and Rock, D420-D5611.
- Asavapisit S., Nanthamontry W., Polprasert C. (2001), Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Research*, Vol.31, N° 8, pp. 1147-1152.
- Azambuja E., Cancelier D. B. y Nanni A. S. (2000), Contaminação dos solos por LNAPL: discussão sobre diagnósticos e remediação. *Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul*, Porto Alegre.
- Costa O. P. (2005), Avaliação de expansão, contração e resistência à compressão simples de barreiras selantes produzidas com solo laterítico estabilizado quimicamente. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista*, São Paulo.
- Cruz R. C. (2004), Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados. *Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre.
- De la fuente E. L. (1995), Suelo-cemento, usos, propiedades y aplicaciones. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.*, México.
- Ibañez R., Andrés A., Ortiz I. y Irabien I. A. (1998), Experimental study of the waste binder anhydrite in the solidification/stabilization process of heavy metal sludges. *Journal of Hazardous Materials*. Amsterdam, Vol. 57, N° 1-3, pp. 155-168.



- Klich I., Bachelor B., Wilding L. P. y Drees L. R. (1999), Mineralogical alterations that affect the durability and metals containment of aged solidified and stabilized waste. *Cement and Concrete Research*. Vol.29, pp 1433-1440.
- Lima D. C., Rohm S. A. y Barbosa P. S. A. (1993), A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. 32 p.
- Lovato R. S. (2004), Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado a pavimentação. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Marcon A. F. (1977), Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza Volante. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NBR 13554 (1996), Solos cimento: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Associação brasileira de normas técnicas, Rio de Janeiro.
- Nogami J. S. y Villibor D. F. (1995), Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo, 240p.
- Oliveira D. M., Castilhos Júnior A. B., Miotello E. (2003), Avaliação da solidificação/estabilização de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Oliveira S. H. (2002), Avaliação do uso de borra oleosa processada em sistemas de impermeabilização de aterros. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- Pinto M. (2006), "Destinação correta dos resíduos sólidos urbanos requer inicialmente investimentos da ordem de R\$ 1,3 bilhão." [En línea]. *Ambiente Brasil*. Disponible en: <http://www.ambientebrasil.com.br/noticias/index.php3?action=ler&id=19786>. [Accesado el día 12 noviembre de 2006].
- Poon C.S., Chen Z.Q, Wai O. W. H. (2001), The effect of flow-through leaching on the diffusivity of heavy metals in stabilized/solidified wastes. *Journal of Hazardous Materials*. Amsterdam, Vol. 81, Nº 1-2, pp 179-192.
- Rojas J. W. J. (2007), Estudo de remediação de solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rojas J. W. J, Heineck K. S. y Consoli N. C. (2008), Análises do comportamento físico de um solo contaminado por borra oleosa ácida e encapsulado com cimento Portland. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol.13, nº 2, pp 227-225.
- Schwarz L. G. y Krizek R. J. (2006), Hydrocarbon residuals and containment in microfine cement grouted sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, nº 2, pp 214-228.
- USACE (1995), Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material. Technical Letter N° 1110-1-158. U.S Army Corps of Engineers, Washington, 18 p.
- Yilmaz O., Unlu K. y Cokca E. (2003), Solidification/Stabilization of hazardous wastes containing metals and organic contaminants. *Journal of environmental engineering* Vol. 129, nº4, pp 366-376.
- Valls S., Vasquez E. (2000), Stabilization and Solidification of sewage sludges with Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Nº 10, pp 1671-1678.

