



# Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos arcillosos para barreras impermeables de rellenos sanitarios

Musso, Marcos <sup>1</sup>✉ - Pejon, Osni Jose <sup>2</sup>

Recibido: 30 de mayo de 2010 • Aceptado: 23 de diciembre de 2010

## Resumen

*Los suelos arcillosos son usados como barrera de arcilla compactada (CCL) en obras de ingeniería como presas de tierra, lagunas de tratamiento de efluentes y en rellenos sanitarios. Las normativas ambientales de diferentes países coinciden en la necesidad de baja conductividad hidráulica ( $< 10^{-9}$  m/s) de las barreras de fondo. Esto puede ser cumplido usando una barrera de arcilla compactada (CCL) o de geocompuestos de bentonita (GCL).*

*El objetivo de este trabajo es comparar el comportamiento hidráulico de CCLs y GCL. Fueron analizados suelos arcillosos de origen sedimentario de la cuenca de Paraná, de formaciones del Pérmico-Triásico con diferencias en su composición granulometría y mineralógica. Las unidades geológicas elegidas fueron la Fm Corumbataí (San Pablo, Brasil) y la Fm. Yaguarí (Uruguay). El GCL estudiado es compuesto por bentonita sódica y es fabricado por la empresa Ober de Brasil. La Fm. Corumbataí está compuesta por illita, la Fm. Yaguarí por esmectita calcíca y el GCL por esmectita sódica. A pesar de las diferencias, todos los suelos estudiados cumplen la condición de tener conductividad hidráulica menor a  $10^{-9}$  m/s, exigida por diferentes agencias de protección ambiental para barreras impermeables. Los menores valores de conductividad hidráulica se obtuvieron en el GCL, los valores intermedios en la Fm. Yaguarí y los valores mayores en la Fm. Courumbataí.*

**Palabras clave:** *Conductividad hidráulica, suelo arcilloso, barreras impermeables.*

## Abstract

*Clayey soils have been used as compacted clay liners (CCLs) in civil works as landfill, lagoons and embankments. The environmental legislation of different countries agrees in building bottom barriers with hydraulic conductivity smaller than  $10^{-9}$  m/s. This condition can be reached using compacted clay liners (CCL) and geosynthetic clay liners (GCL).*

*The main goal of this work is to evaluate the hydraulic conductivity of CCL and GCL. Permian-Triassic clayey soils of Paraná sedimentary basin with different particle distribution and mineralogy were studied. The clays from Corumbataí Fm. (San Pablo, Brasil) and Yaguarí Fm. (Uruguay) were chosen. The GCL studied is composed by sodic smectite and it is made by Ober in Brasil. Illite, calcic smectite and sodic smectite are the clay mineral in Corumbataí Fm., Yaguarí Fm. and GCL respectively. In spite of the differences, all clayey soils show hydraulic conductivity smaller than  $10^{-9}$  m/s so they meet environmental protection agencies requirement to use in liners. The smallest hydraulic conductivity value was obtained in the GCL and the Yaguarí Fm. hydraulic conductivity values were smaller than Corumbataí Fm. value.*

1 Geotécnica, Facultad de Ingeniería -  
UdelaR, Montevideo, Uruguay

✉ mmusso@fing.edu.uy

2 Geotecnia, EESC - USP, São Carlos-SP, Brasil

**Keywords:** *hydraulic conductivity, clayey soil, liner.*

## INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos son usados en obras de ingeniería donde la estanqueidad del agua es necesaria, como en núcleos de represas hidroeléctricas y de riego, en la base de lagunas de tratamiento de efluentes (Murray 2000). En las últimas décadas se emplea en la base de rellenos sanitarios para residuos urbanos, industriales y peligrosos donde las diferentes normativas de protección ambiental coinciden en la necesidad de tener barreras impermeables de fondo en estas obras.

Para localizar estas obras es necesario realizar un conjunto de estudios geológicos-geotécnicos para identificar los sitios que potencialmente cumplen con diferentes requisitos como: distancia adecuada al centro generador del residuos, apartado de centros poblados, nivel freático en profundidad, suelos arcillosos con espesores de varios metros, entre otros (EPA 1998, Yong *et al.* 1999, Manassero *et al.* 2000, CETESB 2008). Sitios con suelos arcillosos son procurados para la localización de los rellenos sanitarios. Se buscan éste tipo de locales dado que la baja conductividad hidráulica es una característica de éstos suelos (Lambe y Whitman, 1996), por lo tanto podrían cumplir con el requisito de conductividad hidráulica menor a  $10^{-9}$  m/s exigido por diversas agencias de protección ambiental (EPA 1998, CETESB 2008). Estos suelos pueden ser usados en las condiciones naturales u homogenizando y compactando, generando barreras de arcillas compactadas (Compacted Clay Liners CCLs) como forma de alcanzar el espesor y la conductividad hidráulica exigidos por la legislación ambiental.

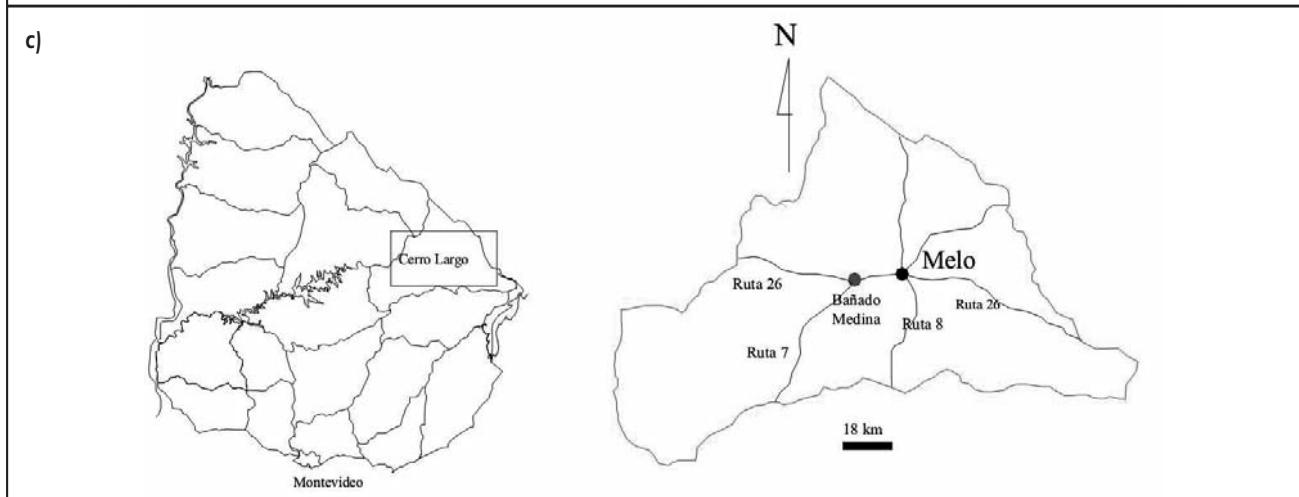
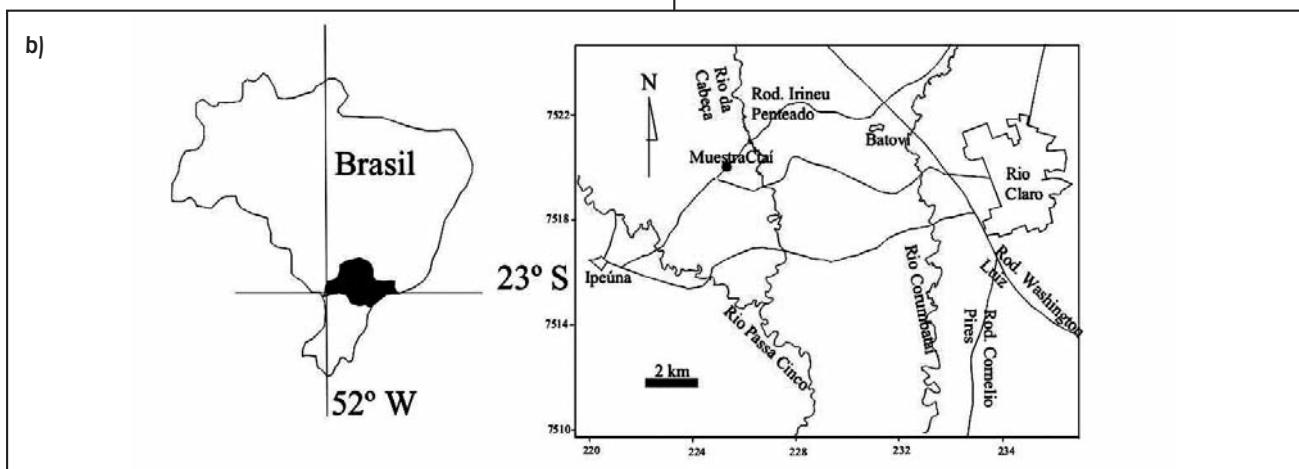
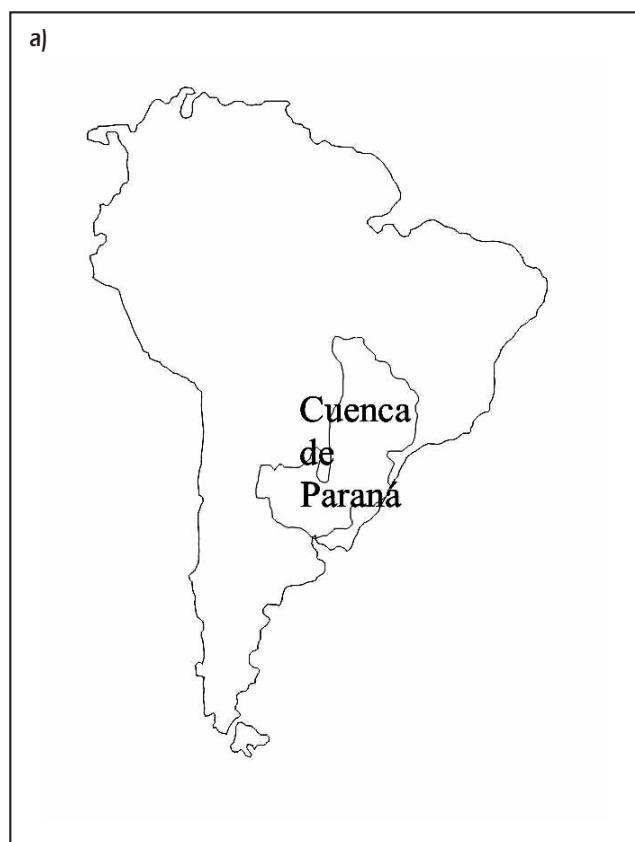


Figura 1. a) Localización de las muestras estudiadas en la Cuenca de Paraná. b) Muestra de la Fm Corumbataí estudiada (Ctaí) próxima Río Claro, San Pablo. c) Muestra de la Fm. Yaguarí estudiada (BM), Bañado Medina, Cerro Largo.

En el caso de los CCLs, existen trabajos desde la década del 50 evaluando la conductividad hidráulica de suelos con diferentes composiciones mineralógicas. *Mitchell et al. (1965)* determinaron que las condiciones de compactación más adecuadas, para obtener bajas conductividades hidráulicas en suelos arcillosos, se logra aumentando la energía de compactación y compactando en el ramo húmedo de la curva de compactación. De ésta forma la estructura del suelo compactado es el factor más influyente en la conductividad hidráulica de los suelos arcillosos.

Muchos CCLs fueron usados como barreras en rellenos sanitarios, la mayoría con desempeño satisfactorio porque en la definición del proyecto se realizaron ensayos de conductividad hidráulica con fluidos similares a los de servicio durante la vida útil del relleno y los espesores de las barreras eran adecuados (*Daniel 1984*).

Un punto crítico es obtener suelos arcillosos que tengan valores de Conductividad Hidráulica (CH) menores a  $10^{-9}$  m/s y en volumen suficiente para la construcción del piso y los taludes de las obras.

Cuando estos suelos son escasos o no cumplen con el requisito de conductividad hidráulica, es necesario utilizar otras alternativas como la adición de bentonita al suelo, el uso de materiales manufacturados como geocompuestos de bentonita (Geosynthetic Clay Liner GCL) o protecciones con geomembrana. Las investigaciones geológicas-geotécnicas durante el proceso de selección de sitios deben comprender estudios de laboratorio y campo que evalúe las propiedades hidráulicas y mecánicas. Los ensayos de laboratorio tienen la ventaja de un mayor control de las condiciones ambientales y de contorno, en cambio los ensayos de campo representan mejor el comportamiento de los suelos en servicio.

La evaluación de un suelo arcilloso para uso de barrera debe comenzar con el comportamiento hidráulico, y si cumple con los requisitos debe estudiarse además las propiedades de adsorción de contaminantes y la compatibilidad química con el líquido con que estará en contacto durante el tiempo de servicio.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento hidráulico, mediante ensayos de laboratorio, de algunos suelos arcillosos a ser usados como barrera impermeable en el fondo de rellenos sanitarios, comparando el comportamiento de suelos arcillosos compactados (Compacted Clay Liner CCL) con el comportamiento de un geocompuesto bentonítico (Geosynthetic Clay Liner).

## ANTECEDENTES

Fueron analizados un par de suelos arcillosos de origen sedimentario de formaciones del Permo-triásico de la cuenca de Paraná (Figura 1a); cuenca sedimentaria localizada en el centro y este de América del Sur ocupando parte de los territorios de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay; pero con diferencias en su granulometría y composición mineralógica. Las unidades geológicas elegidas fueron la Fm Corumbataí (San Pablo, Brasil) (Figura 1b) y la Fm. Yaguarí (Uruguay) (Figura 1c).

La Fm. Corumbataí (Permo-Triásico) está compuesta por limolitas arcillosas y arcillitas limosas con colores violetas, verdes y castaños, presentando intercalaciones de arenas calcáreas y arenas finas. Existen niveles silicificados y calcáreos (*Petri y Fúlfaro 1983*). Éstas litologías afloran en la región de Río Claro, Piracicaba, Limeira y Pirassununga, próxima a la

zona de recarga del acuífero Guarani, en el interior del Estado de San Pablo, Brasil. En el sur de Brasil esta unidad es dividida en las formaciones Estrada Nova y Río do Rastro.

Variaciones granulométricas y mineralógicas fueron determinadas por *Mason et al. (2000)* y *Christofolletti et al. (2001)* en diferentes horizontes. Identificaron esmectita, illita y caolinita, estando la illita y la caolinita presente en todos los horizontes. En algunos horizontes la esmectita es la arcilla dominante, en otros no se identificó la presencia de este mineral. Un nivel próximo a la ciudad de Río Claro es el estudiado en este trabajo.

La Fm Yaguarí (Pérmino) está constituida por arenas finas a medias con intercalaciones de conglomerados, limolitas y arcillitas (*Preciozzi et al., 1985*). Esta unidad compone parte de la secuencia sedimentaria de la Cuenca del Paraná en Uruguay.

Para *De Santa Ana et al. (2006)* el nivel inferior de la unidad está constituida por arenas finas a medias arcillosas, cuarzosas y micáceas, de colores gris, verde con láminas violáceas. El nivel superior está compuesto por intercalaciones de arenas finas y pelitas, éstas con variaciones de colores (verdes, rojas, naranjas). En éste miembro, *Coronel et al. (1987)* identificaron en la región de Bañado Medina diferentes niveles de bentonita compuesta por montmorillonita cárlica, originadas por la alteración de cenizas volcánicas. Estas bentonitas han sido explotados extrayendo y transformando la bentonita mediante activación ácida para decoloración de grasas, aceites, vinos. *Ford y Sergio (1988)* identifican que éstas arcillas tienen potencial uso en catálisis. Esta capacidad fue confirmada en ensayos de determinación de superficie específica con buen desempeño en muestras pilareadas con aluminio, por *Sergio et al. (2006)*. El nivel bentónico identificado como Campo A por *Coronel et al. (1987)* en la región de Bañado Medina es el utilizado en este trabajo.

El GCL estudiado (geocompuesto bentonítico Fortliner) es fabricado por la empresa Ober de Brasil, usando bentonita sódica, con  $5000 \text{ g/m}^2$  de bentonita, compuesta por dos geotextiles de polipropileno (geotextil no tejido de  $350 \text{ g/m}^2$  de cobertura y geotextil tejido de  $120 \text{ g/m}^2$  en la base) espesor de 8 mm (bentonita + geotextiles).

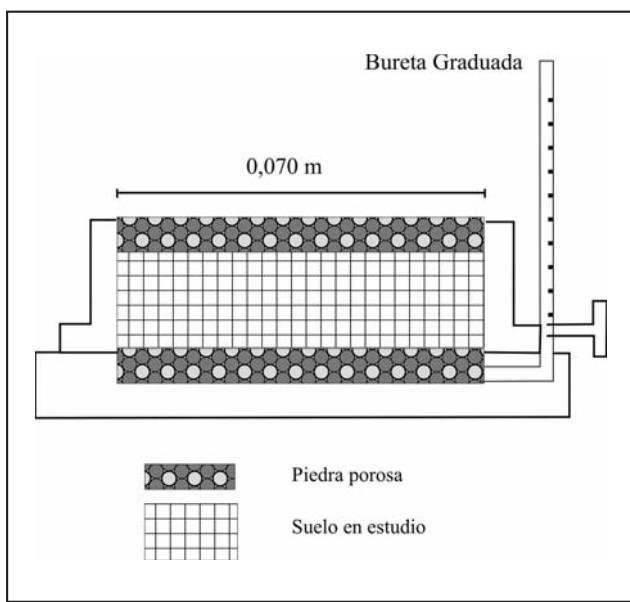
## MÉTODOS

Los suelos fueron caracterizados usando las normas American Society for Testing Materials (ASTM). Se midieron la granulometría, Límites de Atterberg, clasificación de suelos, parámetros de compactación en ensayo Proctor Standard.

La mineralogía de la fracción arcilla fue determinada usando Análisis Térmico Diferencial (ATD) y Difracción de Rayos X (DRX) usando tubo de cobre siguiendo las recomendaciones de *Grim (1953)*, *Mackenzie (1957)*, *Brown & Brindley (1980)*.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue determinada por el método de azul de metileno según *Pejón (1992)*.

La conductividad hidráulica fue determinada en dos tipos de celdas rígidas, una construida en acero inoxidable y acrílico, y la otra es un anillo edométrico. Los CCLs fueron compactados estáticamente en las condiciones de peso específico seco y humedad obtenidos en el ensayo Proctor Standard y el GCL se dejó expandir hasta alcanzar una porosidad de 78 %. Se determinó la conductividad hidráulica por el método de carga variable, adaptando buretas a las celdas rígidas y a los anillos edométricos. Las muestras tienen 0,070 m de diámetro y 0,020 m de altura



**Figura 2. Edómetro adaptado para determinar conductividad hidráulica**

en los ensayos de los anillos edométricos (Figura 2). En los ensayos de las celdas de acero inoxidable y acrílico las muestras tienen 0,091 m de diámetro, 0,019 m de alto tiene la muestra Ctaí y 0,0095 m de alto tiene la muestra de GCL.

Los ensayos por el método carga constante fueron desarrollados en el sistema de celda rígida mediante la aplicación de presión con aire comprimido (74 a 82 kPa) en un sistema de interfase agua-aire (Figura 3), desarrollado para evaluar el transporte de solutos por advección-dispersión, mayores detalles se encuentran en *Musso (2008)*. En todos los ensayos se usó agua destilada, la cual fue desaireada usando una bomba de vacío.

## RESULTADOS

En todas las muestras domina la fracción arcilla, con porcentajes variables de limo y arena muy fina (Tabla 1). La muestra del GCL es la que tiene mayor porcentaje de fracción arcilla, en la muestra de la Fm. Corumbataí (Ctaí) la fracción arcilla es de 54%, la muestra de la Fm. Yaguarí (BM) tiene valor intermedio de fracción arcilla 58%. Los suelos estudiados tienen alta plasticidad, con valores de límite líquido de 360 % y 490 % para el caso de las muestras BM y GCL respectivamente, característicos de suelos con alto contenido de esmectitas.

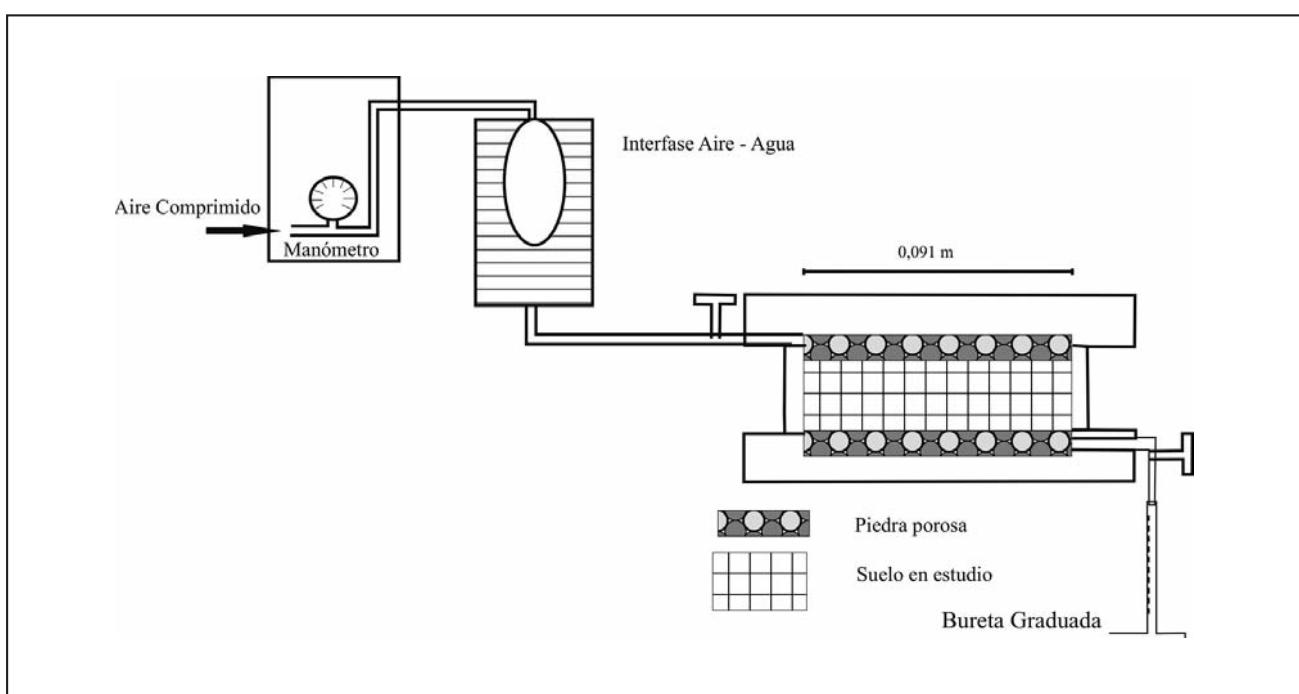
Las muestras Ctaí y BM utilizadas en el ensayo de conductividad hidráulica presentan porosidades similares, en cambio la muestra de GCL presenta porosidad mayor.

Los valores de CIC de la muestra total son de 21 cmol/kg, 65 cmol/kg y 91 cmol/kg para las muestras Ctaí, BM y GCL respectivamente. Considerando sólo la fracción arcilla, la CIC obtenidas son 38 cmol/kg, 112 cmol/kg y 130 cmol/kg para las muestras Ctaí, BM y GCL respectivamente. Éstos valores son indicadores de las variaciones mineralógicas de la fracción arcilla.

Analizando los diferentes ensayos de Análisis Térmico Diferencial (ATD) se observan diferencias marcadas. La muestra Ctaí (Figura 4) tiene picos endotérmicos en 180°C y 600°C y pico exotérmico en 950 °C siendo una mezcla de illita, caolinita y quizás algo de esmectita.

La muestra de BM (Figura 4) tiene un pico endotérmico doble entre 160 y 200 °C, asociado con la solvatación de calcio, otro pico endotérmico en 670 °C, corresponde con esmectita cálcica confirmado con el alto valor de CIC.

La arcilla del GCL (Figura 4) presenta un pico en 170°C y picos menos intensos en 650°C y 850 °C correspondiente con esmectita sódica, confirmado por el alto valor de la CIC.



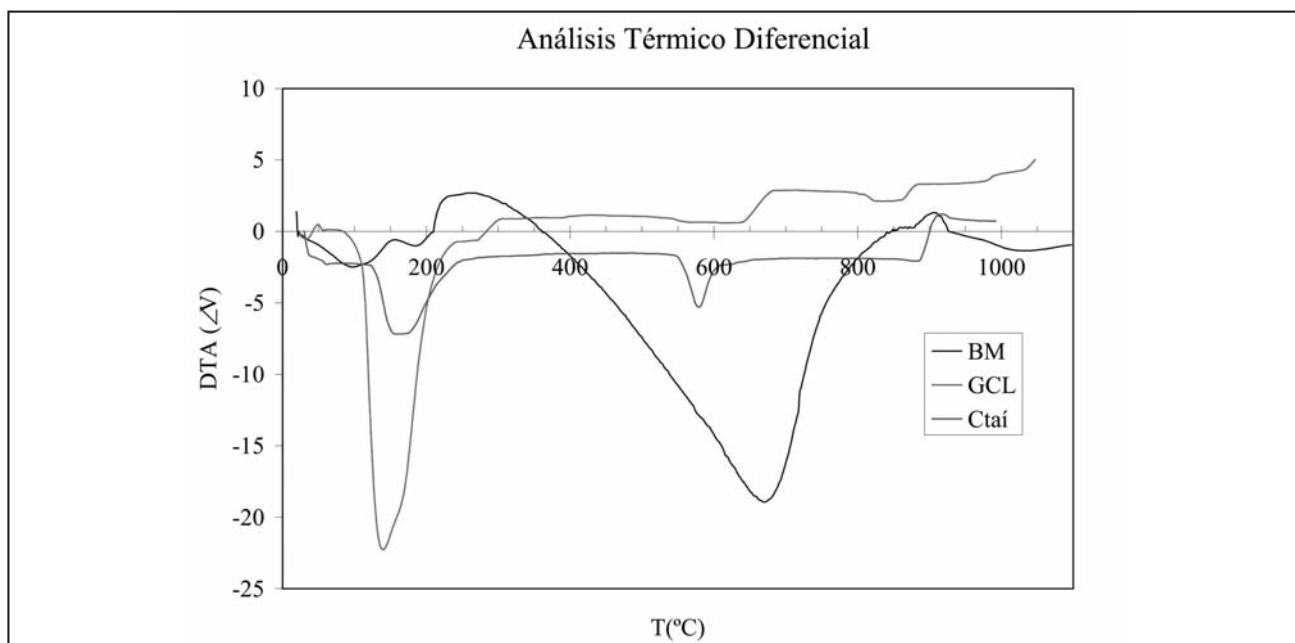
**Figura 3. Sistema para determinación conductividad hidráulica usando interfase aire-agua para aplicar carga hidráulica**

**Tabla 1.** Propiedades de los suelos estudiados

Muestra	Granulometría			LL (%)	IP (%)	Clasificación (SUCS)	CICtotal (cmol/kg)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{opt}$ (%)	n (%)
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)							
Corumbataí Ctaí	15	31	54	74	32	MH	21	15,10	24,0	43
Yaguarí BM	8	34	58	360	315	CH	65	14,0	24,0	48
Bentonita GCL			70*	490*	432*		91			78

\*Bueno et al. (2002)

LL - Límite Líquido IP- Índice Plástico  $\gamma_d$  Peso Específico Seco  $\omega_{opt}$  Humedad óptima n - porosidad

**Figura 4.** Análisis Térmico Diferencial (ATD) - Muestra Ctaí, Muestra BM, Muestra GCL.

El análisis de los diferentes difractogramas muestra diferencias en la fracción arcilla de las muestras. El difractograma de la muestra Ctaí (Figura 5) tiene un pico intenso y abierto en 8° a 8,5° (1,1 a 1,0 nm) correspondiente con illita o interestratificado illita-clorita, verificado con otro pico en 17,5° a 17,8° (0,498 nm). El pico de mayor intensidad 26,5° (0,334 nm) es el pico de mayor intensidad del cuarzo. La muestra de BM (Figura 5) tiene un pico intenso asimétrico y muy abierto en 6,8° a 7° correspondiente con esmectita cálcica. La arcilla del GCL (Figura 5) se identifica un pico intenso y abierto en 7,3 a 7,5 (1,2 nm) correspondiente con esmectita sódica. El pico en 26,8° (0,332 nm) corresponde al cuarzo.

Evaluando de forma conjunta CIC, ATD y DRX se identifican diferentes mineralogías de la fracción arcilla. La muestra Ctaí esta compuesta por illita y algo de caolinita, la arcilla que compone la muestra BM es esmectita cálcica, en cambio la arcilla del GCL es compuesta por esmectita sódica.

La conductividad hidráulica (CH) fue determinada en las diferentes muestras después de verificada la saturación. Los valores de CH de la muestra Ctaí obtenidos en el edómetro son de 4 a 2 x 10<sup>-10</sup> m/s usando el método carga variable (Figura 6). En la celda de acrílico y acero inoxidable los valores de CH obtenidos son de 9 a 6 x 10<sup>-11</sup> m/s en el método de carga constante (Figura 6). La muestra de BM fue ensayada en edómetro (carga variable), obteniéndose valores de 5 a 2 x 10<sup>-11</sup> m/s (Figura 6). El GCL fue ensayado en carga constante en una celda rígida, obteniéndose valores estables de CH 2 x 10<sup>-11</sup> m/s después de 7 días de ensayo (Figura 6).

En todos los casos se cumplen con los requisitos de las legislaciones ambientales (EPA 1998, CETESB 2008) que prescriben valores menores a 10<sup>-9</sup>m/s, por lo tanto los suelos y el GCL pueden ser usados como barreras impermeables.

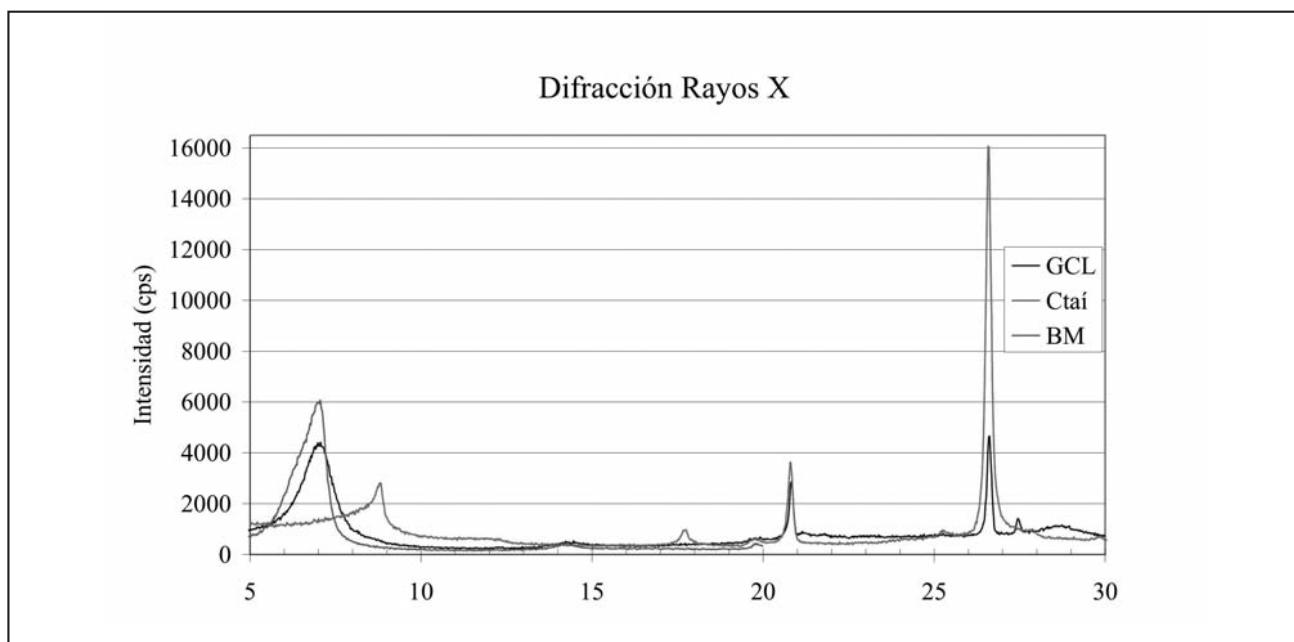


Figura 5. Difracción de Rayos X (DRX) Muestra Ctaí, Muestra BM, Muestra GCL.

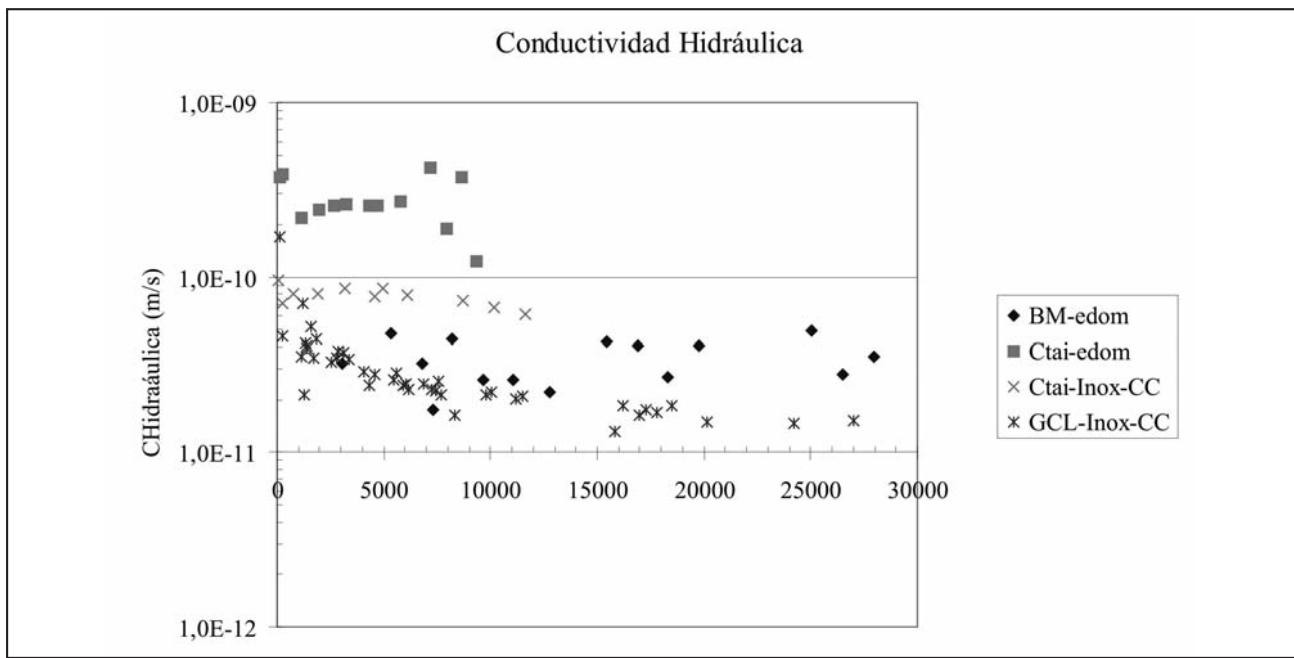


Figura 6. Conductividad Hidráulica –Carga Variable –edómetro muestra Ctaí, Carga Constante muestra Ctaí, Carga Variable –edómetro muestra BM, Carga Constante muestra GCL.

En el ensayo de CH en edómetro el CCL de Ctaí se obtuvieron valores de  $10^{-10}$  m/s mientras que en el CCL de BM los valores obtenidos fueron  $10^{-11}$  m/s. La diferencia de minerales de arcillas (esmectitas en BM e illita -caolinita en Ctaí) y el porcentaje de fracción arcilla influye en el comportamiento hidráulico de los CCLs. Las muestras con esmectita tienen los valores menores de conductividad hidráulica, siendo menores los valores de las muestras con esmectita sódica respecto de las muestras con esmectita cálcica. Aunque las muestras de Ctaí y BM tienen porosidades menores (43 % y 48 %) que la mues-

tra de GCL (78 %), la conductividad hidráulica de ésta es menor. La presencia de sodio como catión de intercambio en la esmectita sería el responsable de este comportamiento, dado que genera una doble capa mayor que cuando el calcio es el catión de intercambio, reduciendo la porosidad efectiva.

El comportamiento hidráulico de los suelos es adecuado para uso en barreras y debe estudiarse la compatibilidad química y la adsorción de contaminantes de los diferentes suelos para verificar el desempeño en servicio y a largo plazo.

## CONCLUSIONES

Los suelos estudiados presentan diferentes proporciones de fracción arcilla, 70 % el GCL 54 % la Fm. Corumbataí y 58 % la Fm. Yaguarí.

El suelo de la Fm. Corumbataí estudiado está compuesto por illita y caolinita, en cambio el suelo de la Fm. Yaguarí está compuesto por esmectita cálcica. La arcilla que compone el GCL es esmectita sódica. Estas diferencias influyen en los valores de los límites de Atterberg obtenidos, siendo mayores en el GCL y la Fm. Yaguarí.

Los valores de conductividad hidráulica de los CCLs de Ctaí variaron de  $4 \times 10^{-10}$  m/s a  $6 \times 10^{-11}$  m/s. El GCL y el CCL

de BM tienen valores similares de conductividad hidráulica de 5 a  $2 \times 10^{-11}$  m/s, siendo menores los valores la esmectita sódica del GCL comparados con los valores de la esmectita cálcica que compone BM.

Las diferencias conductividades hidráulicas son generadas por las distintas mineralogías de las muestras, que tendrían distintas porosidades efectivas como respuesta a las diferencias en el espesor de la doble capa.

En todos los casos los suelos cumplen con los requisitos de las legislaciones ambientales que prescriben valores menores a  $10^{-9}$  m/s, por lo tanto pueden ser usados como barreras impermeables.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BRINDLEY, G. & W.BROWN, G. eds, 1980

Cristal structures of clay minerals and their X-ray identification.

*Mineralogical Society Monograph N° 5. 195pp. Mineralogical Society, London.*

BUENO, B.S., VILAR, O. M., PALMA, S. L. E PIMENTEL, V.E. 2002

Laboratory studies for the development of a GCL.

In: . Zanzinger, Koener y Gartung (eds.) *Clay Geosynthetic Barriers. 365-370.*

CHRISTOFOLETTI, S. R., MASSON, M. R., THOMAZELLA, H.R., FUGIE, A., MORENO, MMT, VALARELLI, J.V., 2001.

Mapeamento e Caracterização Geológica/Tecnológica da formação Corumbataí com vista ao seu Emprego na Indústria de revestimentos Cerâmicos.

*Parte II Geología e correlação entre as minas e jazidas estudadas. Cerâmica Industrial, 6 (1) Jan/Fev. 24-31.*

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) 2008.

Resíduos urbanos e de serviços de saúde. 2008.

Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso en: 12-1-2008

CORONEL, N. ET AL. 1987.

Memoria Explicativa de la carta de materias primas minerales no metálicas. escala 1:1.000.000. Dinamige, Ministerio de Industria y Energía. Montevideo. 119 pp.

DANIEL, D E.. 1984

Predicting hydraulic conductivity of clay liners.

*Journal of Geotechnical Engineering Volumen 100, Nº2 285-300.*

DE SANTA ANA, H.; GOSO, C.; DANERS, G., 2006.

Cuenca Norte: estratigrafía del Carbonífero-Pérmino in Cuencas sedimentarias del Uruguay:

Geología, paleontología y recursos minerales del Paleozoico.

*En Verolavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. Eds. D.I.R.A.C. Montevideo Uruguay. 326pp. ISBN-9974-0-0316-4.*

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA-US) 1993.

Solid Waste Disposal Facilitated Criteria. Technical Manual. EPA 530-R-93-017. 1993.

Revised in april 1998. <<http://www.epa.gov/osw>>. Acesso en: 12-1-2008

FORD, I. Y SERGIO, M. 1989.

Caracterización mineralógica y origen probable de la bentonita de Bañado de Medina F. Yaguarí, Ps.

*Boletín de investigación N° 23, 16pp. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay*

GRIM, R. E. 1953

Clay Mineralogy.

*McGraw-Hill. 384 pp New York.*

LAMBE, T. W. Y WHITMAN, R. V. 1996.

Mecánica de suelos.

*Limusa, 582pp. Mexico*

MACKENZIE, 1957

The differential Thermal Investigation of Clays.

*Mineralogical Society London.*

MANASSERO, M.; BENSON, C. H; BOUANZA, A. SOLID WASTE CONTAINMENT SYSTEMS 2000.

SOLID WASTE CONTAINMENT SYSTEMS.

International Conference on Geotechnical & Geological Engineering-GeoEng2000.

*CD-ROM Melbourne. 19-24 November, Melbourne, Australia*

MASSON, M. R. CHRISTOFOLETTI, S. R., THOMAZELLA, H.R., FUGIE, A., ZANARDO, A., ALEGRE, V. 2000.

Mapeamento e Caracterização Geológica/Tecnológica da formação Corumbataí com vista ao seu

Emprego na Indústria de revestimentos Cerâmicos.

*Parte I Geología e correlación entre as minas e jazidas estudadas. Cerâmica Industrial, 5 (6) Nov. Dez. 24-33.*

- MITCHELL, J.K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. C. 1965.  
Permeability of compacted clay.  
*Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 91, Nº SM4, 41-65.*
- MURRAY H. H. 2000.  
Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview.  
*Applied Clay Science. Vl. 17, Issues 5-6, 207-221.*
- MUSSO, M. 2008.  
Transporte de solutos em barreiras de material argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL): fluxos diretos, acoplados e comportamento membrana.  
*Tesis de Doctorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 227pp.*
- PEJON, O. J. 1992  
Mapeamento geotécnico da Folha Piracicaba- SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos.  
*Tesis. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.*
- PETRI, S. & FÚLFARO, V. J. 1983.  
Geología do Brasil (Fanerozoico).  
*T.A. Queiroz: Ed. da Universidade de São Paulo. 631pp. São Paulo.*
- PRECIOZZI, F. et al. 1985.  
Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay escala 1:500.000.  
*Dinamige, Ministerio de Industria y Energía., 90pp Montevideo.*
- SERGIO, M.; MUSSO, M., MEDINA; J., DIANO, W. 2006.  
Aluminim-pillaring of a montmorillonitic clay: textural properties as a function of the starting particle size.  
*Adv. in Tech. of MAt. and MAt. Proc. J. (ATM, ISSN 1440-0731), Vol. 8[1] 5-12*
- YONG, R. N.; TAN, B. K.; BENTLEY, S. P. AND THOMAS, H. R. 1999.  
Competency assessment of two clay soil from South Wales for Landfill liner contaminant attenuation.  
*Quarterly Journal of Engineering Geology, 32, 261-270*