

USES OF CLAYEY SOILS IN ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS IN URUGUAY

GEOTÉCNICA AMBIENTAL EN URUGUAY: USO DE SUELOS ARCILLOSOS

Marcos Musso

Dto. Ing. Geotécnica, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay, mmusso@fing.edu.uy

ABSTRACT:

Clayey soils are used as liners in several environmental solutions as bottom of landfills, lagoons, dams. Therefore, hydraulic properties must be measured to assess the good performance of environmental solutions. Environmental regulations demands low hydraulic conductivity to use these soils, lower than 10^{-9} m/s for this applications. In Uruguay, clayey soils are common and widespread in the territory. They are residual soils developed by weathering different rocks or transported soils generated in several continental environments. In this paper two clayey soils will be shown as examples of potential use to environmental solutions. Different natural clayey soils from Uruguay and mixtures bentonite-sand were analysed. The first clayey soil studied is Medina Clay –MC (develops over Yaguari Fm.) The second soil is a Quaternary continental sedimentary unit (Libertad Clay-LC), it is composed by silty clayey and clayey sediment. The hydraulic conductivity shows low to very low values between 10^{-7} to 10^{-10} m/s. While LC is widespread in all country, MC is restricted in a little area in the northeast of Uruguay. As LC has variability in its hydraulic conductivity values in laboratory, each project should develop with a specific laboratory and field test program to evaluate regulations requirements.

RESUMEN

Suelos arcillosos son usados como barreras en aplicaciones ambientales como rellenos sanitarios, lagunas, presas. Para valorar el buen desempeño en estas soluciones ambientales la conductividad hidráulica debe ser medida dado que las regulaciones ambientales exigen baja conductividad hidráulica (K) menor a 10^{-9} m/s en los suelos a usar. En Uruguay los suelos arcillosos son comunes en diferentes regiones, algunos son suelos residuales generados en diferentes rocas, otros son suelos transportados generados en diferentes ambientes continentales. En este artículo se analiza el potencial uso en soluciones ambientales de dos suelos arcillosos, suelos naturales y mezclas arena-bentonita. El primer suelo analizado es Medina Clay (MC) perteneciente a la Fm. Yaguari, y el segundo suelo es Libertad Clay (LC) que son sedimentos arcillo limosos y arcillosos continentales del Cuaternario. Las conductividades hidráulicas son bajas a muy bajas con valores de 10^{-7} a 10^{-10} m/s. Libertad Clay cubre amplias regiones del país, en tanto Medina Clay está restringida su localización al noreste del Uruguay. Se observa variabilidad en los resultados de K en ensayos de laboratorio de LC, por lo que cada proyecto que use estos suelos debe tener un programa de ensayos de campo y laboratorio que verifique los requisitos ambientales exigidos.

KEYWORDS: Hydraulic conductivity, bentonite, clayey soils, liners, Libertad Clay.

1 INTRODUCCIÓN

El uso del territorio de forma ambientalmente sustentable es un desafío para la sociedad en pleno siglo XXI, para lo cual se necesita una gestión adecuada de varias actividades así como los residuos que las mismas generan. La disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) así como el tratamiento de efluentes domésticos, industriales y agrícolas requieren de obras de ingeniería que utilizan diferentes tipos de suelos, en particular suelos arcillosos por su baja conductividad hidráulica son usados para el tratamiento de efluentes de diversos orígenes por su capacidad de mantener la estanqueidad de los líquidos (Murray 2000).

En regiones donde los suelos arcillosos son abundantes existe la práctica de usarlos como barreras de arcilla compactada (Compacted Clay Liner - CCL). En este caso es necesario la selección del sitio y la determinación de las propiedades geotécnicas de los suelos a usar como barreras de arcillas, en particular la composición mineralógica y granulométrica, los parámetros de compactación y la conductividad hidráulica son parámetros a determinar de forma exhaustiva. Las agencias de regulación ambiental piden espesores de arcillas y conductividad

hidráulica baja, en particular la EPA (1998) exige mínimo 1 m de arcilla compactada con conductividad hidráulica menor a 10^{-9} m/s. En general las agencias de regulación ambiental exigen propiedades establecidas por regulaciones o protocolos, y son pocos las agencias que admiten diseño con valores de desempeño de estanqueidad (EPA 1998, Yong et al. 1999, Manassero et al. 2000, CETESB 2008).

En todos los casos, los estudios geotécnicos deben ejecutarse de forma tal que se conozcan las propiedades del sitio donde se realizará la obra, así como los yacimientos que proveerán los materiales para la misma. En el caso de obras para la contención de agua (presas para riego, hidroeléctricas) o para minimizar el movimiento de solutos (lagunas de tratamiento de efluentes o rellenos sanitarios) los estudios deben buscar, identificar y caracterizar los volúmenes suficientes de suelos con contenido de arcilla que cumplan con los requisitos de proyecto o reglamentación ambiental. No siempre se encuentran los volúmenes suficientes con las propiedades buscadas en el sitio de la obra, por lo tanto es necesario el uso de yacimientos a mayor distancia de la obra o buscar otras alternativas como la adición de bentonita, uso de geocompuestos de bentonita y/o geomembranas.

La adición de bentonita a los suelos locales o hacer mezclas

arena-bentonita para disminuir la conductividad hidráulica (K) es un proceso común en mejoramiento de suelos para uso en barreras en rellenos de arcillas. La mayoría de las veces se usa bentonita sódica (la mineralogía principal es esmectita sódica). Éste proceso disminuye la conductividad hidráulica y varios autores (Gelason *et al.* 1997, Ebina *et al.* 2004, Sällfors & Öberg-Högsta 2002, entre otros) coinciden en que el porcentaje de bentonita adicionado a un suelo varía de 3 % a 15 %. Con esto se obtienen valores de K menores a 10^{-9} m/s, dependiendo del contenido de arcilla original del suelo y del mineral de arcilla adicionada.

Otras aplicaciones específicas de las mezclas es el almacenamiento de residuos radiactivos. Komine (2004) usó diferentes mezclas (5 a 50 % de bentonita) y determinó K hidráulica en un equipo de pared flexible. Obtuvo valores de K de $2,7 \times 10^{-10}$ m/s a $4,9 \times 10^{-12}$ m/s en las muestras con 5 a 20 % de bentonita y 7×10^{-12} m/s a 1×10^{-12} m/s en las muestras con 30 a 50 % de bentonita. En la misma línea de estudio, Akgün (2010) evaluó mezclas con 15 a 30 % de bentonita. Para determinar K usó un equipo de pared rígida y el método de carga variable. La saturación de las muestras demoró de 1,5 a 2 meses. Determinó valores de $6,4 \times 10^{-9}$ m/s a $8,9 \times 10^{-12}$ m/s para las mezclas de 15 y 30 % respectivamente. Con el aumento del contenido de bentonita disminuye la K.

Al-Rawas *et al.* (2006) usan attapulgita como arcilla en la mezcla, en porcentajes que varían de 5 % a 30 % y compactados en condiciones de humedad 2 % mayor a la óptima. Obtuvo valores entorno de 6×10^{-9} m/s de K en las muestras con 30% de arcilla.

Se observan en los trabajos citados metodologías diferentes, algunos usan permeámetro de pared rígida y otros de pared flexible. La mayoría usa esmectitas sódicas, algunos evalúan esmectitas cálcicas u otras arcillas como en el caso de Al-Rawas *et al.* (2006). En todos los casos, con porcentajes variables de 5 a 15 % de bentonita adicionada, obtienen valores de K menores a 10^{-9} m/s.

Algunos autores (Petrov *et al.* 1997, Shackelford *et al.* 2000, Musso & Pejon 2010) observan un aumento en la K en muestras con bentonita sódica que cuando se percola una solución con alta concentración de solutos, comprometiendo el desempeño como barrera impermeable. Existen nuevos materiales como geocompuestos de bentonita y geomembranas de diversas composición que son usados en el diseño de esta clase de obras, sin embargo el uso de suelos arcillosos continúa siendo una opción para esta clase de obras de protección ambiental.

En este trabajo se presenta el desempeño de distintos suelos arcillosos de Uruguay así como mezclas de bentonita-arena para uso como barrera en aplicaciones ambientales.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se analizan varios suelos arcillosos de diferentes edades y orígenes, localizados en el sur y noreste del Uruguay.

Se utilizaron suelos arcillosos de dos regiones del Uruguay, la formación Yaguarí (noreste de Uruguay), así como suelos arcillosos de Libertad Clay (sur del Uruguay). La Fm. Yaguarí esta compuesta por areniscas finas a gruesas con niveles arcilloarenosos, limolitas y lutitas. En la región de Bañado Medina existen depósitos de bentonita cálcica de donde se

obtuvieron muestras, denominándolas Medina Clay (MC). Libertad Clay (LC) está compuesta por limos arcillosos y arcillas limosas depositadas durante el Cuaternario en ambiente continental y está presente en todo el Uruguay, fundamentalmente en la región sur (Musso *et al.* 2019).

Se realizan mezclas de bentonita sódica comercial con arena para evaluar el desempeño de diferentes proporciones de mezclas.

2.1 Métodos

Se realizó la caracterización granulométrica (ASTM D 422), límites de Atterberg (ASTM D-4318), clasificación de suelos (ASTM D 2487), la determinación de los parámetros de compactación mediante ensayo Proctor normal (ASTM D 698).

La mineralogía fue analizada mediante la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante el método de azul de metileno (Pejon 1992) y se realizó difracción de rayos x (DRX) para determinar su composición (Brown & Brindley 1980)

Los ensayos de conductividad hidráulica fueron realizados con dos métodos, carga variable y carga constante.

Para las mezclas de bentonita-arena fueron utilizadas arena, pasante el tamiz 10 y retenido en el tamiz 200 con bentonita sódica comercial. Se realizaron dos mezclas de bentonita-arena (10 % - 90 %) y (15% - 85 %) respectivamente. Además se comparó con un suelo arcilloso obtenido de la Fm. Yaguarí (Medina Clay - MC) en una cantera en la zona de Bañado Medina.

Las muestras disturbadas e indisturbadas de Libertad Clay (LC) se extrajeron en dos lugares en el sur del país (puntos 1 y 2) a 1 m y a 2 m de profundidad. Se determinó el peso específico seco "in situ", el cual se usó como parámetro de compactación en los ensayos de conductividad hidráulica.

Los ensayos de K de las mezclas bentonita-arena se realizaron en edómetros (carga variable) como Musso & Pejon (2011), con peso específico menores a los obtenidos en los ensayos Proctor. La K de las muestras de Libertad Clay se usaron sistemas de carga constante como Musso *et al.* (2019).

3 RESULTADOS

En el análisis granulométrico de los suelos (Medina Clay y Libertad Clay) se observa al bajo contenido de arena y alto contenido de arcillas (Tablas 1 y 2). Los límites de Atterberg corresponden con suelos de arcillas con media a alta plasticidad.

Tabla 1 Características y propiedades del suelo de Bañado Medina y de las mezclas bentonita-arena

	CM	Bent-10	Bent-15
Arena (%)	8	90	85
Limo (%)	34	5	6
Arcilla (%)	58	5	69
CIC _{total} (cmol/kg)	65	8	10
γ_d (kN/m ³) /	14,0 /	17,6 /	17,4 /
ω_{opt} (%)	24,0	13,0	15,0

SUCS CH

Tabla 2 Características y propiedades de los suelos de Libertad Clay

	LC1 (punto 1 1m)	LC2 (punto 1 2m)	LC3 (punto 2 1m)	LC4 (punto 2 2m)
Arena (%)	1	1	1	10
Limo (%)	51	48	70	68
Arcilla (%)	48	51	25	22
CICtotal (cmol/kg)	36	30	31	24
γ_d "in situ" (kN/m ³)	13,8	12,4	15,5	nd
SUCS	CH	CH	CH	ML

La mineralogía de la fracción arcilla es compuesta principalmente por esmectita cálcica (MC) y por esmectita sódica en el caso de la bentonita comercial, además se identifica cuarzo entre los componentes principales no arcillosos (Figura 1).

Difractograma

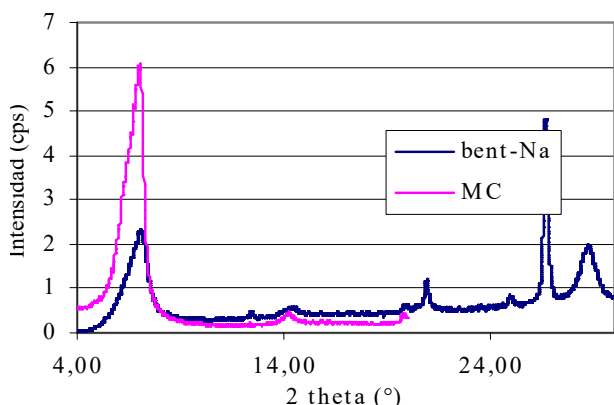


Figura 1 DRX Difractogramas de las arcillas. Medina Clay (MC), bentonita comercial (Bent-Na). E (Na) esmectita sódica, E (Ca) esmectita cálcica, Qzo-cuarzo

En la Tabla 1 se muestran las características y propiedades de mezclas bentonita-arena. La muestra MC tiene un alto porcentaje de arcilla comparando con las mezclas arena-bentonita. La CIC de MC es de 6 a 8 veces mayor respecto de las mezclas, por lo tanto tiene mayor capacidad de retención de solutos.

Los valores de K se estabilizan luego de varios días de ensayo (Figura 2) y en todas las muestras ensayadas se determinaron K menores a 10^{-9} m/s. Cumpliendo con los requisitos de las reglamentaciones ambientales. Esto se cumple incluso con pesos específicos secos del 85%, lo cual no significa que en una obra este sea el valor del parámetros a considerar dadas las dificultades de homogenización y de control de la compactación en grandes extensiones. Los valores de K obtenidos en las mezclas son

similares a los mostrados por otros autores (Komine 2004, Akgün 2010) marcando el efecto positivo del uso de bajo contenido de bentonita sódica en la disminución de la conductividad hidráulica del suelo.

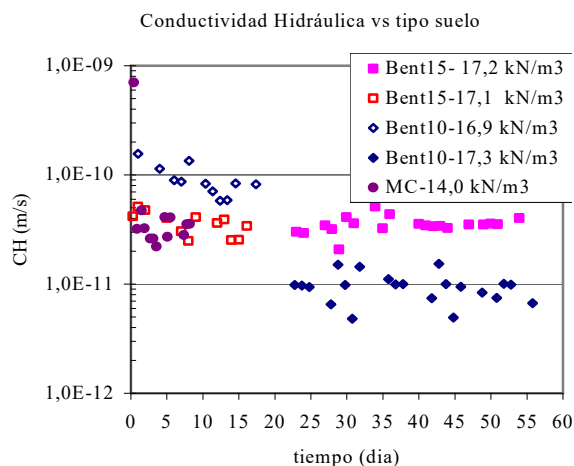


Figura 2 Conductividad Hidráulica de las mezclas Bent10, Bent15 y MC.

El suelo MC de tiene valores de K bajos similares a las mezclas de Bent10, sin embargo el peso específico es significativamente menor (14 kN/m^3) comparado con las mezclas (17 kN/m^3).

En la Tabla 2 se muestran las características de los suelos de Libertad ensayados. Se observa que el contenido de arcilla y limo es variable, con algunas muestras en el entorno de 50 % de arcillas y otras con 25 % de arcillas. Además los valores de la CIC de los suelos y el peso específico seco son similares. Los valores de peso específicos son menores a los parámetros de compactación de las mezclas Bent10 y Bent15; y similares a los valores de MC. Comparando con la CIC de MC y las mezclas, las muestras de LC tiene valores que son la mitad por lo tanto tiene capacidad de retención de poluentes intermedio entre las mezclas de bentonita y MC.

En las Figuras 3 y 4 se observan la conductividad hidráulica de los suelos de Libertad Clay. En 3 casos la K es menor a 10^{-9} m/s, en cambio en una de las muestras (LC-3) la K es de 10^{-8} m/s. Todas las muestras alcanzan su estabilidad en 20 a 30 días d ensayo.

En el caso de Libertad Clay existe variabilidad en sus propiedades hidráulicas, por lo cual no debe generalizarse un comportamiento de acuerdo con las reglamentaciones ambientales. En cada caso debe realizarse la determinación en ensayos de laboratorio y también en campo para realizar la adecuada selección del suelo a utilizar como barrera.

Tabla 2 Características y propiedades de los suelos de Libertad Clay

	LC1 (punto 1 1m)	LC2 (punto 1 2m)	LC3 (punto 2 1m)	LC4 (punto 2 2m)
Arena (%)	1	1	1	10

Limo (%)	51	48	70	68
Arcilla (%)	48	51	25	22
CICtotal (cmol/kg)	36	30	31	24
γ_d "in situ" (kN/m ³)	13,8	12,4	15,5	nd
SUCS	CH	CH	CH	ML

La mayoría de las 7 muestras estudiadas tienen comportamiento hidráulico que cumplen con las exigencias de las regulaciones ambientales. En el caso de las mezclas bentonita-arena tienen la facilidad de ser una alternativa en regiones donde la abundancia de suelos arcillosos no cumplen con las expectativas de volumen o de desempeño hidráulico exigido. En el caso de Libertad Clay la amplia distribución en la región sur del Uruguay la torna una fuente de interés para el uso en aplicaciones ambientales.

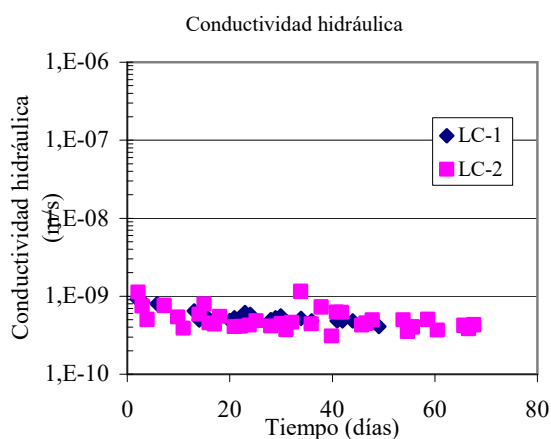


Figura 3 Conductividad Hidráulica de LC (punto 1)

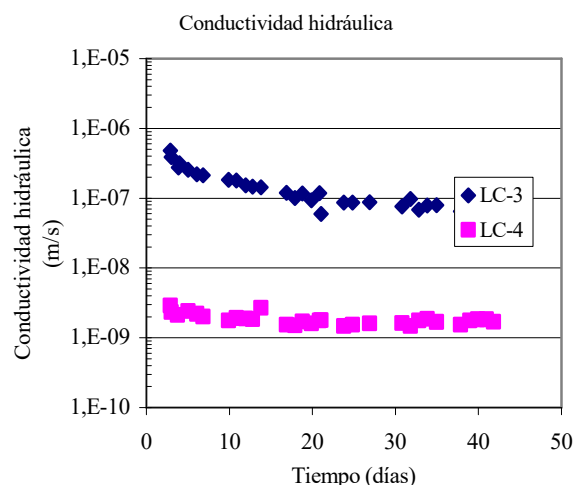


Figura 4 Conductividad Hidráulica de LC (punto 2)

La compatibilidad química con solutos de las diferentes muestras ensayadas no se evaluó, pero existen antecedentes de aumento de la K de barreras con bentonita sódica en contacto con soluciones con alta concentración (Petro et al. 1997, Schackelford et al 2000, Musso & Pejon 2010).

4 CONCLUSIONES

Los suelos analizados tienen distintas cantidades y mineralogía de arcillas. Los valores de conductividad hidráulica obtenidas en las mezclas bentonita-arena y en Medina Clay son bajas cumpliendo con los requisitos de las regulaciones ambientales para uso en barreras. La mayoría de los suelos de Libertad Clay tienen valores de conductividad hidráulica que cumplen los requisitos de las regulaciones ambientales, en cambio un suelo analizado tiene presenta algunas muestras con valores mayores a los exigidos para barreras.

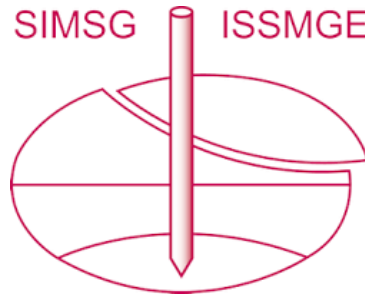
La compatibilidad química de los suelos arcillosos con líquidos de distintos solutos no fue analizada, por lo cual es necesario evaluar el desempeño de largo plazo previo a usar los suelos como barrera de líquidos diferentes al agua.

5 REFERENCIAS

- Akgün, H. 2010 Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing. *Applied Clay Science* 49 (2010) 394
- Al-Rawas, A.A; Mohamedzein, Y. E-A; Al-Shabibi, A.S. and Al-Katheiri, A. 2006 Sand-Attapulgitic Clay Mixtures as a Landfill Liner. *Geotechnical and Geological Engineering* Volume 24, Number 5, 1365-1383.
- ASTM 1988. Standard methods D422, D698, D2487, D3385 Annual Book of Standards – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, V.04.08, ASTM Publication, Philadelphia, USA.
- Brown, G and Brindley, G. W. 1980 X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: Brown, G. & Brindley, G.W. Eds. *Crystal structures of Clay Minerals and Their Identification*. Mineralogical Society Monograph N° 5. 305-359

- 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 em: 12-1-2008
- Ebina, T; Minja, R. J. A.; Nagase, T.; Onodera, Y & Chatterjee, A. 2004 Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. *Applied Clay Science* 26, 3- 12
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., and Eykholt, G. R. 1997 Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123,5, 438-445.
- H. H. Murray. 2000 Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview *Applied Clay Science*, 17 (2000), 207-221
- EPA (US) 1998 Solid Waste Disposal Facility Criteria: Technical Manual. 1993. 530-R93-17.revised 1998.
- Komine,H. 2004 Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill- *Applied Clay Science* 26, 13- 19
- Lambe T.W. 1958 The engineering behaviour of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 84, 1-35.
- Manassero, M.; Benson, C. H; Bouazza, A. 2000. SOLID WASTE CONTAINMENT SYSTEMS. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering-GeoEng2000. CD-ROM Melbourne
- Mitchel J. K., Hooper, D. R. & Campanella, R. G. 1965 Permeability of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Engng Div. ASCE* 91,41-66.
- Musso, M. & Pejon, O. 2011 Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos arcillosos para barreras impermeables de rellenos sanitarios. *Revista ASAGAL*, v.:26, p.: 103 - 110.
- Musso, M. and Pejon, O.J. 2010. Hydraulic conductivity and chemical performance of Brazilian geosynthetic clay liner (GCL) using KCl and CuCl₂ solutions. *9th International Conference on Geosynthetics*, São Paulo 1035-1038.
- Musso, M.; Bango, G.; Leite, L; Flaquer, A.; Rodriguez, R. 2019 Influencia de la Composición e Historia Geológica en las Propiedades Hidráulicas de la Fm. Libertad. *IX Congreso Uruguayo de Geología*. Trinidad, Flores, Uruguay.
- Sällfors, G., & Öberg-Högsta, A.-L. 2002 Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotech. Geologic. Eng.*, 20,1, 65-80.
- 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 de Doctorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2V.
- Petrov, R.J., Rowe, R.K. and Quigley, R.M. 1997. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123 (8), 683-695.
- Rodriguez Carrión, R., Bango, G; Flaquer, A. **Musso, M.** 2017 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LA FM LIBERTAD: ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO. *XX CONGRESO ARGENTINO DE GEOLOGÍA*. TUCUMÁN. ARGENTINA.
- Shackelford, C., Benson, C., Katsumi, T. and Edil, T. 2000. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-3): 133-161.
- 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.

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.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.