



Estudio experimental y modelado del flujo hidráulico en suelos limo-bentoníticos compactados para su uso en barreras naturales

Experimental study and hydraulic modeling in limo-bentonite compacted for use in natural barriers

Alercia Biga, Carolina ¹ ✉ - Eberhardt, Marcelo - Arrua, Pedro - Aiassa Martínez, Gonzalo

Recibido: 11 de mayo de 2015 • Aceptado: 30 de octubre de 2015

Resumen

Los suelos loésicos de Córdoba, presentan una estructura macroporosa y un marcado comportamiento inestable en presencia del agua. Esta característica estructural, los vuelve vulnerables en los procesos de conducción y transporte de agentes externos bajo fenómenos de infiltración. Su mejoramiento mediante el empleo y adición de materiales naturales como la motmorillonita sódica, hace posible su uso como barreras naturales de baja permeabilidad acorde a lo reglamentado por los organismos internacionales. De esta forma, se logra la disminución de su valor de conductividad hidráulica lo cual permite su empleo en la construcción de depósitos de rellenos sanitarios. En este trabajo, se presentan resultados de infiltración en muestras moldeadas de suelo local con adición de bentonita sódica en diferentes porcentajes, moldeadas con diferentes valores de densidad de compactación. Se analizó el comportamiento hidráulico mediante el uso de un equipo de permeabilidad a pared flexible y se ha establecido el ascenso capilar. Los resultados indican que es posible la disminución de la infiltración de un fluido permeante a través del medio poroso, mediante el incremento de la densidad natural del suelo optimizada mediante procesos mecánicos en conjunto con la incorporación de bentonita.

Se observó una respuesta experimental no lineal en las curvas de infiltración obtenidas en diferentes mezclas mejoradas con adición de bentonita. Este comportamiento de características variables, en función del tiempo y de la presencia de adición incorporada, permitió establecer los parámetros necesarios para calibrar el modelo de infiltración propuesto.

Palabras clave: *Bentonita, Densidad Seca, Permeámetro a Pared Flexible, Suelo loessico.*

Abstract

Loessic soil has a macroporous structure and a marked unstable behaviour in presence of water. This structural feature becomes them more vulnerable in transport processes of external agents under low infiltration phenomena. Its improvement through adding natural materials such as sodium motmorillonite enables its use as low permeability natural barriers according to international organizations. Thus, a reduction in the hydraulic conductivity value allows its use in

1. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad regional Córdoba.
Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación

✉ caro_alercia@hotmail.com

the construction of landfill deposits. This work presents the infiltration results on remoulded local soil samples with addition of sodium bentonite in different percentages and different values of moulded dry density. The hydraulic behaviour was analyzed by using a flexible wall permeameter. Also the capillary rise was established. The results indicate that it is possible to reduce the infiltration through the porous medium, by increasing the natural density of compaction of the soil, by using mechanical processes optimized in conjunction with the addition of bentonite. A non-linear experimental response was observed on the permeability coefficient obtained in the mixtures in respect of the incorporation of bentonite. This variable characteristic behaviour, depending on the presence of incorporated addition, allowed establishing the necessary parameters to calibrate the infiltration proposed model.

Keywords: Bentonite, Dry Density, Flexible Wall Permeameter, loess soil.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, los suelos loésicos cubren un área aproximada de 600000 km² (Bloom, 1992). Están compuestos por partículas limosas de origen eólico. Su rango de tamaños oscila entre los 10 y 50 micrones. Naturalmente, presentan una estructura macroporosa (Aiassa G, et al 2008), donde la presencia de lentes de arcilla y sales solubles precipitadas construyen conexiones entre las partículas, confiriendo estabilidad y cohesión al mismo. El peso unitario seco (γ_d), presenta rangos entre 11 kN / m³ a 14 kN / m³, el límite líquido varía entre 22% y 30%, el límite plástico entre 16% y 20%. El contenido de humedad natural presenta valores entre 8% y 25%. Su gravedad específica es de 2,65. Su distribución granulométrica muestra que, el 96 % del suelo se define como pasante tamiz N° 200. De acuerdo con la Clasificación Unificada de Suelos (USCS), los mismos corresponden al tipo CL-ML. Su gravedad específica está controlada por la fracción de arcilla presente, y puede variar entre 1 m² / g, y 10 m² / g. Son suelos naturalmente alcalinos con un valor de ph > 8. (Rocca R, et al, 2006)

Los suelos loessicos en presencia de ciclos de humedecimiento, manifiestan una marcada inestabilidad mecánica, asociada a la disolución de sales presentes en el esqueleto mineral. Éstas, se hidratan y disuelven, debilitando los enlaces químicos entre partículas, provocando el fenómeno conocido como colapso (Arrúa, 2011). En la ciudad de Córdoba, la ingeniería geotécnica procura la estabilización de los suelos locales, mediante procesos de compactación o mediante el uso de materiales estabilizadores, cuya respuesta mecánica es conocida (Arrúa, 2012). La incorporación de materiales finos como la motmorillonita sódica en la matriz de suelo loessico, ha reportado mejoras considerables en el desempeño hidráulico (Aiassa, 2009, Alercia, et. al. 2014).

Los factores que afectan la respuesta hidráulica de los suelos de la Formación Cordobense son: el tamaño de las partículas, la relación de vacíos, el grado de saturación, la composición química del suelo, el espesor de la doble capa difusa, entre otros. Los experimentos de laboratorio colaboran predecir, y analizar las tendencias de dicha respuesta. Predecir analíticamente un fenómeno requiere de establecer la vinculación entre las variables involucradas en el problema. En este trabajo se exponen resultados experimentales y se presenta un procedimiento analítico para modelar, comprender y describir el comportamiento hidráulico no lineal del suelo loessico local en relación a la incorporación de bentonita sódica y a la modificación de su densidad seca natural.

MODELO HIDRÁULICO

Previo a establecer la relación entre los resultados empíricos y el modelo teórico, se observó en la respuesta experimental una relación entre el coeficiente de permeabilidad obtenido en las mezclas respecto de la incorporación de bentonita. Se realizó una calibración mediante funciones exponenciales, a partir de resultados obtenidos de laboratorio, para suelos loésicos con diferentes porcentajes de adición de bentonita sódica.

La respuesta fue no lineal, observándose un factor de infiltración inicial variable en relación al porcentaje de incorporación de bentonita. El diagrama característico de infiltración en mezclas aditivadas se presenta en la (Figura 1). Se observa que, al incrementar la adición de bentonita, se produce una disminución de la infiltración. No se registran valores máximos. Se visualizan dos estados: para tiempos iniciales, un estado transitorio, y para tiempos superiores un estado estacionario tendiendo la curva de infiltración experimental a un valor límite o último. Las muestras ensayadas permitieron identificar los parámetros involucrados en el comportamiento hidráulico analizado. (Figura 2)

Donde I-t: infiltración- tiempo, I_i=f (%B): Factor de Infiltración inicial obtenido como el valor de la pendiente de la recta tangente a la curva desarrollada y valuada en el origen en el periodo de tiempo transcurrido desde el inicio de un ensayo hasta el tiempo definido como tiempo último.

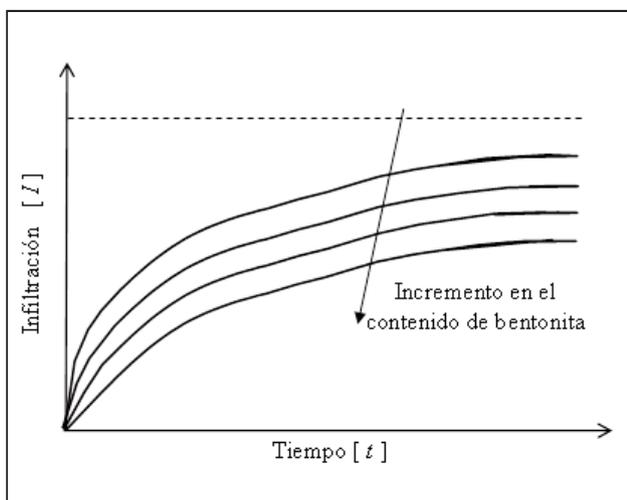


Figura 1. Diagrama característico de Infiltración de mezclas de limo - loessico estabilizadas con bentonitas.

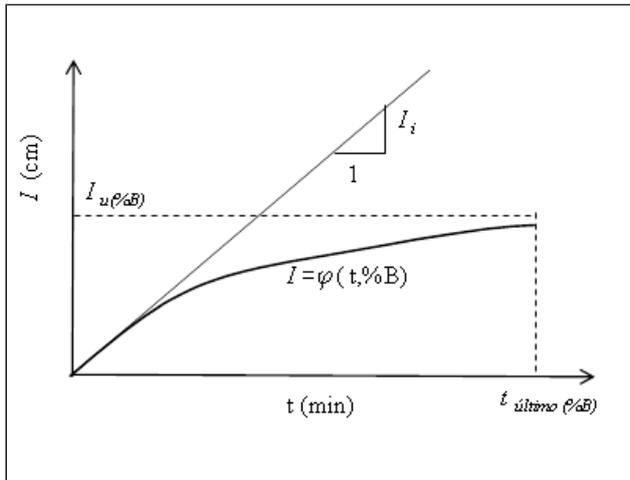


Figura 2. Parámetros de calibración del modelo de infiltración.

La infiltración obtenida como respuesta al modelo analizado depende del tiempo transcurrido y del porcentaje de bentonita adicionado en las mezclas. La ecuación (1) muestra la relación descripta:

$$I = \varphi(t, \%B) \quad (1)$$

El modelo analizado debe satisfacer las condiciones presentadas en las ecuaciones (2), (3) y (4):

$$I(0, \%B) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi(0, \%B)}{\partial t} = I_i \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t, \%B) = I_u(\%B) \quad (4)$$

La ecuación (2) impone la restricción de infiltración cero para un tiempo inicial cero. La ecuación (3) define el factor de infiltración inicial (I_i) como el valor de la pendiente de la recta tangente al gráfico de infiltración para un tiempo inicial cero.

La ecuación (4) plantea el máximo valor de infiltración al cual tiende el modelo de comportamiento propuesto en un tiempo último, observándose una respuesta asintótica. A partir de las condiciones establecidas, la ecuación (5) permite estimar el comportamiento hidráulico de las mezclas.

$$I = \frac{t}{\frac{t}{I_{ultimo}} + \frac{1}{I_{inicial}}} \quad (5)$$

Donde, I_{ultimo} e $I_{inicial}$ se obtienen a partir de una regresión exponencial, cuya variable independiente corresponde al porcentaje de bentonita empleado. En la (Figura 3), se muestran las relaciones entre el porcentaje de bentonita y las variables I_{ultimo} e $I_{inicial}$.

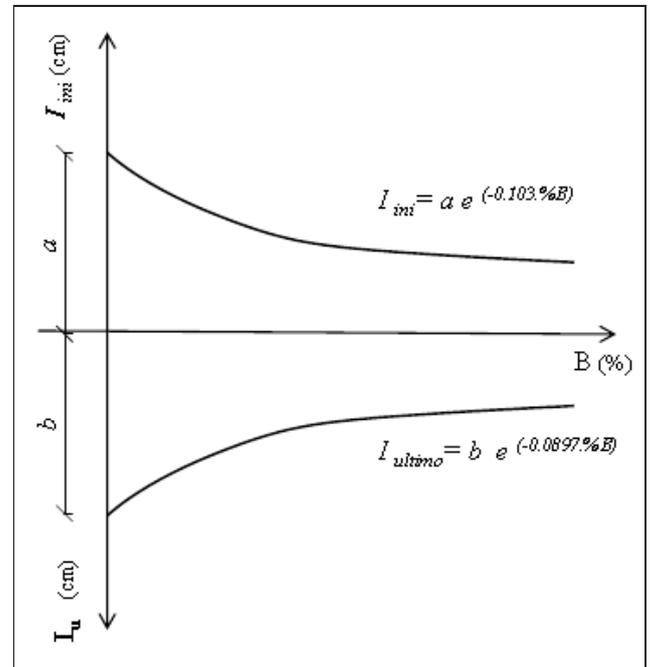


Figura 3. Relación entre Infiltración inicial e Infiltración última respecto del porcentaje de bentonita empleado.

Los factores a y b obtenidos de la calibración poseen unidades de longitud. El factor de infiltración inicial, se define como la derivada primera de la ecuación (5) propuesta como comportamiento hidráulico.

Así se obtiene la ecuación (6):

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{1}{\left(\frac{t}{I_{ultimo}} + \frac{1}{I_{inicial}} \right)^2} = I_i \quad (6)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados fueron suelo tipo limo - loessico obtenido de perforaciones realizadas a 1 metro de profundidad en las cercanías de la Ciudad Universitaria, en Córdoba, y bentonita sódica, procedente de yacimientos de Lago Pellegrini, Río Negro. Las propiedades de ambos materiales se muestran en la (Tabla 1). La bentonita empleada, está compuesta por un 92% de Montmorillonita, y en porcentajes menores por Cuarzo, Gibbsita, Feldespato, Calcita y Zeolitas (Lombardi, et. al. 2003). En general muestra altas proporciones de hierro variables entre un 4% y 6%. Los iones intercambiables son Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ , con un predominio de cationes sodio, producto de la presencia de sales solubles y de cationes retenidos en la doble capa difusa. De allí su clasificación (Hyang-Sig Ahn, 2009).

Tabla 1. Propiedades del material empleado.

Propiedades	Loess	Bentonita
γ_d (kN/m ³)	12.2-14.5	--
γ (kN/m ³)	14.9-16.8	---
LL (%)	20.8-32.2	301
IP (%)	0-8	231
G _s	2.68	2.71
Ps 200 (%)	87	100
Contenido arcilla < 0,002 mm (%)	4	85
SUCS	CL-ML	CH
S _s (m ² /g)	1	731(*)
Ph	> 8	7-7.5
Sc (%)	0.38	< 0.1

Nota: γ = peso unitario natural, LL = Limite líquido, IP = Índice de plasticidad, G_s = Gravedad Específica, Ps = Pasante tamiz , S_s = Superficie específica , Sc = Contenido de sal. (*) (Santamarina, 2002)

Seleccionados los materiales, se procedió a tamizar el suelo matriz recolectando el pasante de tamiz N ° 100. Se secó en estufa a 105 ° C durante 24 horas. Se confeccionaron muestras con adición de bentonita en diferentes porcentajes respecto del peso unitario seco, y definidas como SB1 =3%, SB2 = 6% y SB3 = 9%. La humedad de compactación estática fue de 20%. Los pesos unitarios secos de estudio fueron 13 kN/m³, 14 kN/m³, 15 kN/m³ y 16 kN/m³ y 17 kN/m³. Se moldearon probetas cilíndricas y sus medidas fueron 0,07 m de diámetro y 0,14 m de altura.

El método de compactación empleado fue estático, mediante la aplicación de presión uniforme en cada molde cilíndrico. Las probetas obtenidas fueron rotuladas y almacenadas en bolsas de cierre hermético hasta la ejecución de los ensayos hidráulicos correspondientes. Los ensayos se efectuaron usando un equipo de permeabilidad a pared flexible mediante el empleo de la técnica de carga variable (Fredlund, 1993), de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM D 5084. (Figura 4).

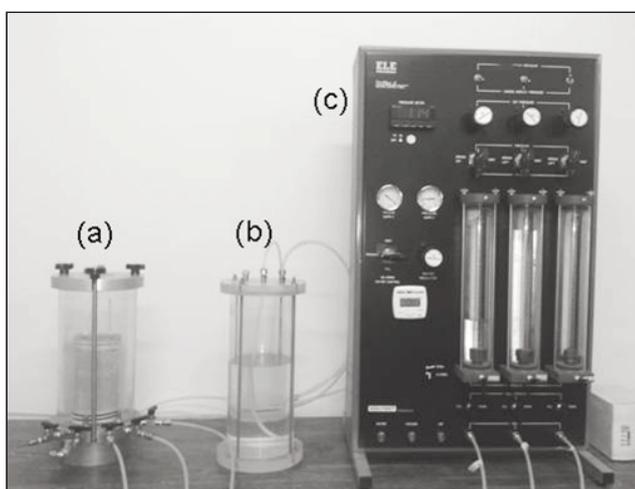


Figura 4. Equipo de Infiltración. Celda de Infiltración (a), Tanque Intercambiador (b), Panel de comando (c).

Los mismos se ejecutaron en condición no saturada y saturada. La presión de confinamiento en la celda fue de 117 kpa, mientras que las presiones superior e inferior fueron de 100 kpa y 114 kpa respectivamente.

La tasa de Infiltración (I_r) se obtuvo según el empleo de la ecuación (7).

$$I_r = \frac{\Delta V(t)}{\Delta t A} \quad (7)$$

Donde ΔV : volumen infiltrado durante un intervalo de tiempo Δt , A: área transversal de la probeta. Se adoptó un gradiente hidráulico igual a 10 (ASTM D 5084, 2000). El fluido permeante utilizado fue agua desaireada.

En condición saturada, el coeficiente de permeabilidad se obtuvo mediante el empleo de la ecuación (8).

$$k = \frac{a.L}{A.\Delta t} .Ln \left(\frac{PB_1 + \frac{V_{u(t1)} - V_{l(t1)}}{a}}{PB_2 + \frac{V_{u(t2)} - V_{l(t2)}}{a}} \right) \quad (8)$$

Donde, a: área de la bureta, L: longitud de la muestra, A: área de la muestra, Δt : intervalo de tiempo, PB_i: presión del sistema, V_u(t₁): volumen de lectura de la bureta superior para un tiempo t determinado i, V_l(t₁): volumen de lectura de la bureta inferior para un tiempo determinado i. El grado de saturación se verificó mediante el cálculo del coeficiente B de Skempton (Fredlund D., 1993) definido como $B = [(u_2 - u_1) / (\sigma_2 - \sigma_1)]$, donde $u_2 - u_1$: incremento de la presión de poros, $\sigma_2 - \sigma_1$: incremento en la presión de la celda. Se consideró estado saturado para valores de B superiores a 0,95.

CARACTERIZACION HIDRAULICA

Infiltración

La incorporación de material fino como arcillas produce en las mezclas de suelo limoso una disminución en la infiltración y también en el coeficiente de permeabilidad. (Cuisinier, 2011), (Qiong Wang, et al., 2013) (India Sudhakar M, et al., 2013).

La (Figura 5) y (Figura 6), muestran como resultado, la superposición de las curvas de calibración del modelo hidráulico propuesto y los resultados experimentales obtenidos para cada porcentaje de bentonita incorporado y distintas densidades secas de estudio. Se puede apreciar que, el modelo planteado para una misma densidad seca, propone una respuesta en el tiempo similar a la obtenida de manera empírica. Del mismo modo, se analizó el comportamiento del suelo en estado natural. Se evaluó el mejor ajuste del modelo teórico planteado respecto de los datos obtenidos de laboratorio, mediante el criterio de mínimo error cuadrático. Se obtuvo un valor igual a 0,74.

La (Figura 7), (Figura 8) y (Figura 9), muestran como influye el peso unitario seco de diseño en el volumen de infiltración acumulado. Se moldearon probetas con rangos de peso unitario seco desde 13 kN/m³, 14 kN/m³, 15 kN/m³, 16 kN/m³ y 17 kN/m³. Esta característica se analizó para los tres porcentajes de bentonita en estudio.

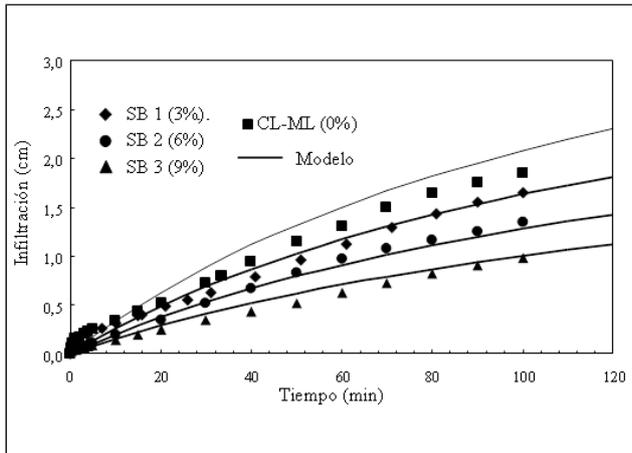


Figura 5. Resultados experimentales y modelo de comportamiento hidráulico en mezclas de suelo limo - bentonítico para una densidad seca de diseño igual a 15 kN/m³.

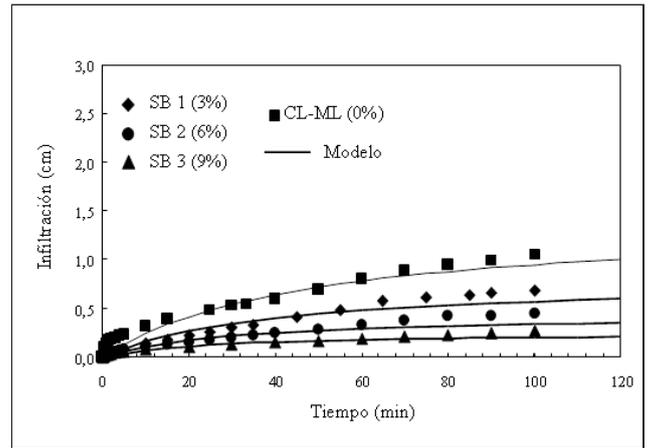


Figura 6. Resultados experimentales y modelo de comportamiento hidráulico en mezclas de suelo limo - bentonítico para una densidad seca de diseño igual a 16 kN/m³.

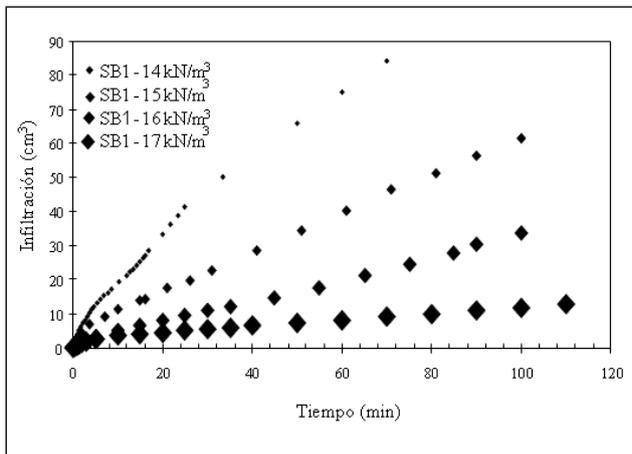


Figura 7. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 3% de bentonita.

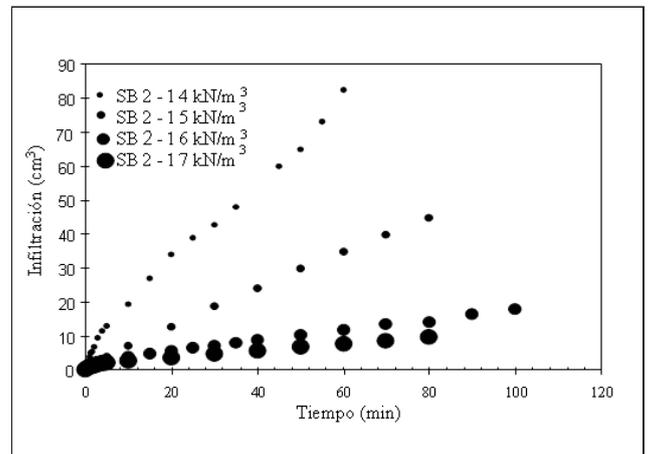


Figura 8. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 6% de bentonita.

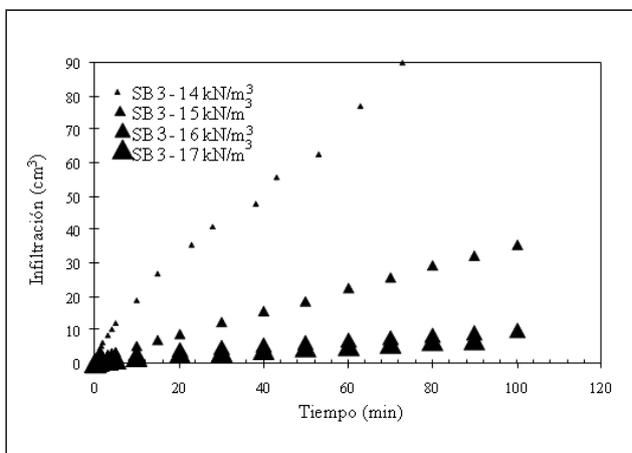


Figura 9. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 9% de bentonita.

En condición saturada, se observó una disminución del comportamiento de infiltración en función del incremento del porcentaje de bentonita adicionado a las mezclas. Se registro un comportamiento similar en función del incremento de la densidad seca de diseño. Se calcularon los coeficientes de permeabilidad para cada mezcla. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad de suelos limo Loessicos naturales y con adición de bentonita sódica.

Muestra	% Bentonita	γ_d (kN/m ³)	ω_1 (%)	K (m/sec)
Suelo solo	0	13,90	18,80	5,80E-07
SB 1	3	14,10	20,30	2,40E-07
SB 2	6	14,00	18,80	1,83E-07
SB 3	9	13,60	22,00	1,73E-07
Suelo solo	0	15,00	17,70	2,00E-07
SB 1	3	14,80	19,30	2,10E-07
SB 2	6	14,80	19,40	1,77E-07
SB 3	9	14,90	20,80	1,41E-07
Suelo solo	0	15,90	17,60	9,49E-09
SB 1	3	15,70	18,90	2,19E-08
SB 2	6	15,90	20,60	2,12E-08
SB 3	9	15,90	21,30	1,73E-08
Suelo solo	0	16,40	18,00	9,04E-09
SB 1	3	17,30	18,10	6,71E-09
SB 2	6	16,10	21,20	2,08E-09
SB 3	9	16,40	22,00	2,03E-09

Nota: γ_d = densidad seca de diseño, ω_1 : humedad de compactación, k= coeficiente de permeabilidad.

Se observa una mayor reducción de los valores de coeficiente de permeabilidad con el incremento de las densidades secas de diseño respecto a incremento del porcentaje de adición de bentonita, para muestras con similar peso unitario seco. En los resultados obtenidos, se concluye que hay una reducción significativa de la permeabilidad cuando la densidad seca de diseño es mayor a 16 kN/m³ y cuando el contenido de bentonita es de 9%. Se explica este fenómeno, debido a la alta capacidad de intercambio catiónico que posee la bentonita sódica, proveniente de la presencia de los iones de Na⁺, los cuales se vuelven atractivos por las moléculas de agua. El proceso de hinchamiento de estos iones modifica la consistencia de la mezcla limosa, cambiando no solo su textura sino afectando la conductividad hidráulica de la misma. (Mitchell J., 1993). La muestra SB 3 confeccionada con una densidad seca de diseño igual a 16,4 kN/m³, registró un valor de conductividad hidráulica de 2,03 x 10⁻⁹ m/seg, cercano al valor admisible de 1x10⁻⁹ m/seg, con un valor de humedad de compactación de 22%, cercano al valor de humedad óptima registrado según el ensayo Proctor Standard, e igual a 20%. La mayoría de los resultados se encuentran dentro de la rama seca de la curva de compactación típica para estos suelos limosos, resultando macroestructuras en cada muestra del tipo abierta o floclada, generando conductividades hidráulicas mayores a las esperadas respecto de estructuras cerradas o dispersa. (Lambe, 1958)

Ascenso Capilar

Para determinar la velocidad de ascenso capilar, se utilizó un contenedor metálico con la adición de agua destilada en su interior. Las muestras fueron colocadas sobre un aro metálico de 0,03 m de altura y base ranurada. Se midió el nivel de ascenso del frente de humedad en función del tiempo. La (Figura 10), (Figura 11) y (Figura 12) muestran el comportamiento

de las probetas moldeadas con diferentes densidades secas de diseño moldeadas con distintos contenidos de bentonita.

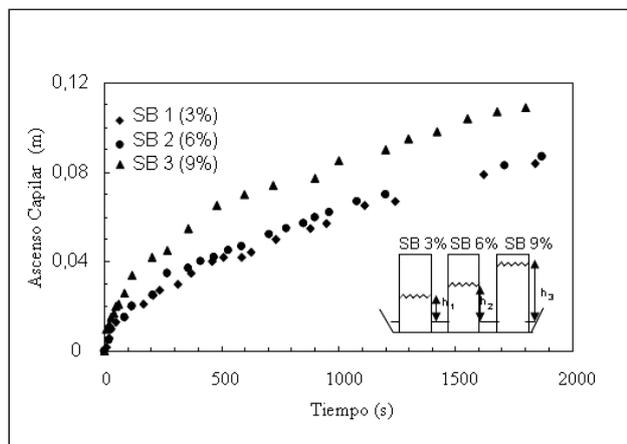


Figura 10. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 3%, 6% y 9% de bentonita y peso unitario seco 13 kN/m³.

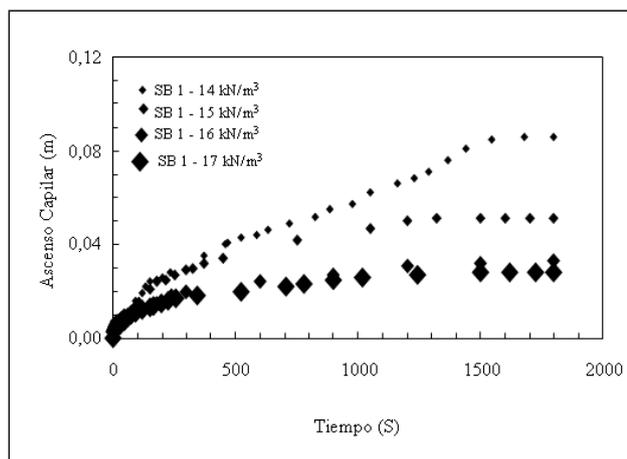


Figura 11. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 3% de bentonita y moldeadas con diferentes pesos unitarios secos.

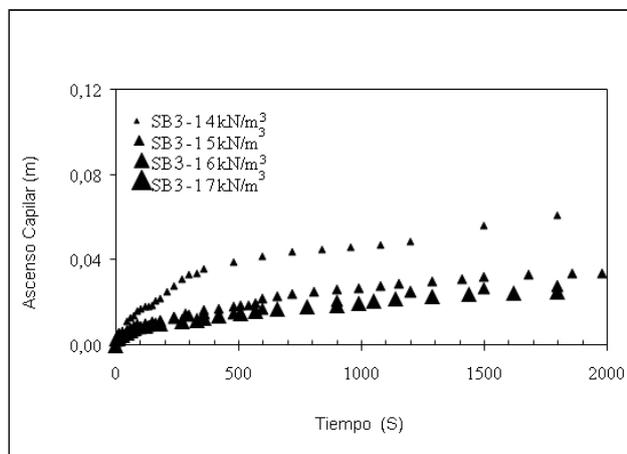


Figura 12. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 9% de bentonita y moldeadas con diferentes pesos unitarios secos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza el comportamiento hidráulico de mezclas de suelo limo-loessico con adición de motmorillonita sódica, en diferentes porcentajes, y se revisa la influencia de la densidad seca de diseño en la elaboración de las muestras aditivadas.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- **Infiltración:** Las mayores reducciones en la permeabilidad se obtuvieron mediante el incremento de la compactación en las muestras de suelo respecto del incremento de la adición de motmorillonita sódica. Para muestras confeccionadas con densidades secas de diseño mayores a 16 kN/m^3 , con un aporte de motmorillonita del 9% y humedades superiores a la humedad óptima de compactación 20%, los resultados de conductividad hidráulica fueron cercanos a $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. Según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, (US EPA, 1993) referente a la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), los valores de conductividad hidráulica deben ser de $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ o menor, lo cual indica que para suelos cordobeses, se debería trabajar con densidades secas de compactación superiores a 16 kN/m^3 , o con adición de 9% o más en el contenido de bentonita para mejorar su

desempeño hidráulico y utilizar los mismos suelos como barrera sanitaria.

- **Ascenso Capilar:** los menores ascensos capilares se registraron en probetas con densidades secas de diseño superiores a 17 kN/m^3 y con adición de bentonita en un 9%. El mejoramiento de la densidad seca de 13 kN/m^3 a 17 kN/m^3 en las mezclas produce una disminución de un 75% el nivel de ascenso capilar en tanto que el aumento de la adición de bentonita no genera importantes cambios.
- **Modelado hidráulico:** el modelo matemático de infiltración propuesto, se ajusta al comportamiento experimental que se manifestó en las diferentes mezclas de suelo limo-loessico con adición de bentonita y en suelos sin adición. Se aplicó el criterio de mínimo error cuadrático arrojando un valor de 0,74.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la Beca de Formación Doctoral al Dpto. Ingeniería Civil (UTN FRC), el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Gobierno de la Provincia de Córdoba (PID-GRF), FONCyT y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AIASSA G.Y ARRUA P, 2009.

“Desempeño de barreras sanitarias simples de suelo loessico compactado”
Revista Tecnología y Ciencia, Año 8: 26-40

AIASSA G, ZEBALLOS M., ARRUA P Y TERZARIOL. 2008

“Infiltración en suelos limosos compactados”
XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. La Plata, Argentina.

ALERCIA BIGA, I. C ; ARRUA P, EBERHARDT M.G; AIASSA MARTINEZ G.A.2014

“Hydraulic Conductivity in Loessic Stabilized Soil”
Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Brisbane, Australia, ISBN 978-4-9905958-3-8 C3051.

ARRUA P, AIASSA G., Y EBERHARDT M. 2011

“Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation”
International J. of GEOMATE, Vol. : 130-135.

ARRUA, P; AIASSA, G. Y EBERHARDT, M.2012

“Loess soil stabilized with cement for civil engineering applications”.
International Journal of Earth Sciences and Engineering. ISSN: 0974-5904. Vol. 5, No 1:10 -18.

ASTM. D 5084, 2000

Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated porous Materials using a Flexible Wall Permeameter.

BLOOM, A.,1992

“Some Questions about the Pampean Loess”.
Paper for the Department of Geography. University of Leicester N° 23: 17-18.

FREDLUND, D,G; RAHARDJO, H; 1993

Soils Mechanics for unsaturated soils.
John wiley and Sons.. NY. USA.pp. 124-135.

HYANG-SIG AHN, HO YOUNG JO,2009.

“Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite.”
Journal of Applied Clay Science, Vol 44.:144-150.

- LAMBE, T.W., 1958.
“The structure of Compacted Clay”
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Asce, Vol. 84, Nro. SM2, 1654-34
- LOMBARDI B., BASCHINI M. AND TORRES SANCHEZ R.M., 2003
“Bentonite deposits of Northern Patagonia”
Journal of Applied Clay Science. Vol 2: 309-312.
- MITCHELL K. J., 1993.
Fundamentals of Soils Behavior.
Editorial John Wiley and Sons. Inc.
- ROCCA R., REDOLFI E. Y TERZARIOL R, 2006
“Características Geotécnicas de los Loess de Argentina”
Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6.Año 2: 149-166.
- CUISINIER, O, AURIOL, J.Cl; LE BORGNE, T; DENELEE, D; 2011.
“ Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil”
Journal of Engineering Geology. Vol. 123: 187-193.
- QIONG WANG ,YU-JUN CUI, ANH MINH TANG, BARNICHON J., SABA S., WEI YE, 2013.
“Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration”.
Journal of Engineering Geology. Vol 164, pp,67-76.
- INDIA SUDHAKAR M. RAO, RAVI K., 2013.
“Hydro-mechanical characterization of Barmer 1 bentonite from Rajasthan, India”.
Journal of Nuclear Engineering and Design. Vol 265: 330-340.
- SANTAMARINA J., KLEIN K, WANG Y., Y PRENCKE E ,2002.
“Specific surface: determination and relevance”.
Published on the NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca>.
- U.S. EPA, 1993.
Solid Waste Disposal Facility Criteria Manual. Environmental Protection Agency Response.
EPA 530 -R-93-017. Agency (5305). www.epa.gov/osw