

Calibración de Modelo Hidromecánico en Mezclas de Loess y Bentonita

Inés C. Alercia Biga¹, Pedro A. Arrúa², Gonzalo M. Aiassa Martínez³ y Marcelo G. Eberhardt⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Grupo de Investigación y transferencia en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones (GIGEF). Departamento de Ingeniería Civil. Tel.: 54-351-5986000, interno 119-6, CP.(5016), Córdoba, Argentina. E-mail: parrua@civil.frc.utn.edu.ar

Resumen - Los suelos loessicos de la Ciudad de Córdoba, constituyen uno de los materiales más importantes empleados en obras de ingeniería especialmente en obras viales. Se han realizado importantes estudios investigando sus propiedades geotécnicas. En este trabajo, se realizaron ensayos de compresión no confinada y ensayos de infiltración mediante el empleo de un permeámetro a pared flexible. Se realizaron mezclas de suelo loessico con adición de bentonita en distintos porcentajes. Se evaluó el contenido de humedad, peso unitario seco y contenido de bentonita en las muestras remoldeadas. Se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los modelos propuestos mediante formulaciones matemáticas.

Los resultados muestran que es posible lograr una aproximación entre el comportamiento hidromecánico teórico obtenido mediante la modelación y calibración de funciones racionales respecto del comportamiento empírico obtenido como resultado de ensayos en mezclas de suelo loessico estabilizadas con bentonita.

Palabras claves: Bentonita; Suelo Loessico; Permeámetro a Pared Flexible, Compresión No Confinada, Modelos de Comportamiento

Abstract – Córdoba city loessic soils are one of the most important materials used in engineering works especially in road works. There have been done important studies investigating its geotechnical properties. In this paper, it has been done unconfined compressive tests and permeation tests using a flexible wall permeameter. Mixtures were done with loessic soil and addition of bentonite in different percentages. All of them were remoulded samples. Water content, dry unit weight and bentonite content were studied in each sample. Experimental results were compared with the proposed models by using mathematical formulations.

The results show that it is possible to achieve an approximation between a theoretical hydromechanical behaviour obtained by modelling and calibration of rational functions and an empirical hydromechanical behaviour obtained as test results in loessic soil mixture with bentonite.

Key words: Bentonite; Loessic soil; Flexible wall permeameter, Unconfined Compression, Behavioural models

INTRODUCCIÓN

En Argentina, los suelos loessicos cubren un área extensa de alrededor de 600000 km² (Bloom, 1992) formados por partículas de limo. Poseen un rango de tamaños que oscila entre 10 y 50 micrómetros. En estado natural, presentan una estructura macroporosa (Aiassa et al. 2008), donde la presencia de arcilla y sales precipitadas conforman los puentes de conexión entre partículas gruesas confiriendo estabilidad y cohesión al suelo. Poseen un peso unitario seco (γ_d) entre 11 kN/m³ y 14 kN/m³, el límite líquido varía entre

el 22% y 30%, el límite plástico entre 16% y 20%. El contenido de humedad oscila entre 8% y el 25%. Su gravedad específica es de 2,65. Los ensayos granulométricos registran que el 96% de estos suelos pasan el tamiz N^o 200. Según la clasificación unificada de suelos (SUCS) se corresponden con la denominación CL-ML. La superficie específica esta controlada por la fracción arcillosa y puede variar entre 1 m²/gr. y 10 m²/gr. Son suelos naturalmente alcalinos con valores de pH >8. (Rocca, et al. 2006).

Presentan un comportamiento mecánico inestable cuando se les incrementa el grado de saturación, la tensión media, la presión de

poros o la tensión de corte. Ésta marcada inestabilidad esta asociada a la disolución de las sales presentes en el esqueleto mineral del loess. Éstas, durante su proceso de hidratación se 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 (Aiasa, 2009, Alercia, et. al. 2014). Se pretende así también, gobernar parámetros de rigidez o resistencia.

El comportamiento tenso – deformacional del suelo, depende de diferentes factores, incluyendo peso unitario, contenido de humedad, estructura de la matriz de suelo, condiciones de deformación inicial, duración de la carga aplicada, historia de tensiones, tensión de confinamiento, entre otros.

Los factores que afectan al proceso de infiltración en suelos 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 en la formulación de las tendencias de comportamiento. Predecir analíticamente un fenómeno requiere de establecer la vinculación entre las variables involucradas en el problema. No se ha encontrado en la literatura modelos analíticos locales que permitan cuantificar dichas relaciones.

En este trabajo se presenta un procedimiento analítico para comprender y describir la tendencia del comportamiento hidromecánico no lineal del suelo loessico con relación a la incorporación de bentonita sódica.

MODELO DE COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL

Para definir el modelo de comportamiento tenso-deformacional, se realizó la calibración

de un modelo matemático propuesto mediante el uso de regresión lineal en base a resultados experimentales.

Se ha encontrado que, las probetas de loess con bentonita, diseñadas con valores de peso unitario seco por debajo de 14 KN/m^3 , poseen una rigidez variable que depende del porcentaje de estabilizante incorporado (Alercia, et. al. 2014). Las curvas experimentales obtenidas son no lineales y fueron aproximadas mediante funciones racionales no enteras.

Un diagrama típico de compresión no confinada de mezclas estabilizadas con bentonita se presenta en la Fig. 1.

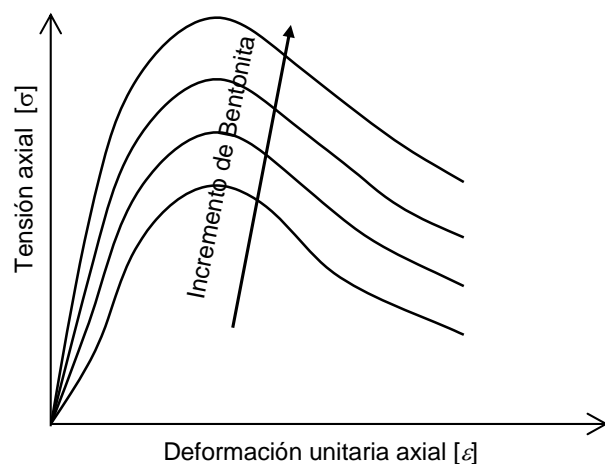


Fig. 1- Diagrama típico de tensión-deformación de mezclas estabilizadas con Bentonita

La Fig. 1 muestra que, el incremento en el contenido de bentonita produce un aumento en la rigidización de las mezclas, conformadas con pesos unitarios secos próximos a 13 kN/m^3 . Del mismo modo, se aprecia un incremento de la resistencia última. Las mezclas, poseen un comportamiento de ablandamiento post pico similar al de rotura dúctil. El rango de deformación unitaria para el cual se registran los máximos valores de tensión oscila entre 0,9% y 1,3 %.

Los resultados obtenidos de modo empírico permiten definir sobre la curva, los parámetros que se presentan en la Fig. 2. Donde σ - ϵ : tensión - deformación, $\epsilon^u = f(\% \text{ bentonita})$: deformación a la cual se produce la máxima tensión para un porcentaje de bentonita determinado, $\sigma^u = f(\% \text{ bentonita})$:

tensión máxima desarrollada durante un ensayo de compresión no confinada, E_i : módulo de elasticidad inicial del suelo.

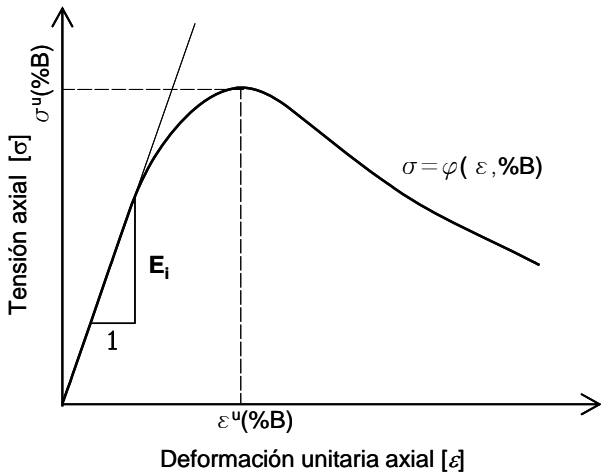


Fig. 2- Parámetros empleados en la calibración del modelo tenso-deformacional

La tensión desarrollada durante la aplicación de la carga, se relaciona con la deformación y el porcentaje de bentonita incorporado a las mezclas, tal como lo muestra la ecuación (1).

$$\sigma = \varphi(\varepsilon, \%B) \quad (1)$$

El modelo de comportamiento debe satisfacer las condiciones presentadas en las expresiones (2), (3) y (4).

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

$$\frac{\partial \varphi(\varepsilon^u, \%B)}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varepsilon^2}(\varepsilon^u, \%B) < 0 \quad (4)$$

La ecuación (2) impone tensiones axiales nulas para deformaciones unitarias nulas. Las expresiones (3) y (4) definen la existencia de un punto crítico cuya pendiente de la recta tangente a la curva en ese punto es nula y corresponde a un máximo cuando se alcanza

una deformación unitaria última ε^u (%bentonita).

La ecuación (5) garantiza que la pendiente de la recta tangente a la curva valuada en el origen corresponde al módulo de elasticidad inicial del suelo mezclado con bentonita.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon}(0, \%B) = E_i \quad (5)$$

La ecuación (6) satisface las restricciones impuestas proponiéndose como la formulación matemática que predice el comportamiento tenso-deformacional.

$$\sigma = \frac{\sigma^u \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^u}\right)^2} \quad (6)$$

Donde σ^u y ε^u , se obtienen a partir de una regresión lineal, cuya variable independiente corresponde al porcentaje de bentonita. La Fig. 3, presenta la relación entre las variables σ^u y ε^u y el porcentaje de Bentonita.

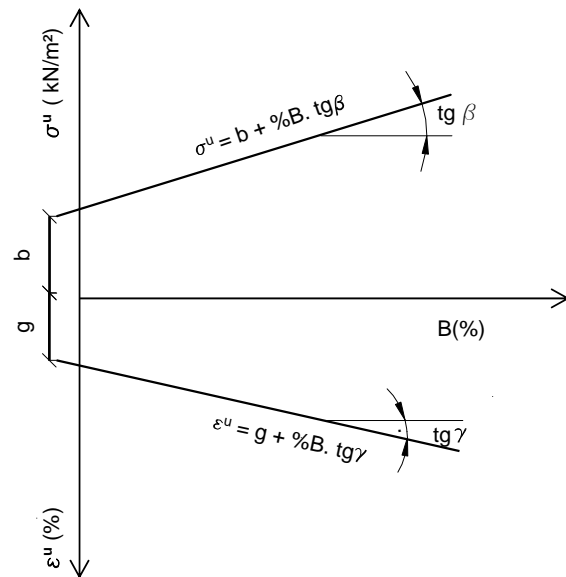


Fig. 3 - Relación entre tensiones y deformaciones últimas respecto de porcentaje de bentonita

Los parámetros b y $\text{tg } \beta$, poseen unidades de tensión, mientras que g y $\text{tg } \gamma$, son adimensionales. El modulo de elasticidad tangente E_t (ecuación 7), se obtiene de la primera derivada de la ecuación (6).

$$E_t = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\sigma^u (1 - \varepsilon_r)}{(1 + \varepsilon_r)^2} \quad (7)$$

Donde ε_r se define como:

$$\varepsilon_r = 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^u} \right)^2 \quad (8)$$

MODELO DE INFILTRACIÓN

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 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 Fig. 4. En esta figura, se observa que, al incrementar la adición de bentonita, se produce una disminución de la infiltración. No se registraron valores máximos. Se visualizaron 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. Los resultados experimentales permitieron identificar los parámetros involucrados en el comportamiento hidráulico analizado.

La Fig. 5 muestra los parámetros de calibración del modelo de infiltración.

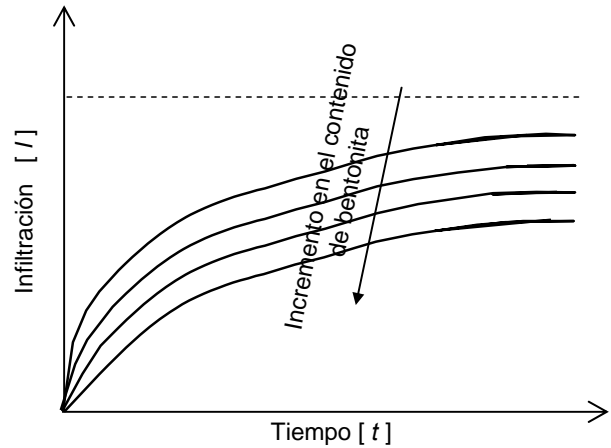


Fig. 4 - Diagrama característico de Infiltración de mezclas estabilizadas con bentonitas

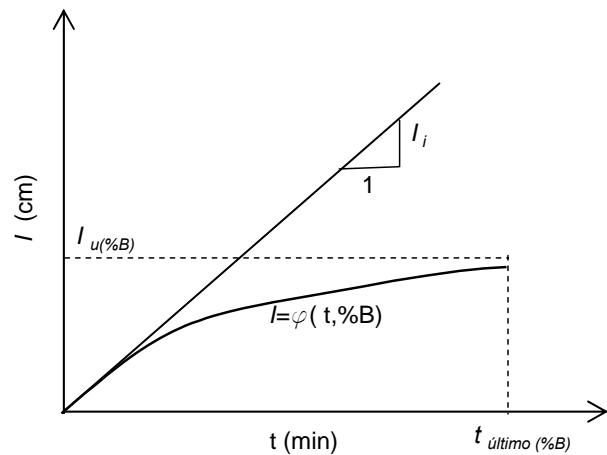


Fig. 5 – Parámetros de calibración del modelo de infiltración

Donde $I-t$: infiltración- tiempo, $I_f=f(\%B)$: 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.

La infiltración obtenida como respuesta al modelo analizado depende del tiempo transcurrido y del porcentaje de bentonita adicionado en las mezclas. La ecuación (9) muestra la relación descrita:

$$I = \varphi(t, \%B) \quad (9)$$

El modelo analizado debe satisfacer las condiciones presentadas en las ecuaciones (10), (11) y (12):

$$I(0, \%B) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi(0, \%B)}{\partial t} = I_i \quad (11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t, \%B) = I_u(\%B) \quad (12)$$

La ecuación (10) impone la restricción de infiltración cero para un tiempo inicial cero. La ecuación (11) 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 (12) 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 (13) permite estimar el comportamiento hidráulico de las mezclas.

$$I = \frac{t}{\frac{t}{I_{\text{ultimo}}} + \frac{1}{I_{\text{inicial}}}} \quad (13)$$

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 Fig. 6, se muestran las relaciones entre el porcentaje de bentonita y las variables I_{ultimo} e I_{inicial} .

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 (13) propuesta como comportamiento hidráulico.

Así se obtiene la ecuación (14):

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{1}{\left(\frac{t}{I_{\text{ultimo}}} + \frac{1}{I_{\text{inicial}}} \right)^2} = I_i \quad (14)$$

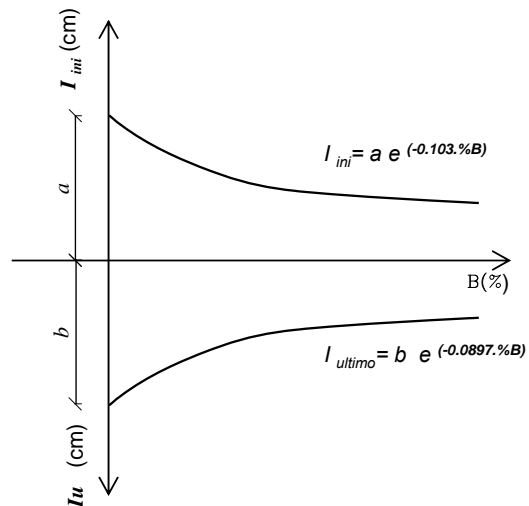


Fig. 6 - Relación entre Infiltración inicial e Infiltración última respecto del porcentaje de bentonita empleado

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. La bentonita empleada, está compuesta por un 92% de Motmorillonita, 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).

Seleccionados los materiales, se procedió a tamizar el suelo matriz recolectando el pasante 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%. El peso unitario seco de diseño fue de 13 kN/m³. Se moldearon probetas cilíndricas y sus medidas fueron 70 mm de diámetro y 140 mm 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 y mecánicos. Los ensayos se efectuaron usando un equipo de permeabilidad a pared flexible mediante la técnica de carga variable (Fredlund,1993), de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM D 5084. (Fig. 7).

Las muestras se infiltraron en condición no saturada. La tasa de Infiltración (I_r) se obtuvo según el empleo de la ecuación (15).

$$I_r = \frac{\Delta V(t)}{\Delta t A} \quad (15)$$

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). El fluido permeante utilizado fue agua desaireada.

En condición no saturada, sin control del nivel de succión, se ha pretendido simular las condiciones de campo.

En el ensayo de compresión no confinada, se utilizó una prensa mecánica equipada con una célula de carga con una capacidad de 50 kN y un comparador digital para medición de desplazamientos con una precisión de 0,001 mm, a una velocidad de deformación constante de 1 mm / min. Este ensayo se realizó para evaluar las características de tensión-deformación y las propiedades de rigidez del suelo estabilizado.

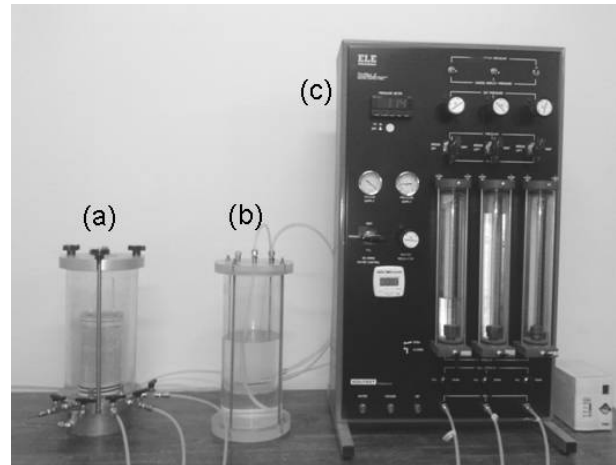


Fig. 7 Equipo de Infiltración (a) Celda de Infiltración (b) Tanque Intercambiador. (c) Panel de comando

CALIBRACIÓN HIDROMECÁNICA DE MEZCLAS CON BENTONITA

En la Fig. 8, se observa como resultado, la superposición de las curvas de calibración del modelo mecánico propuesto para describir el comportamiento del suelo estabilizado y los resultados experimentales obtenidos para cada porcentaje de bentonita incorporado. Se puede apreciar que el modelo predice de manera clara el módulo de elasticidad inicial, los valores máximos de deformación posibles y el comportamiento post pico de ablandamiento para cada caso analizado. Del mismo modo el comportamiento del suelo en estado natural.

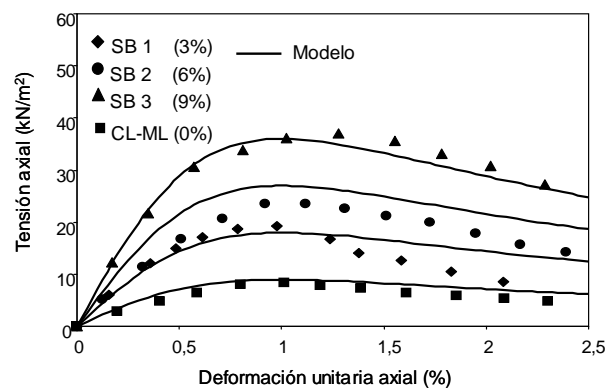


Fig. 8- Modelo de comportamiento tenso deformacional de suelos loessicos con adición de bentonita

Se evaluó la precisión del modelo propuesto respecto del comportamiento experimental, mediante el criterio de mínimo error cuadrático, el cual arrojó un valor igual a 0,88.

En la Fig. 9, se observa la superposición de los resultados experimentales respecto de la tendencia del modelo de comportamiento hidráulico propuesto. Se puede apreciar que, el modelo planteado propone una respuesta en el tiempo similar a la obtenida de manera experimental, para cada caso de suelo estabilizado. El comportamiento asintótico queda determinado para tiempos últimos superiores a 150 minutos. Se evaluó el mejor ajuste del modelo planteado respecto de los datos experimentales, mediante el criterio de mínimo error cuadrático. Se obtuvo un valor igual a 0,74.

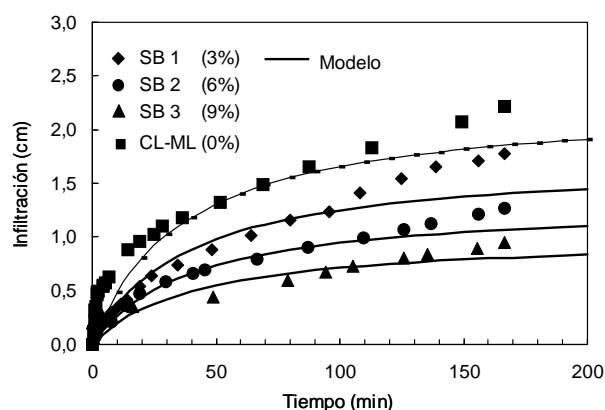


Fig. 9- Modelo de comportamiento hidráulico de suelos loessicos con adición de bentonita

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo y la calibración del modelo de comportamiento hidromecánico en mezclas de suelo loessico estabilizadas con adición de Bentonita tipo Sódica.

Las principales conclusiones son:

(1) Comportamiento mecánico: se identificó que el incremento de bentonita aumentó la resistencia a la compresión no confinada en un 400% en muestras confeccionadas con pesos unitarios secos próximos a 13 kN/m^3 .

(2) En el modelo de respuesta tenso deformacional, tal como se esperaba, se pudo observar un comportamiento máximo de deformación asociado a una tensión máxima axial última. Ambos valores dependientes del porcentaje agregado de bentonita. A mayores incrementos de la misma, mayores fueron las tensiones axiales máximas obtenidas, y mayores los módulos de elasticidad inicial correspondientes en cada caso.

(3) Se confirmó otro resultado típico, de ablandamiento post máximo, en los ensayos de compresión no confinada, situación que se refleja en el modelo para todos los casos analizados.

(4) Comportamiento hidráulico, en estado no saturado: se observó que la infiltración disminuyó con el incremento en el porcentaje de bentonita.

(5) En el modelo de comportamiento que describe la respuesta de infiltración, se puede observar que, a mayor porcentaje de bentonita, menor es la infiltración obtenida con una marcada tendencia asintótica para tiempos superiores a 150 minutos.

AGRADECIMIENTOS

Beca de Formación Doctoral. Dpto. Ingeniería Civil (UTN FRC). Al Gobierno de la Provincia de Córdoba (PID-GRF) y FONCyT - ANPCyT (PICT).

REFERENCIAS

- Bloom, A., "Some Questions about the Pampean Loess". Paper for the Department of Geography. University of Leicester N° 23, pp.17-18. 1992
- Fredlund, D,G; Rahardjo, H; Soils Mechanics for unsaturated soils. John wiley and Sons.. NY. USA. 124-135. 1993
- Lombardi B., Baschini M. and Torres Sánchez R.M., "Bentonite deposits of Northern Patagonia", Journal of Applied Clay Science. Vol 2, pp. 309-312. 2003
- Rocca R., Redolfi E. y Terzariol R, "Características Geotécnicas de los Loess de Argentina", Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e

Infraestructura Civil. Vol. 6.Año 2. pp. 149-166. 2006

Aiassa G, Zeballos M, Arrúa P and Terzariol R, "Infiltración en suelos limosos compactados", XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. La Plata, Argentina. 2008

Aiassa G. and Arrúa P, "Desempeño de barreras sanitarias simples de suelo loessico compactado", Revista Tecnología y Ciencia, Año 8. pp. 26–40. 2009

Hyang-Sig Ahn, Ho Young Jo, "Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite." Journal of Applied Clay Science, Vol 44, pp.144-150. 2009

Arrúa P, Aiassa G., and Eberhardt M. "Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation", International J. of GEOMATE, Vol. 1.pp. 130–135. 2011

Arrúa, P.; Aiassa, G. and Eberhardt, M. "Loess soil stabilized with cement for civil engineering applications". International Journal of Earth Sciences and Engineering. ISSN: 0974-5904. Vol. 5, No 1.pp.10 -18. 2012

ASTM. D 5084. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated porous Materials using a Flexible Wall Permeameter. 2000

Alercia Biga, I. C ; Arrúa P., Eberhardt M.G; Aiassa Martinez G.A.; "Hydraulic Conductivity in Loessic Stabilized Soil", Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Brisbane, Australia, ISBN 978-4-9905958-3-8 C3051. 2014