

MODELOS CONSTITUTIVOS ACOPLADOS APLICADOS A LIMOS NO SATURADOS

Marcelo E. Zeballos^a, Gonzalo M. Aiassa^b y Roberto E. Terzariol^a

^a*Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales,
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

^b*Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional,
Argentina, gaiassa@scdt.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>*

Palabras claves: Modelos constitutivos, suelos no saturados, infiltración, barreras.

Resumen. El comportamiento tenso-deformacional de suelos está gobernado por la organización estructural de los mismos. En condiciones no saturadas y no drenadas, la succión matricial constituye una variable adicional, de gran influencia en las respuestas observadas. La succión matricial muestra una relación directa con la organización estructural y con el grado de saturación del suelo. El suelo de la zona central de Argentina corresponde a depósitos de origen predominantemente eólico, y en la mayoría de los casos son calificados como colapsables. La disposición de las partículas sólidas en éstos suelos determina la formación de estructuras macroporosas y mal acomodada. La deformación en distintos niveles de acomodamiento estructural, y bajo distintas condiciones de carga y humedad, constituye un tema de interés en el diseño de construcciones geotécnicas como terraplenes o barreras. En este artículo se presenta el desarrollo e implementación numérica de modelos acoplados que permiten predecir asentamientos bajo condiciones de infiltración y niveles variables de tensión. Los modelos desarrollados se basan en el método de colapso relativo y el modelo constitutivo elastoplástico para la caracterización del comportamiento tenso-deformacional, y en la resolución de la ecuación de flujo en medios porosos no saturados en condición no estacionaria y unidimensional, mediante un código en diferencias finitas para la simulación de procesos de infiltración. Los modelos propuestos han sido calibrados a partir de resultados experimentales de laboratorio.

1 INTRODUCTION

Los suelos de la zona central de Argentina corresponden a depósitos de loess, los cuales son suelos de origen predominantemente eólico y generalmente presentan características de suelos colapsables. El colapso implica una disminución rápida de volumen, producida por el aumento del contenido de humedad o en el grado de saturación, o la modificación de la tensión media actuante o tensión de corte bajo la acción de solicitaciones externas (Zur y Wiseman 1973). Los niveles de colapso se modifican a medida que se incrementa la compacidad del suelo. Esta condición, determina que el suelo puede ser empleado en construcciones geotécnicas cuando se le aplican adecuadas condiciones de compactación.

En el caso de barreras sanitarias de suelo compactado empleadas en fondos de depósitos sanitarios, las infiltraciones a través de las mismas, derivan en modificaciones de la humedad inicial en el suelo de fundación. Estas modificaciones, producen variaciones en los estados de tensión y succión, generando asentamientos con diversos grados de influencia sobre la estructura. La cuantificación de este comportamiento puede realizarse mediante diferentes modelos tenso-deformationales. El modelo elastoplástico, propuesto por Alonso et al. (1990), representa cambios volumétricos en suelos, mediante un modelo elástico con endurecimiento. Este modelo emplea dos variables de tensiones independientes, la tensión neta y la succión. Una alternativa de mayor simplicidad, consiste en determinar el asentamiento adicional por humedecimiento para distintos estados de humedad inicial y tensión, mediante el modelo de colapso relativo (Redolfi 1990).

En este artículo se presenta el desarrollo e implementación numérica de modelos acoplados que permiten predecir asentamientos en sistemas compuestos por perfiles de suelos colapsables y estratificados, bajo condiciones de infiltración y niveles variables de tensión. Los modelos desarrollados para la caracterización del comportamiento tenso-deformacional se basan en el método de colapso relativo y el modelo constitutivo elastoplástico. La infiltración ha sido evaluada por medio del código de cálculo UNSAT-H (Fayer, 2000), el cual resuelve la ecuación de flujo no estacionaria en medios porosos no saturados en problemas unidimensionales, mediante la técnica numérica de diferencias finitas. Los modelos acoplados propuestos han sido calibrados a partir de resultados experimentales de laboratorio. Los resultados experimentales han sido obtenidos a partir de ensayos de compresión confinada e infiltración, realizados sobre muestras inalteradas y compactadas con diferentes condiciones de humedad inicial.

2 MODELO DE INFILTRACIÓN

La ecuación de Richards de flujo no saturado proporciona una base física clara en el análisis del problema de infiltración. En general, esta ecuación es aplicable y puede ser empleada en diferentes análisis y escenarios. La formulación de la ecuación diferencial en forma unidimensional se reduce a (Freeze y Cherry, 1979)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(s)_z \left(\frac{\partial s}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(s) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

Donde $C(s)$: capacidad de humedad específica $C(s) = \partial\theta/\partial s$, s : succión matricial, $k(s)_z$: función de permeabilidad.

Para resolver la ecuación de flujo en suelos no saturados deben establecerse relaciones para la humedad y permeabilidad del suelo en función de la succión. La relación entre humedad y succión se denomina curva característica suelo-agua (Leong y Rahardjo, 1997a) y la relación entre permeabilidad y succión se conoce como función de permeabilidad (Leong y

Rahardjo, 1997b). Un modelo para caracterizar estas relaciones corresponde al propuesto por van Genuchten (1980) y Mualem (1976)

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$k(s) = k \frac{\left\{ 1 - (\alpha s)^{mn} \left[1 + (\alpha s)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha s)^n \right]^{0.5m}} \quad (3)$$

Donde Θ : humedad volumétrica normalizada, definido por $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, θ : humedad volumétrica, θ_s : humedad volumétrica de saturación, θ_r : humedad volumétrica residual, k : permeabilidad de suelos saturados, n , α , $m = 1 - 1/n$ son constantes.

La ecuación (1) es de naturaleza no lineal, y en general las soluciones analíticas no resultan posibles, salvo para algunos casos especiales. Por lo tanto, las aproximaciones numéricas son las que se utilizan típicamente en la solución de la ecuación de flujo no saturado. Las aproximaciones estándares que se aplican corresponden a métodos de diferencias finitas o elementos finitos (Celia et al., 1990).

3 MODELOS TENSO-DEFORMACIONALES

La predicción de cambio volumétrico asociado con suelos colapsables puede realizarse mediante el empleo de modelos tensión-deformación. En estos problemas, las propiedades del suelo son por lo general no lineales, pero pueden convertirse en parámetros de incrementos lineales o resolverse mediante el empleo de modelos elastoplásticos. En el caso particular de suelos colapsables, el cambio volumétrico se asocia comúnmente con cambios de la succión en el suelo y la rotura de vínculos cementados. Debido a esto, resulta necesario combinar análisis de infiltraciones y análisis de tensiones, de manera acoplada o desacoplada, para resolver el problema (Fredlund, 2006).

3.1 Modelo de colapso relativo

A partir de mediciones experimentales se ha establecido que la magnitud de colapso relativo es función del incremento de humedad experimentado por el suelo y la tensión vertical actuante durante el proceso de humedecimiento. Para definir las características de deformación, y calcular los asentamientos por colapso, resulta necesario definir esta relación, para cada uno de los estratos de suelo involucrados. El colapso relativo se determina por medio de ensayos de compresión confinada, en los cuales se hace variar la humedad (w) y la tensión actuante (σ). Definida esta relación, es necesario conocer como varían estos parámetros, humedad y tensión, en el problema analizado. La formulación de este modelo corresponde a

$$W_{col} = \sum_{i=1}^n W_{col,i} = \sum_{i=1}^n \delta_{col,i} H_i \quad (4)$$

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \quad (5)$$

$$\delta_{col} = f(w, \sigma) \quad (6)$$

$$w = f(z, t), \quad \sigma = f(z, t) \quad (7)$$

$$\delta_{col} = \frac{\varepsilon_{hm} - \varepsilon_s}{1 - \varepsilon_1} \quad (8)$$

$$\delta_{col} = \alpha \sigma^\beta \quad (9)$$

Donde $W_{col,i}$: asentamiento adicional por colapso del estrato i , $\delta_{col,i}$: colapso relativo del estrato i para un estado tensional determinado, H_i : espesor del estrato i , w : humedad gravimétrica, σ : tensión actuante, z : profundidad, t : tiempo, ε_{hm} : deformación unitaria a humedad natural a la tensión σ , ε_s : deformación unitaria saturada a la tensión σ , ε_1 : deformación unitaria a humedad natural a una tensión vertical igual a la generada por el peso propio del suelo en campo, y α y β son coeficientes experimentales que dependen de la humedad.

3.2 Modelo elastoplástico

Alonso et al. (1990) presentaron una formulación matemática al modelo elastoplástico propuesto. En la ésta formulación, se han utilizado dos variables independientes de tensión, correspondientes a exceso de tensión respecto de la presión de aire (p), y succión (s). La representación se planeta en el espacio de tensiones (p,s), y las variables de estado son,

$$p = \sigma_m - u_a, \quad s = u_a - u_w \quad (10)$$

Donde $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ tensión media neta, u_a : presión de poro de aire, u_w : presión de poro de agua.

El modelo ha sido formulado a partir de la observación del comportamiento de un ensayo de compresión isótropa bajo una succión establecida (Figura 1). La deformación establecida de referencia se corresponde con el volumen específico, $v = 1 + e$, siendo e la relación de vacíos del suelo, de esta forma

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \left(\frac{p}{p^c} \right) \quad (11)$$

donde p^c : tensión de referencia para la cual $v = N(s)$.

En trayectorias de descarga y recarga, para succión constante, se asume un comportamiento elástico a través de la relación

$$dv = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (12)$$

Donde κ : pendiente del tramo elástico independiente de la succión y adoptada constante, a fin de garantizar que en la parte elástica el modelo sea conservativo.

La Figura 1, en acuerdo con el modelo, presenta la respuesta de dos muestras de un mismo suelo sometido a succiones diferentes ($s = 0$ y $s = cte$) en trayectorias de tensiones isótropas. Para el suelo saturado la presión de fluencia es p_o^* , y para el suelo no saturado la tensión a

partir de la cual comienzan a generarse deformaciones permanentes es p_o .

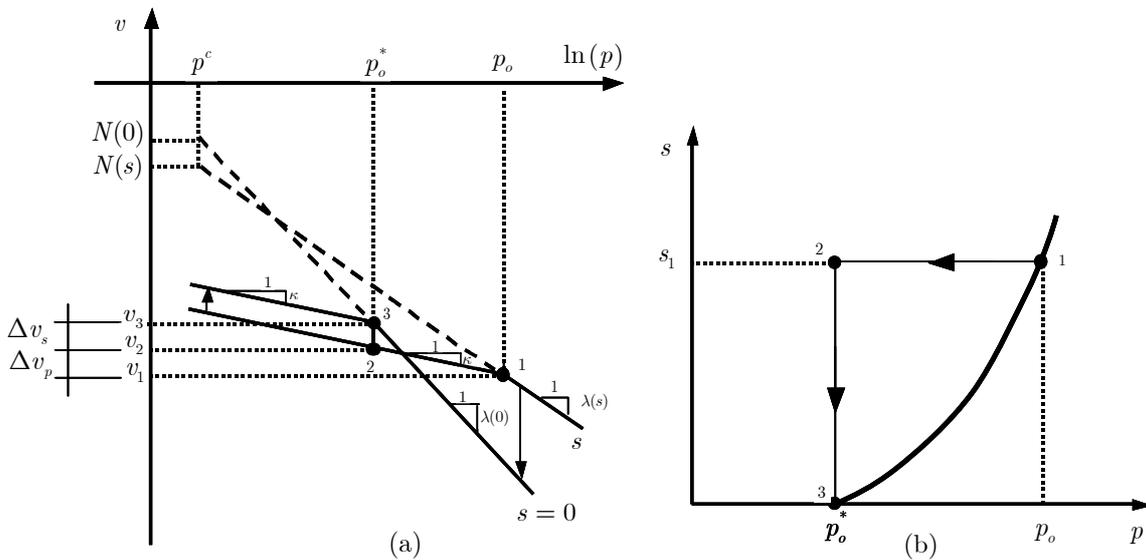


Figura 1: Modelo elastoplástico (a) curvas de compresión (b) camino de tensiones y curva de fluencia en espacio (p,s) (Alonso et al., 1990)

En función de las deformaciones seguidas entre los puntos 1, 2 y 3 de la figura, es posible establecer la siguiente identidad

$$v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s = v_3 \quad (13)$$

El tramo en descarga de succión o humedecimiento del punto 2 al 3 ocurre en dominio elástico. En este caso, se tiene un hinchamiento reversible Δv_s , dado por,

$$dv = -\kappa_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (14)$$

Donde p_{atm} : presión atmosférica, κ_s : pendiente en zona elástica.

Desarrollando la ecuación (13), se tiene la familia de curvas de fluencia en el espacio (p,s) correspondiente a la ecuación,

$$\left(\frac{p_o}{p^c} \right) = \left(\frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (15)$$

Donde p_o^* : tensión de fluencia saturada, p_o : tensión de fluencia a succión s , p^c : tensión de referencia.

Para aislar una única curva de fluencia resulta necesario especificar la tensión de fluencia para la condición de saturación, p_o^* , la cual corresponde al parámetro de endurecimiento del modelo (Figura 2).

La expresión que describe el incremento de rigidez del suelo con la succión en tramo virgen corresponde a

$$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r) \exp(-\beta s) + r \right] \quad (16)$$

Donde $r = \text{constante}$ que relaciona la máxima rigidez del suelo $r = \lambda(s \rightarrow \infty)/\lambda(0)$, $\beta =$ parámetro que controla la relación de incremento de rigidez del suelo con la succión.

Por otro lado, el modelo define una condición de fluencia para un valor de succión, s_o , definido como la máxima succión que el suelo ha experimentado en el pasado. De esta forma, en la curva SI (Figura 2) se define el límite de transición de rango elástico a virgen para incrementos en la succión. Luego en el rango elastoplástico de variación de succión se tiene,

$$dv = -\lambda_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (17)$$

Donde λ_s : pendiente en tramo elastoplástico de variación de volumen específico en función de succión.

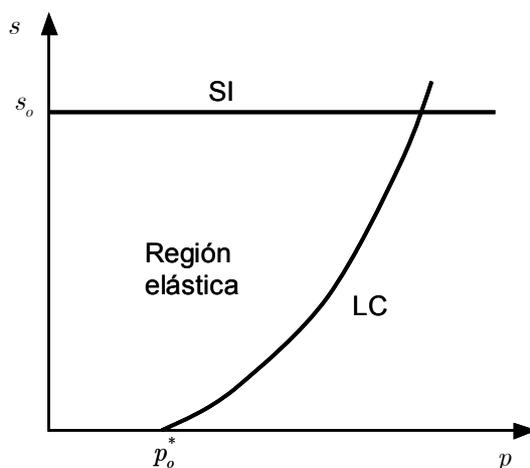


Figura 2: Curvas de fluencia en modelo elastoplástico (Alonso et al., 1990)

La Figura 2 representa el comportamiento en deformación de suelos no saturados en el espacio (p,s) . En ésta, pueden distinguirse dos regiones, una región elástica donde las deformaciones son reversibles, y una elastoplástica. Las curvas de fluencia LC (*loading collapse*) y SI (*suction increase*) delimitan estas zonas.

Alternativamente, para la representación de las curvas de fluencia LC, Josa et al. (1992) proponen la siguiente ecuación

$$p_o = (p_o^* - p^c) + p^c [(1 - m)\exp(-\alpha s) + m] \quad (18)$$

Donde m y α son las variables que deben ser calibradas para cada tipo de suelo. La variable m representa la relación existente entre p_o para niveles elevados de succión y p_o^* .

Para incrementos en valores de tensión y succión, se definen las reglas de endurecimiento mediante deformaciones volumétricas elásticas ($d\varepsilon_{vi}^e$), plásticas ($d\varepsilon_{vi}^p$) y totales ($d\varepsilon_{vi}$), a partir de las siguientes ecuaciones

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p}, \quad d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \frac{dp_o^*}{p_o^*}, \quad d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s)}{v} \frac{dp_o}{p_o} \quad (19)$$

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s}{v} \frac{ds}{(s + p_{atm})}, \quad d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds_o}{(s_o + p_{atm})}, \quad d\varepsilon_{vs} = \frac{\lambda_s}{v} \frac{ds_o}{(s_o + p_{atm})} \quad (20)$$

4 DESARROLLO DE MODELOS

4.1 Infiltración y perfil de humedad

Para el análisis numérico de los procesos de infiltración, correspondiente al volumen infiltrado en el tiempo y avance del perfil de humedad, se ha empleado un modelo de flujo no saturado y transitorio. Para esto, se han implementado códigos de ingreso en el programa de cálculo UNSAT-H, (*Unsaturated Soil Water and Heat Flow Model*). Este programa se organiza en tres módulos correspondientes a ingreso, cálculo y salidas. Las soluciones se obtienen por medio del método de diferencias finitas y resuelve problemas en una dimensión.

En el código de ingreso, se define la malla y conectividades, condiciones de borde de carga o flujo, como carga de agua en superficie y condición en la base del espesor de suelo, y condiciones iniciales, como succión inicial en el perfil de suelo. También se ingresan propiedades del suelo típicas de análisis en condición no saturada. El módulo de salidas permite obtener datos en función del tiempo o profundidad. Respecto al tiempo se puede obtener carga total y humedad volumétrica en nodos, infiltración y flujo. Respecto a la profundidad permite obtener carga hidráulica total y humedad volumétrica.

Para la definición de parámetros apropiados para caracterizar el comportamiento del suelo inalterado y compactado, se simuló ensayos de infiltración y los resultados fueron contrastados con resultados experimentales de laboratorio. Los ensayos de infiltración fueron realizados en celdas de infiltración de pared rígida bajo condición de carga de agua constante en superficie.

El código de cálculo permite considerar perfiles de suelo estratificados. En éstos, se ha considerado un perfil de humedad inicial definido por el equilibrio de succiones y un perfil final establecido por la condición de flujo no saturado estacionario. De esta forma, los modelos de asentamiento implementados resuelven el problema en un solo paso, para las variaciones en el contenido de humedad del suelo

4.2 Asentamiento basado en colapso relativo

En el modelo de colapso relativo implementado se han incorporado diferentes consideraciones, con el objetivo de mejorar las predicciones de asentamiento. Se ha considerado un perfil de suelo estratificado, para suelo inalterado y compactado. El espesor de suelo inalterado colapsable se ha considerado de 10 metros, por lo que se ha condicionado el algoritmo de cálculo para que con profundidades superiores a la de referencia el asentamiento sea nulo. No obstante, este condicional a cero puede sustituirse en el modelo por una ley de colapso relativo de magnitud inferior que en los primeros 10 metros de suelo natural. Los perfiles de humedad inicial y final han sido establecidos a partir de las condiciones de equilibrio de succiones y flujo estacionario, no obstante resulta posible implementar cualquier otra ley de variación para las condiciones iniciales y finales de humedad.

Para determinar los parámetros involucrados en el cálculo de asentamiento, se han utilizado resultados experimentales. Para esto se han realizado ensayos de compresión confinada, realizados sobre muestras inalteradas del suelo en estudio, preparadas con diferentes contenidos de humedad. Los resultados obtenidos han permitido obtener las curvas de colapso relativo. Para esto, se define una humedad inicial, y se calculan las diferencias de deformación en puntos bajo un mismo estado de tensión y diferentes contenidos de humedad, w (Figura 3). Las curvas presentan tres tramos bien diferenciados. En general se observa, un primer tramo de crecimiento exponencial, un segundo tramo de crecimiento logarítmico y un tercer tramo de ligera disminución del colapso relativo con el aumento de tensión.

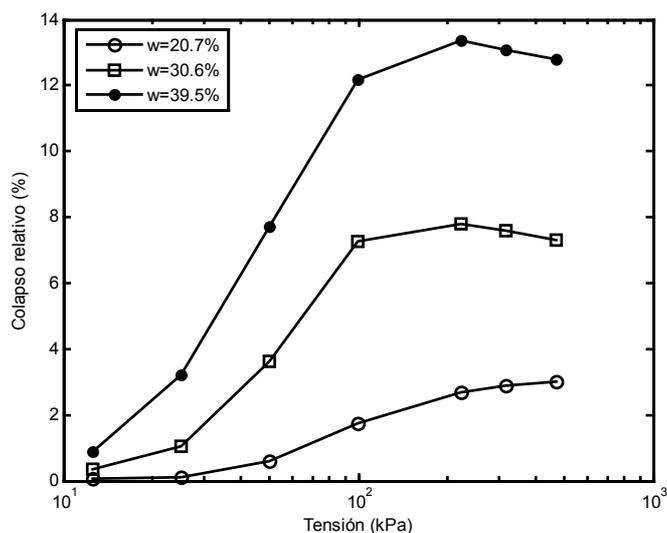


Figura 3: Curvas de colapso relativo para suelo inalterado (humedad inicial 17.3%)

Las curvas de colapso relativo han sido calibradas mediante un modelo exponencial (ecuación 9) el cual, para el caso de suelo inalterado, resultó adecuado hasta valores de tensión de 100 kPa, por lo que este modelo exponencial se ha considerado válido hasta este valor límite. Con el fin de extender el modelo planteado a mayores valores de tensión, y a partir de los resultados experimentales, se propone un modelo exponencial-constante para diferentes valores de humedad, aplicable a cualquier valor de tensión. El tramo exponencial se adopta hasta valores de tensión de 100 kPa, seguido de un plafón constante. En la Figura 4 se presenta el ajuste del modelo a los resultados experimentales. En general, se observa que el modelo propuesto representa de manera adecuada los resultados para diferentes incrementos de humedad. Los parámetros del modelo en el tramo exponencial se ajustaron a partir de considerar una ley de variación lineal del coeficiente α en función de la humedad, y un valor constante para β . La Figura 5 muestra el modelo de colapso relativo propuesto, representado en escala lineal como superficie, donde las variables independientes corresponden a tensión y humedad gravimétrica.

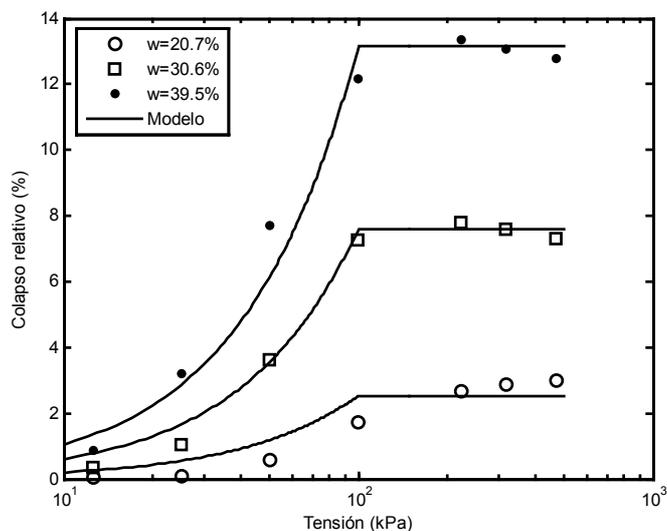


Figura 4: Ajuste del modelo propuesto a los resultados experimentales en limo inalterado

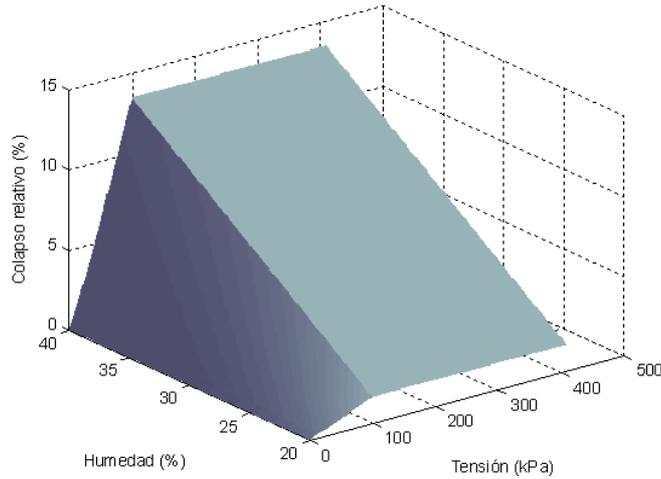


Figura 5: Superficie de colapso relativo en limo inalterado (humedad inicial 17.3%)

Por otro lado, se obtuvieron los parámetros del modelo para el suelo compactado con humedad óptima, al 100% de energía Proctor Estándar. En este caso se consideraron resultados experimentales correspondientes a dos ensayos de compresión confinada, uno realizado a humedad de compactación (18.2%) y otro a humedad próxima de saturación (19.6%). Los resultados muestran diferencias respecto del comportamiento del suelo inalterado (Figura 6). Se observa un primer tramo de crecimiento logarítmico, seguido de un segundo tramo de crecimiento exponencial. La aproximación del modelo en todo el rango de tensiones se ha realiza mediante una ley exponencial mediante valores constantes para α y β .

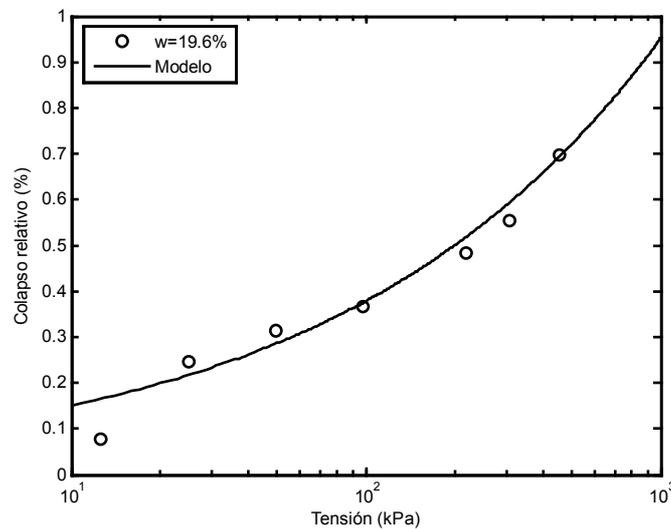


Figura 6: Ajuste de modelo exponencial a resultados experimentales en limo compactado

4.3 Asentamiento basado en modelo elastoplástico

El modelo elastoplástico se ha implementado mediante una familia de funciones bilineales para la relación entre deformación y tensión, en escala lineal y logarítmica respectivamente, con diferentes niveles de succión. De esta forma, se calibraron los parámetros del modelo a resultados experimentales obtenidos mediante ensayos de compresión confinada realizados

bajo diferentes condiciones de humedad, conservada constante durante el ensayo. Las humedades fueron correlacionadas con valores de succión por medio de las curvas características suelo-agua, definidas para estos suelos (Zeballos et al., 2005). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7, en la que se observa un adecuado ajuste del modelo a los resultados experimentales.

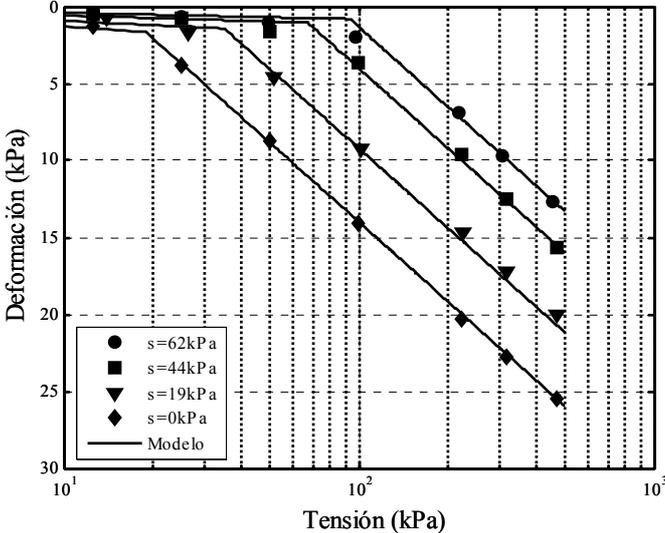


Figura 7: Ajuste de modelo elastoplástico a resultados experimentales en limo inalterado

La definición del modelo demanda la necesidad de establecer una curva de fluencia, que establezca la zona límite de separación entre comportamiento elástico y elastoplástico. Para esto se define la curva LC, a partir de la ecuación propuesta por Josa et al., 1992. Para el análisis, se han considerado numerosos ensayos de compresión confinada realizados a humedad constante sobre limos inalterados, juntos con ensayos realizados por Redolfi y Zeballos (1996) en celdas de compresión confinada instaladas bajo condiciones de succión controlada. Los resultados se presentan en la Figura 8, donde el modelo representa las tensiones de fluencia para diferentes niveles de humedad o succión.

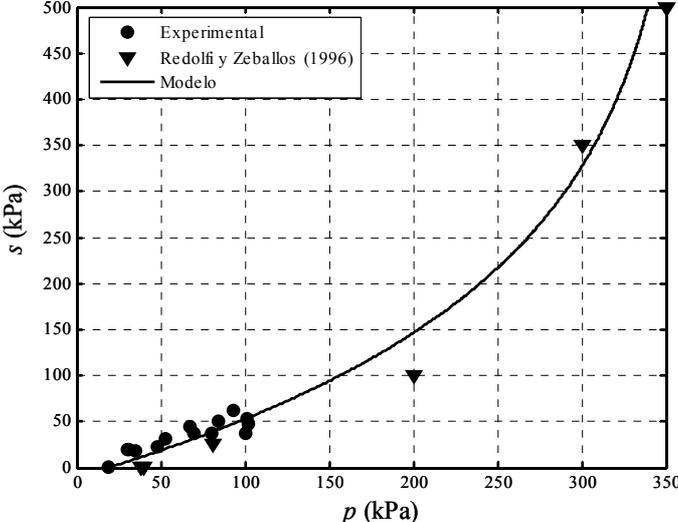


Figura 8: Curva LC para limo inalterado

A partir de los parámetros establecidos y la curva de fluencia, se extiende para el dominio de tensiones y succiones los valores de deformación en campo elástico y elastoplástico. De esta forma, se genera la superficie de estado que representa el comportamiento tenso-deformacional del suelo inalterado, a partir del modelo elastoplástico (Figura 9). Similarmente, se han efectuado los ajustes del modelo para representar el comportamiento del suelo compactado. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 10. Estos resultados fueron extendidos al dominio de tensiones y succiones a fin de establecer la superficie de estado para el suelo compactado. El suelo compactado corresponde a limo compactado a 100% en energía Proctor Estándar y humedad óptima. Se observa que, tanto en la magnitud final absoluta, como en incrementos generados por aumentos en el contenido de humedad, las deformaciones en el suelo compactado son considerablemente inferiores que en el suelo inalterado. Debido a esto, independiente de la condición de compactación considerada para el análisis de infiltración, a los fines de evaluar asentamientos en perfiles estratificados, se adoptará la misma superficie de estado para el estrato de suelo compactado.

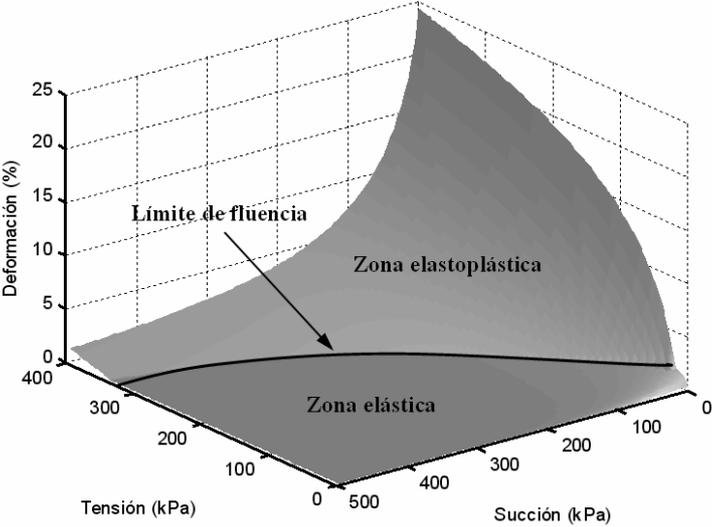


Figura 9: Superficie de estado para limo inalterado

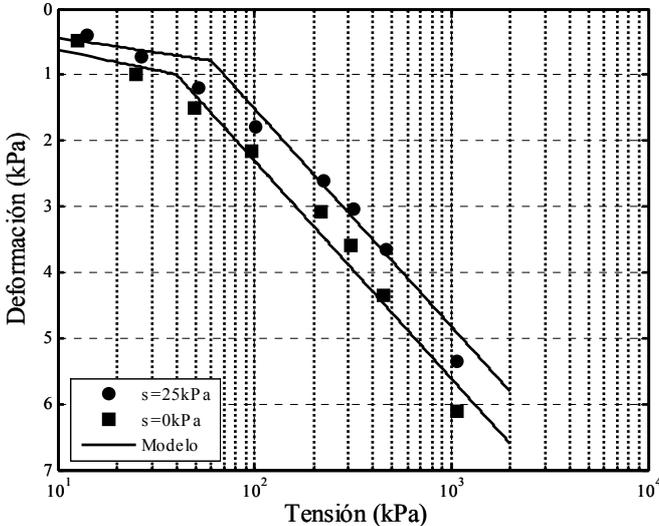


Figura 10: Ajuste de modelo elastoplástico a resultados experimentales en limo compactado

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los modelos desarrollados han sido empleados en la evaluación del comportamiento de sistemas de barreras de suelo compactado, instaladas en depósitos de suelos colapsables. Para esto, se han planteado diferentes escenarios, y mediante los modelos acoplados se estimaron los perfiles de humedad inicial y en condición estacionaria, y se calcularon los asentamientos correspondientes. De esta forma, se compararon los resultados obtenidos con cada uno de los modelos desarrollados. Finalmente, se han realizado análisis sobre la influencia de diferentes variables en el desempeño de estos sistemas.

5.1 Caso de estudio

En la [Figura 11](#) se presenta un esquema general del sistema a considerar en los escenarios de análisis, donde se indican los diferentes elementos componentes y el esquema conceptual del modelo. Se ha definido una geometría unidimensional constituida por nodos separados una distancia de 0.1 metros en zonas de suelo natural y 0.05 m en el primer tramo de barrera. El sistema analizado corresponde a un perfil de suelo estratificado, por lo que se consideraron dos tipos de suelo para la asignación de materiales en los nodos.

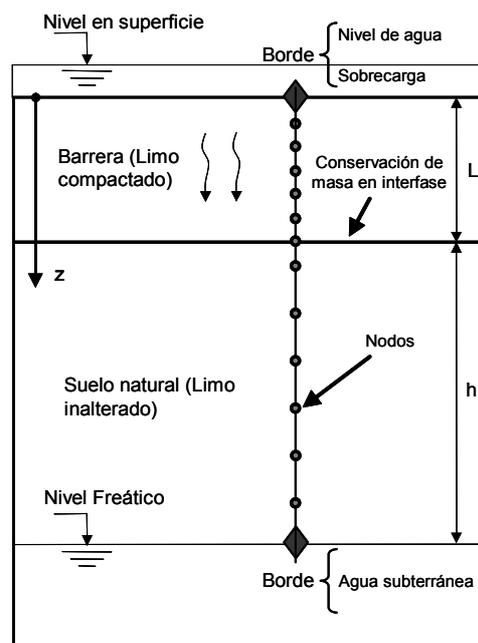


Figura 11: Sistema de barrera

En el sistema se han incluido; barrera de suelo compactado, estrato de suelo natural (limo inalterado), nivel freático y la condición de contorno superior impuesta nivel constante de agua en superficie, la cual se conserva constante en todos los escenarios. En el análisis del caso planteado, se ha estudiado la influencia del espesor de barrera de suelo compactado, profundidad de nivel freático, y energía de compactación. Para esto, en un primer escenario se han conservado constante todas las variables del problema, modificándose solo el espesor de la barrera de suelo compactado. En segundo lugar, se modificó la profundidad del nivel freático conservando. Finalmente se consideraron variaciones en las condiciones de compactación de la barrera, asumiendo una energía de compactación igual al 80% de Proctor Estándar y humedad óptima. En todos los casos, los valores de referencia correspondieron a espesor de barrera de 1.0 metro, profundidad de nivel freático igual a 10 metros desde nivel

superior de barrera, y condición de compactación a 100% de energía Proctor Estándar.

Para las condiciones iniciales, se ha considerado un estado de equilibrio con distribución lineal de succión en profundidad. A partir de esta condición inicial impuesta, el programa computa el estado de humedad inicial a través de la relación succión-humedad definida. Para este análisis se adoptaron las relaciones succión-humedad y succión-permeabilidad de [van Genuchten \(1980\)](#) [Mualem \(1976\)](#). En la definición de condiciones de contorno, se establecieron condiciones de carga constante tanto en el nodo superior como inferior. En el nodo superior, se asume una carga de agua constante en superficie de 3 kPa (0.30 metros), debido a que corresponde a la carga máxima aceptable en diseño de barreras ([Qian et al., 2004](#)). El nodo inferior se considera fijo, con valor de succión nula, ya que en todos los casos corresponde al nivel freático.

Las simulaciones en UNSAT-H se han efectuado con incrementos temporales de 1 día, y se evaluaron durante un período total de 5 años, tiempo en el que se evidencia proximidad a la condición de flujo estacionario y por lo tanto los perfiles de humedad tienden a conservarse constantes en el tiempo. La evaluación de asentamientos se realiza en un paso, correspondiente al salto desde el perfil de humedad inicial hasta la condición estacionaria. Los parámetros adoptados para las simulaciones se presentan en la [Tabla 1](#).

Parámetro	Unidad	UNSAT-H – Modelo de asentamiento		
		LI	LC1	LC2
θ_s	---	0.50	0.35	0.37
θ_r	---	0.10	0.12	0.11
α	cm ⁻¹	0.0045	0.002	0.002
n	---	2.20	1.45	1.45
ψ_i	cm	variable	250	690
k	m/s	5.5×10^{-7}	8.4×10^{-10}	1.3×10^{-8}
γ_d	kN/m ³	12.3	17.2	16.6
w	%	17.3	18.6	18.9

Referencias: LI = limo inalterado, LC1 = limo compactado 100% Proctor estándar, LC2 = limo compactado 80% Proctor estándar, θ_s = humedad volumétrica de saturación, θ_r = humedad volumétrica inicial, α y n parámetros de van Genuchten (1980) Mualem (1976), k = permeabilidad, γ_d = peso unitario seco, w = humedad natural o de compactación, ψ_i = succión inicial en el suelo.

Tabla 1: Parámetros adoptados en las modelaciones

5.2 Análisis comparativo entre modelos

Los escenarios de análisis propuestos fueron corridos con cada uno de los dos modelos implementados, con el objetivo de contrastar los resultados. En la [Figura 12](#) se presenta la influencia de la sobrecarga en el asentamiento del sistema. En este caso, las condiciones del sistema corresponden a las de referencia. Se observa que, a bajos niveles de sobrecarga el modelo de colapso relativo sobrestima los asentamientos calculados hasta un valor límite aproximado de 40 kPa, a partir de aquí comienza a subestimar los asentamientos, adoptando una tendencia asintótica y con una diferencia constante entre los modelos.

Para el modelo elastoplástico, se visualiza una ligera disminución en los valores calculados a partir de que los valores de sobrecarga superan los 100 kPa. Esto se debe a que, cuando los

asentamientos calculados tienden a valores constantes, a partir de un cierto nivel de sobrecarga, los pasos constantes en succión provocan mayor precisión en los asentamientos calculados presentando una tendencia convergente. No obstante, esta diferencia que corresponde a un problema de precisión numérica, no implica influencias significativas en los resultados obtenidos.

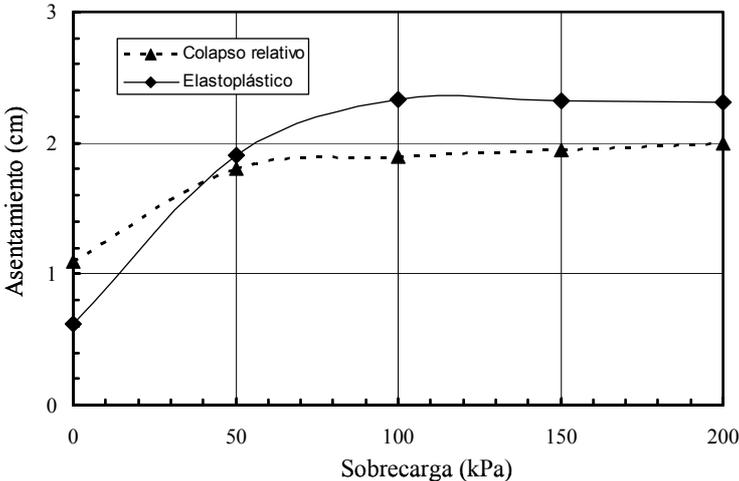


Figura 12: Comparación entre modelos

En la Figura 13 se presentan las diferencias obtenidas entre los modelos para diferentes espesores de barreras, y con dos niveles de sobrecarga. Los resultados muestran que cuando la sobrecarga es nula, el modelo de colapso relativo sobrestima los resultados obtenidos. No obstante, esta diferencia tiende a disminuir con incrementos en el espesor de barrera. Cuando se tiene sobrecarga de 200 kPa, los resultados son opuestos. En este caso, mediante el modelo de colapso relativo se subestiman los asentamientos, y esta diferencia se acrecienta con mayores espesores de barreras.

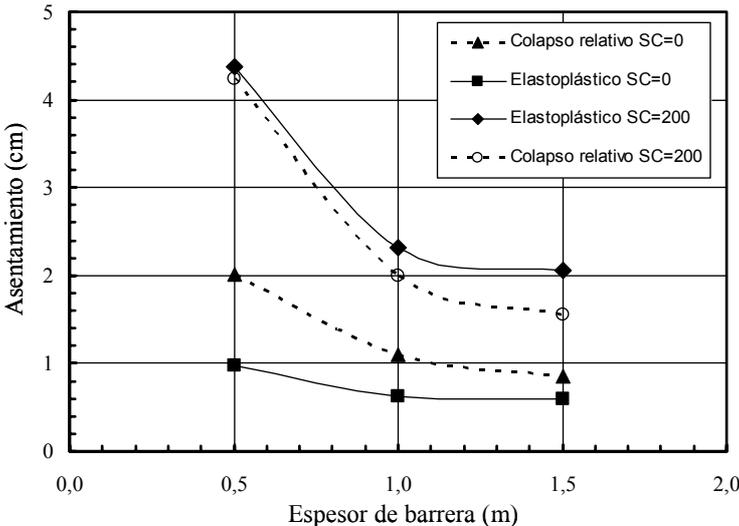


Figura 13: Comparación entre modelos

Las diferencias obtenidas entre los modelos implementados presentan dos orígenes. Por un lado las diferentes flexibilidades entre éstos para ajustas los resultados experimentales, y por

otro los fundamentos que permiten extrapolar los resultados a todo el dominio de tensiones y succiones. A pesar de esto, las diferencias resultan dentro un mismo orden de magnitud. No obstante, para el análisis del comportamiento del sistema de barrera, se optó por el modelo elastoplástico debido a la mayor confiabilidad en los resultados obtenidos. Esta mayor confiabilidad se atribuye a la base teórica que fundamenta su formulación y la mayor flexibilidad que el mismo presenta para calibrar resultados experimentales en todo el dominio de tensiones.

5.3 Comportamiento de barreras

La evaluación del desempeño de sistemas de barreras se ha realizado mediante el empleo del modelo elastoplástico. Para esto, se contemplaron los diferentes escenarios planteados, y se implementaron los códigos de entrada correspondientes. En la [Figura 14](#) se presenta la influencia del espesor de barrera para diferentes niveles de sobrecarga. Los resultados muestran que los incrementos en el espesor de barrera reducen significativamente los asentamientos calculados. Esta tendencia se tiene para todos los niveles de sobrecarga estudiados. La reducción en asentamientos con incrementos en el espesor de barrera adopta una tendencia asintótica, y los mismos se tornan constantes a partir de espesores de barrera de 1.0 metro aproximadamente. A partir de este límite, no se observan reducciones significativas. Por otro lado, los asentamientos se incrementan con las sobrecargas hasta valores límites de 100 kPa aproximadamente. A partir de aquí, incrementos en la sobrecarga no provocan modificaciones significativas en los resultados. Se observa también que la sobrecarga presenta mayor influencia con menores espesores de barrera. Al incrementarse el espesor de barrera, se disminuyen los incrementos de asentamientos por incrementos en la sobrecarga.

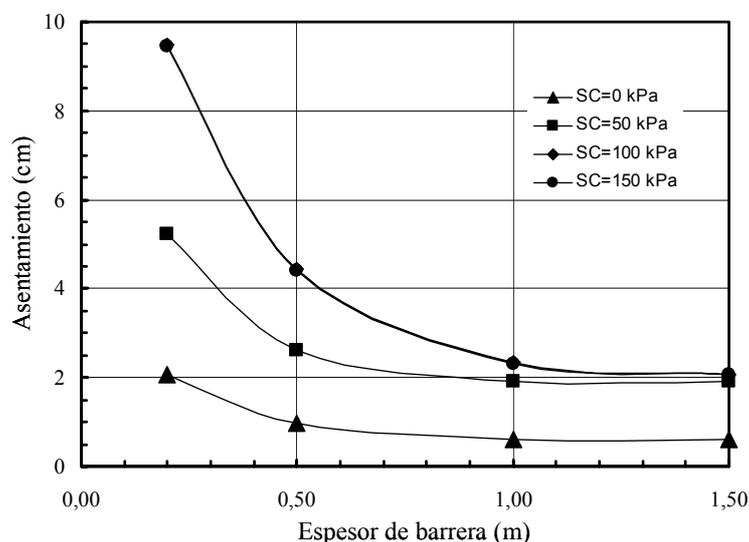


Figura 14: Influencia de espesor de barrera compactada en los asentamientos calculados

En segundo lugar, se estudio la influencia de la profundidad de nivel freático ([Figura 15](#)). Los resultados muestran los asentamientos calculados para diferentes niveles de sobrecarga en superficie y diferentes profundidades de nivel freático (NF). En todos los casos se observa una variación con forma de campana invertida, donde los asentamientos crecen hasta un valor máximo, y posteriormente disminuyen con incrementos en la profundidad de NF. Este máximo se desplaza hacia arriba o menores profundidades de NF, cuando se incrementa la

sobrecarga en superficie. Este comportamiento es de particular interés, debido a que permite observar que para cada condición del sistema, existe una profundidad de NF crítica para la cual los asentamientos estimados son máximos.

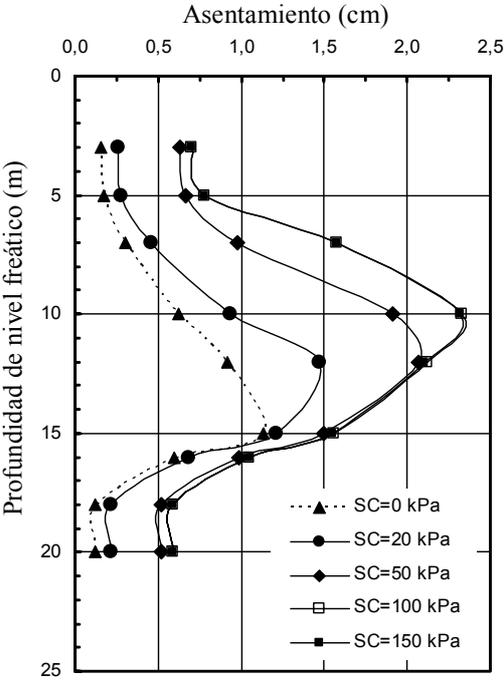


Figura 15: Influencia de la profundidad de nivel freático en los asentamientos calculados

Finalmente, se estudió la influencia de las condiciones de compactación. Los resultados obtenidos muestran un considerable aumento en los asentamientos estimados al degradar las condiciones de compactación de 100% a 80% de energía Proctor Estándar (Figura 16). La diferencia se torna constante para sobrecargas superiores a 100 kPa.

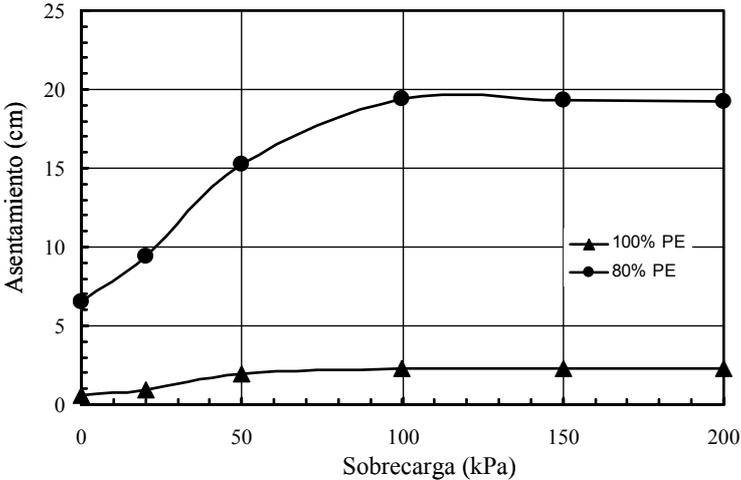


Figura 16: Influencia de la energía de compactación en los asentamientos calculados

6 CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo e implementación numérica de modelos acoplados de infiltración-asentamiento con evolución temporal, aplicable al análisis de perfiles de suelo estratificados en condición de flujo no saturado. Para el análisis de infiltración se plantean el modulo de cálculo UNSAT-H. Para éste análisis, se determinaron los parámetros característicos del suelo en estudio, correspondiente a limo inalterado y compactado bajo diferentes condiciones, mediante la simulación de ensayos de laboratorio y calibración a los resultados experimentales. Las simulaciones han permitido obtener resultados referidos a la curva de infiltración, o infiltración acumulada en el tiempo, y avance del perfil de humedad.

Para el análisis de asentamientos por colapso, se han planteado dos modelos correspondientes a colapso relativo y elastoplástico. Se han presentado las respectivas formulaciones y calibrado a resultados experimentales de ensayos de compresión confinada en limo inalterado y compactado. Los modelos contemplan la posibilidad de analizar asentamiento en suelos estratificados de cualquier profundidad, con espesores arbitrarios de suelo colapsables, para condiciones iniciales y finales de humedad variables a lo largo del perfil de suelo, y con la posibilidad de incorporar sobrecargas en la superficie del perfil. A partir de resultados obtenidos se han comparado los desempeños de ambos modelos.

Se ha estudiado el comportamiento de barreras instaladas en depósitos de suelos colapsables mediante la aplicación del modelo elastoplástico acoplado. Mediante diferentes escenarios de análisis, se ha simulado el comportamiento de los sistemas de barrera a infiltración y colapso. En éste análisis, se ha evaluado la influencia del espesor de barrera, profundidad de nivel freático y energía de compactación. Los resultados permiten concluir que la posición del nivel freático presenta un comportamiento tipo campana invertida, donde se visualiza una profundidad de asentamiento máximo para cada escenario simulado. Por otro lado, puede concluirse que el espesor de barrera y la energía de compactación afectan el comportamiento de manera notable. La presencia de sobrecargas incrementa los asentamientos, no obstante, luego de la primera aplicación de carga, los incrementos de asentamiento tienden a reducirse. A partir de los resultados se concluye que, en la definición de criterios de diseño de barreras se deberá tomar precaución en la definición de espesores mínimos de suelo compactado y en la recomendación de controles de calidad del suelo compactado en campo.

7 AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional y la Agencia Córdoba Ciencia. Las actividades se han desarrollado en el marco del Departamento de Ingeniería Civil UTN-FRC, al cual los autores le agradecen las facilidades y apoyo brindado. Gonzalo Aiassa agradece la beca doctoral otorgada por la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A., A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40:405–430, 1990.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., and Zarba, R. L., A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, 26:1483-1496, 1990.
- Fayer, M.J., *Unsaturated soil water and heat flow model*. UNSAT-H, ver. 3.0. U.S.

- Department of Energy. DE-AC06-76RLO 1830 Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Wash, 2000.
- Fredlund, D.G., Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132:286-321, 2006.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A., *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1979.
- Josa, A., Balmaceda, A., Gens, A., and Alonso, E., An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse. *III International Conference of Computational Plasticity*, Barcelona, España, 1992.
- Leong, E.C., and Rahardjo, H., Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123:1118-1126, 1997b.
- Leong, E.C., and Rahardjo, H., Review of soil water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123:1106-1117, 1997a.
- Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522, 1976.
- Qian, X., Gray, D.H., and Koerner, R.M., Estimation of maximum liquid head over landfill barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130:488-497, 2004.
- Redolfi, E., Comportamiento de pilotes en suelos colapsables. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 1990.
- Redolfi, E., y Zeballos, M., Estimación de superficies de estado en suelos loésicos. *Encuentro de Geotécnicos Argentinos*, Córdoba, Argentina, 1996.
- van Genuchten, M.T., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44:892-898, 1980.
- Zeballos, M., Terzariol, R., and Aiassa, G., Unsaturated infiltration model of loess soils. *Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, 2005.
- Zur, A., and Wiseman, G., A Study of collapse phenomena of an undisturbed loess. *Proceeding of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscú, URSS, 1973.