

SIMULACION NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE LOESS PARCIALMENTE SATURADOS

Ricardo Schiava y Facundo J. Moya Cocco

*Universidad Nacional de Santiago del Estero, Av. Belgrano (s) 1912, 4200 Santiago del Estero,
Argentina, schiava@unse.edu.ar, facumoya@hotmail.com*

Palabras clave: Medios porosos, no saturados, modelo constitutivo.

Resumen. El comportamiento de los suelos parcialmente saturados está determinado por las características de su estructura macroporosa. La succión de matriz es una variable adicional fundamental en su respuesta tenso deformacional bajo condiciones de humedad variable. En el noroeste de Argentina existen depósitos de loess de origen predominantemente eólico, que están constituidos por limos y mezclas de limos y arcillas, con contenido escaso de arena fina. Algunos de ellos presentan características colapsables, es decir que por incremento del contenido de humedad hasta valores próximos al límite líquido, experimentan la rotura de su estructura macroporosa experimentando rápidas deformaciones volumétricas. El estudio de este comportamiento reviste especial interés para la propuesta de soluciones a los problemas geotécnicos que involucran a estos tipos de suelos. En este trabajo se presenta la implementación numérica de un modelo acoplado flujo-mecánico, en el que, para la resolución del flujo en el medio poroso parcialmente saturado se emplea la ecuación propuesta por [Richards, 6th Asut-NZ Conf on Geom. \(1992\)](#). Esta ecuación se deriva de la combinación de la ecuación de conservación de la masa ó ecuación de continuidad y la ley de Darcy, asumiendo que los efectos del aire ocluido en el agua y la compresibilidad de la matriz sólida son despreciables. En la presente formulación, para la respuesta material se aplica el modelo constitutivo elastoplástico extendido de MRS-Lade.

Finalmente se realizan simulaciones numéricas para reproducir el comportamiento de estos loess no saturados bajo condiciones de infiltración y niveles variables de carga, previa calibración de los parámetros del modelo mediante ensayos experimentales.

1 INTRODUCCION

Los loess son suelos finos, generalmente de origen eólico, que conservan su estructura originada al depositarse siendo llamados loess primarios, ó bien pueden sufrir una alteración in situ ó ser retransportados denominándose entonces loess secundarios. Presentan estructura macroporosa en la cual los granos de arena fina y limo están unidos por puentes de arcillas y/o sales que le otorgan rigidez y resistencia con contenido de humedad reducido. Al incrementarse el contenido de humedad las sales se disuelven y las arcillas tienden a expandirse destruyéndose el vínculo entre las partículas produciéndose una disminución rápida del volumen. Este fenómeno, denominado "colapso", implica una disminución rápida del volumen del suelo y es debido a un aumento del contenido de humedad ó bien por incremento de la presión media ó de la tensión de corte debida a cargas externas, según [Zur and Wiseman \(1973\)](#). En las obras de ingeniería que involucran este tipo de suelos, como ser la construcción de caminos ó bien obras hidráulicas, la condición ó magnitud del colapso puede disminuirse mediante el incremento de la compacidad del suelo por diferentes métodos como ser la compactación ó la presaturación. Los suelos, en tales casos, se encuentran parcialmente saturados y sus propiedades físico mecánicas están fuertemente influenciadas por su contenido de humedad inicial y su variación en el tiempo debido a cambios en las condiciones ambientales, de escurrimiento superficial o de infiltración por diversas causas, etc. Reviste importancia simular estos fenómenos y predecir la respuesta tenso deformacional de los suelos parcialmente saturados mediante la aplicación de modelos constitutivos. En este trabajo, para representar el flujo en el medio poroso parcialmente saturado, se emplea la ecuación propuesta por [Richards \(1992\)](#) para el problema de flujo acoplado parcialmente, con la introducción del modelo constitutivo elastoplástico extendido de MRS-Lade ([Schiava, 2009](#)), en el que interviene la succión como variable independiente del estado de tensiones.

2 FLUJO EN MEDIOS POROSOS

Los problemas de ingeniería que involucran a los suelos parcialmente saturados se han tratado en los últimos años como medios porosos continuos, lo que ha llevado a una descripción más realista de la compleja relación existente entre el proceso hidráulico y la respuesta mecánica inducida por el mismo. Para representar el comportamiento del medio poroso parcialmente saturado se emplea la ecuación propuesta por Richards. Esta ecuación se deriva de la combinación de la ecuación de conservación de la masa ó ecuación de continuidad y la ley de Darcy, asumiendo que los efectos del aire ocluido en el agua y la compresibilidad de la matriz sólida son despreciables. La porosidad del suelo se describe en base a la curva de retención del agua $\theta(s)$ y al tensor de conductividad hidráulica o permeabilidad $\mathbf{K}(s)$, que se pueden expresar como funciones de la succión s según [Sheng et al. \(2003\)](#)

La ecuación de continuidad es

$$\frac{\partial \theta(\mathbf{s})}{\partial t} = -\nabla \mathbf{q} + G. \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}(\mathbf{s}) \nabla p. \quad (2)$$

donde \mathbf{q} es el flujo volumétrico dado por la ley de Darcy, G la velocidad a la que se genera o se pierde flujo por unidad de volumen en régimen estacionario ó permanente, s la succión, t el tiempo, $\theta(\mathbf{s})$ el contenido volumétrico de agua, p es el potencial del agua en poros del suelo y ∇ el operador matemático $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$. Generalmente, los parámetros del suelo empleados para estas funciones se asumen como invariantes en el tiempo como en la formulación de Van Genuchten.

La presión total se puede definir entonces como la succión equivalente en el punto considerado relativa a la presión del agua libre según [Gräse et al. \(1995\)](#) y [Richards et al. \(1995\)](#).

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} = \nabla [\mathbf{K}(\mathbf{s}) \nabla p] + G. \quad (3)$$

donde $\frac{\partial \theta}{\partial s} = c(s)$ es la capacidad capilar ó la pendiente de la curva succión-volumen de agua contenido, que es una característica del suelo. En la presente formulación se emplea la función de propuesta por van Genuchten y Hillel, utilizada por [Sheng et al. \(2003\)](#), que es de la forma

$$\theta = \frac{1}{(1 + (s/a)^b)^c}. \quad (4)$$

donde a , b y c son parámetros materiales del suelo a calibrar.

La ecuación diferencial de segundo grado de Richards resulta

$$c(s) \frac{\partial s}{\partial t} = \nabla [\mathbf{K}(\mathbf{s}) \nabla p] + G \quad (5)$$

Para materiales isotropos, en este caso para simplicidad, con \mathbf{K} constante y para cuerpos planos en dos dimensiones se obtiene

$$\mathbf{K}(s) \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + G = c(s) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (6)$$

Se resalta que la predicción del flujo del agua en suelos parcialmente saturados reviste un grado de complejidad elevado por las heterogeneidades del medio y la gran cantidad de variables involucradas. La ecuación (5) es fuertemente no lineal por

la dependencia de $\mathbf{K}(s)$ y θ de la succión.

2.1 Formulación del flujo

La solución de las ecuaciones para el flujo del agua en medios porosos, por el grado de complejidad que ellas implican, está sujeta a las hipótesis simplificativas siguientes:

- Las funciones $\theta(s)$ y $\mathbf{K}(s)$ son de características histeréticas y extremadamente no lineales y funciones del contenido de agua en los vacíos, por lo que se consideran como funciones dependientes únicamente de la succión.
- No se consideran efectos de temperatura, la salinidad del suelo y los cambios de las propiedades hidráulicas debido a cambios tensionales.
- No se considera el flujo del aire.
- Se asume como válida la ley de Darcy.
- La matriz sólida del suelo es considerada rígida a los fines de simular el flujo en el medio poroso.
- Flujo isotermal

La formulación propuesta se ha implementado en el programa Feap v.7.3, [Taylor \(2000\)](#), donde la solución de las ecuaciones para problemas no lineales en régimen transitorio se obtiene mediante el método de Newmark y adoptándose una integración en los pasos de tiempo mediante el método de Backward Euler.

El análisis flujo-mecánico se realizó utilizando dicha formulación para el problema de flujo acoplado parcialmente, con la introducción del modelo constitutivo que se describe a continuación, en el que interviene la succión como variable independiente del estado de tensiones.

3 MODELO ELASTOPLASTICO PARA SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

El modelo constitutivo elastoplástico para medios cohesivos friccionales parcialmente saturados empleado, es una extensión del modelo de cono y capa conocido como MRS-Lade. Para simular el complejo comportamiento de los suelos parcialmente saturados se considera

- Formulación de dos superficies de fluencia, una superficie curva "aplanada" correspondiente al cono que se intersecta con otra superficie curva también "alisada" de capa en el plano meridiano.
- Las variables de endurecimiento y ablandamiento de ambas superficies evolucionan con el trabajo plástico de disipación.
- Regla de flujo no asociada volumétrica en la región del cono ó de baja presión de confinamiento y asociada en la región de capa de alto confinamiento, así también regla de flujo asociada en el plano desviatorio en la región del cono.
- Capacidad del modelo para considerar las fuerzas de cohesión y una superficie curva en el plano meridiano de la región del cono.

- Definición de la superficie de fluencia Carga-Colapso (LC, Loading-Collapse)
La representación tridimensional de la superficie de fluencia se muestra en [Figura 1](#).

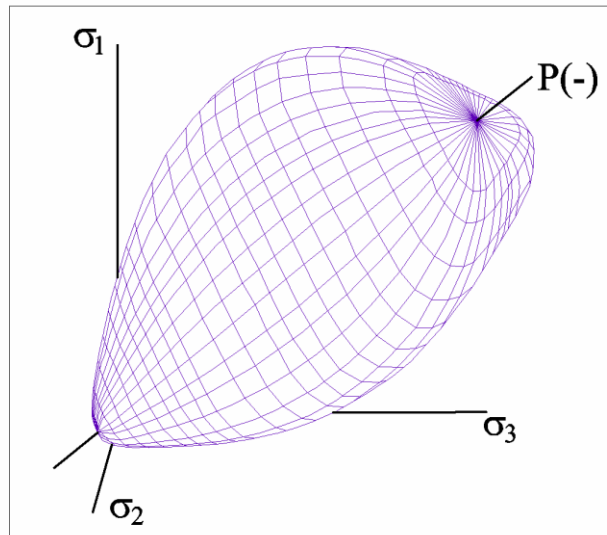


Figura 1: Superficie de fluencia en el espacio de tensiones

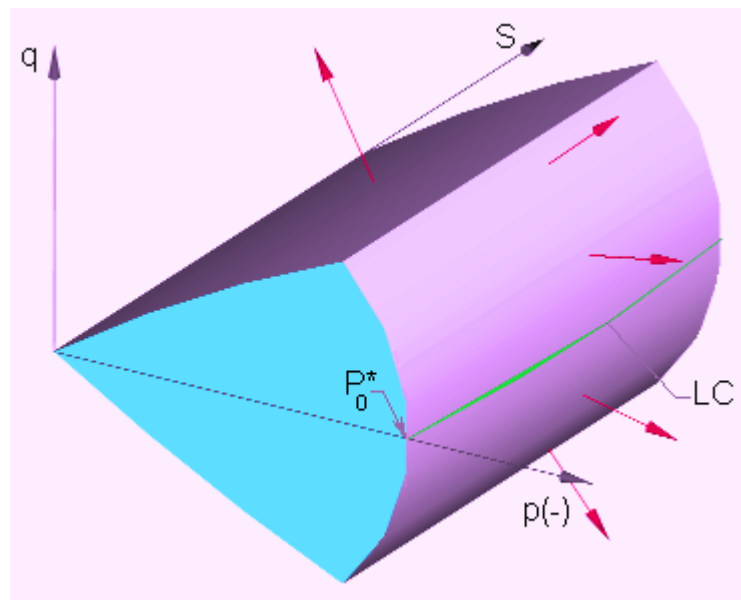


Figura 2: Superficie de fluencia en el plano p, q, s

3.1 Condición de fluencia

El modelo consiste en una superficie de fluencia curva alisada constituida por la superficie de fluencia móvil del cono hasta alcanzar la última superficie de falla y otra superficie de capa extendida entre el cono y el eje hidrostático que también

evoluciona con el trabajo de endurecimiento. La condición de fluencia se define en función del primer invariante del tensor de tensiones efectivo p' , del segundo y tercer invariante del tensor de tensiones desviatorio q y θ respectivamente y de las variables de endurecimiento/ablandamiento κ_{cono} , en la región del cono. Si se define la presión efectiva en función de la presión neta p_n y de la succión s , la función de fluencia resulta

$$F_{\text{cono}}\{p_n, q, \theta, s, \kappa_{\text{cono}}\} = f\{q, \theta\} - \eta\{\kappa_{\text{cono}}\} (p_n + s - p_c) = 0 \quad (7)$$

$$f(q, \theta) = q \left(1 + \frac{q}{q_a}\right)^m g(\theta) \quad (8)$$

donde m es una constante del material que controla la curvatura del cono en el plano meridiano (p_n, q) , con $0 \leq m \leq 1$, q_a es el valor de referencia, η_{cono} el ángulo de fricción interna, $p_c = r_{pc} s$ la cohesión del material expresada en función de la succión.

$$p_n = -\frac{I_{1n}}{3}, \quad q = \sqrt{3J_{2D}} \quad (9)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3} J_{3D}}{2 \sqrt{(J_{2D})^3}} \quad (10)$$

En las Ec. (9) y Ec. (10) I_{1n} es el primer invariante del tensor de tensiones netas J_{2D} y J_{3D} el segundo y tercer invariante de tensiones netas desviatorio, respectivamente.

La Figura 2 muestra la proyección de la superficie de fluencia del modelo Extendido de MRS-Lade en el plano meridiano y su extensión para distintos valores de succión. La intersección de la superficie de fluencia con el plano $p-s$ define la curva Carga-Colapso (LC), que produce un incremento del régimen elástico con el aumento de la succión, mientras que se reduce a un mínimo para $s=0$ (suelo saturado).

La superficie de capa, que involucra principalmente la respuesta volumétrica, viene dada por una superficie elíptica en plano meridiano expresada en términos de los invariantes de tensiones como

$$F_{\text{capa}}(p_n, q, \theta, s, \kappa_{\text{capa}}) = \left(\frac{p_n - p_m}{p_r}\right)^2 + \left(\frac{f(q, \theta)}{f_r}\right)^2 - 1 = 0 \quad (11)$$

Donde p_n, p_m y f_r son presiones de referencia. Para mayores detalles ver Schiava

(2009).

3.2 Ley de endurecimiento

Los parámetros de endurecimiento y ablandamiento κ_{cono} y κ_{capa} se definen en función del trabajo plástico acumulado w^p que se disipa durante la carga en el camino de tensiones.

$$\kappa_{\text{cono}} = \frac{1}{c_{\text{cono}} p_a} \left(\frac{p_n + s - p_c}{p_a} \right)^{-l} w^p, \quad \kappa_{\text{capa}} = \frac{1}{c_{\text{capa}} p_a} \left(\frac{p_{\text{cap},0}}{p_a} \right)^{-r} w^p \quad (12)$$

Donde $c_{\text{cono}}, c_{\text{capa}}, p_a, l, r$ son parámetros del material.

La presión de preconsolidación $p_{\text{cap},0}$, que depende del valor de la succión se expresa según la expresión de Schrefler (Schrefler y Bolzon, 1997), y define la superficie de fluencia adicional denominada "carga-colapso"

$$p_{\text{cap},0} = p_o^* + i s \quad (13)$$

El parámetro p_o^* en la ecuación (13) representa la presión de preconsolidación para la condición de suelo saturado e i el parámetro que produce el incremento de dicha presión con el aumento de la succión.

4 CARACTERIZACION DEL SUELO

Los suelos de la zona en estudio son de características limo arcillosas, clasificación unificada (SUCS= CL-ML), en general loess de la planicie santiagueña, de origen eólico y de características colapsables al aumentar su humedad a valores críticos (LE). Las características promedio del estrato involucrado en el estudio se resumen en la Tabla N° 1.

Suelo	S.U.C.S.	%P Tamiz 200	L. L.	L. P.	I. P.	γ_h kN/m ³	H.N. %
LE	ML-CL	78.30	22.60	16.10	6.50	13.7	10.40

Tabla N° 1: Características del suelo inalterado

4.1 Modelación del comportamiento material

Para determinar el comportamiento tenso deformacional de los suelos, se realizaron ensayos de compresión confinada con diferentes contenidos de humedad mantenidos constantes durante todo el ensayo. El contenido de humedad fue correlacionado con el valor de la succión por medio de curvas características definidas por Xie et al (1995) para suelos de características similares y ajustada con ensayos propios (ver Figura 3)

Para reproducir el comportamiento del suelo inalterado obtenido en ensayos

experimentales se calibraron los parámetros del modelo, que se detallan en [Tabla 2](#). Los resultados alcanzados se pueden ver en [Figura 4](#) donde se grafican los ensayos experimentales y la simulación numérica con el modelo a distintas succiones.

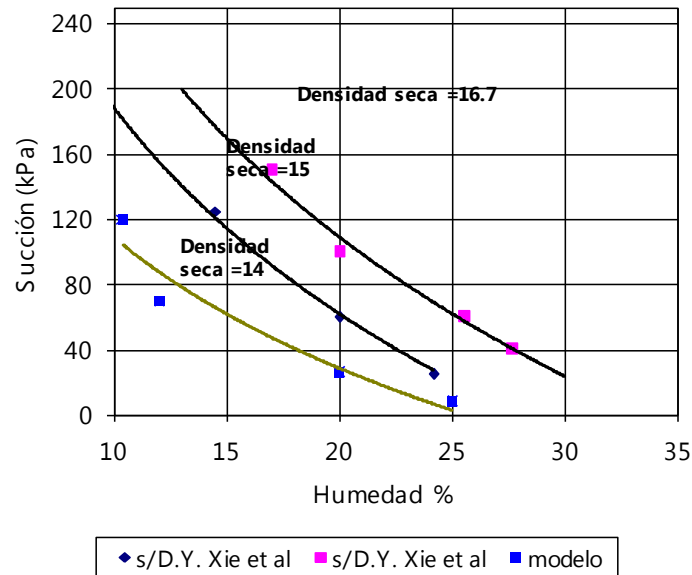


Figura 3: Relación entre la succión y el porcentaje de humedad

De igual manera se ha modelado el comportamiento del loess compactado con la energía correspondiente al 98% del ensayo de compactación normal (ensayo VN-E5-93.I) en condiciones de humedad óptima ($h_{op} = 17.2\%$) y $h = 28\%$ (ver [Figura 5](#)).

5 SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO

El modelo desarrollado se ha utilizado para reproducir y analizar el comportamiento de desagües ó cuneta lateral de una obra vial implantada en terreno de loess colapsables.

El proceso de filtración a través del suelo con la distribución de las presiones de poros equivalentes, el asentamiento y estado de tensiones verticales se realiza utilizando el análisis flujo-mecánico parcialmente acoplado descrito anteriormente. El esquema conceptual analizado, con las condiciones de borde impuestas se muestra en [Figura 6](#) y el perfil se compone de dos tipos de material, uno correspondiente al limo compactado (LC) y el segundo al limo existente inalterado (LE). Se considera, para todos los casos analizados una carga de agua de 0.45 m considerada máxima en el diseño y en el borde superior se aplicó una presión uniforme de $q = 30$ kPa en representación de la carga de tránsito lateral.

Parámetros	L E	S C
E (kPa)	3000	9200
ν	0.25	0.25
e	0.70	0.70
m	0.03871	0.03871
n	0.002	0.002
$\psi = \frac{\eta_{capa}}{\eta_{cono}}$	0.00	0.00
α	0.80	0.80
η_{cono}	1.64	1.87
k_1	0.05	0.05
k_2	0.9673	0.9673
c_{cono}	0.1337	0.1337
l	1.065	1.065
c_{capa}	0.0058	0.0058
r	1.102	1.102
P_o^*	10	320
r_{pc}	-0.10	-0.55
i	1.00	1.50
K(cm/seg)	1.5×10^{-5}	0.5×10^{-5}
c	0.10	0.12
γ_d (kN/m3)	13.7	14.8

Tabla 2: Constantes del modelo

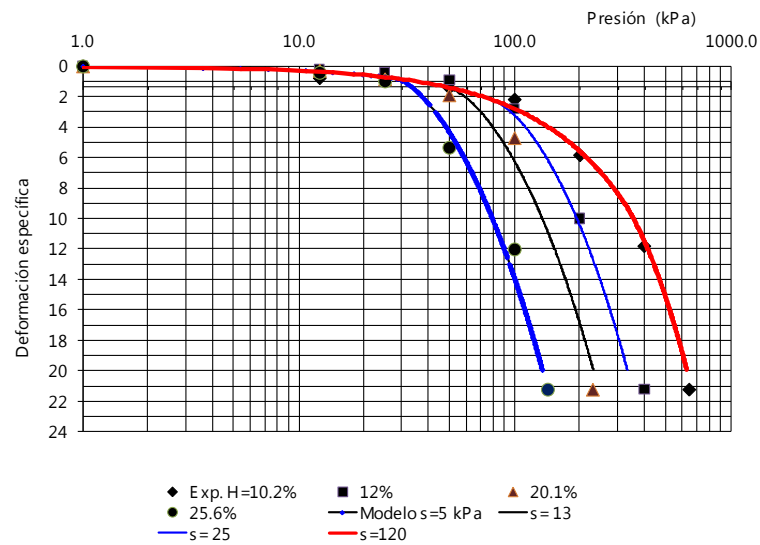


Figura 4: Compresión confinada, experimental y simulación limo inalterado

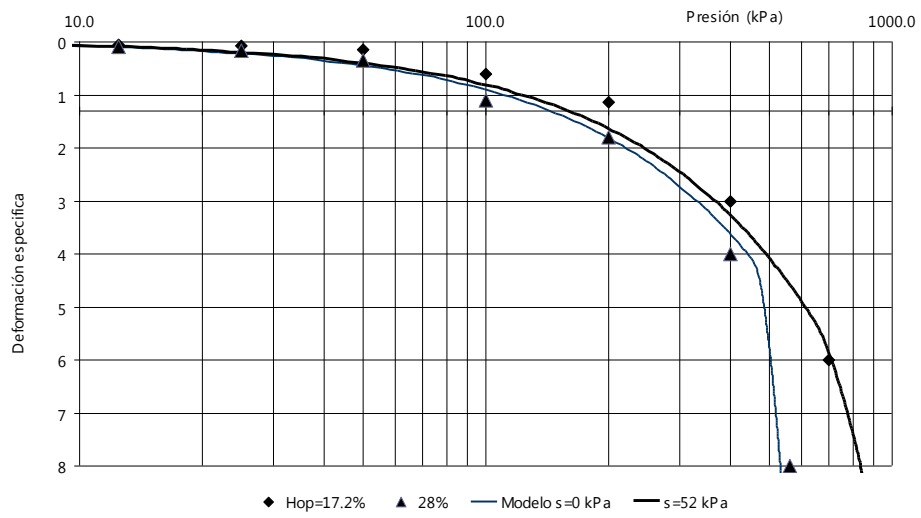


Figura 5: Compresión confinada, experimental y simulación de suelo compactado

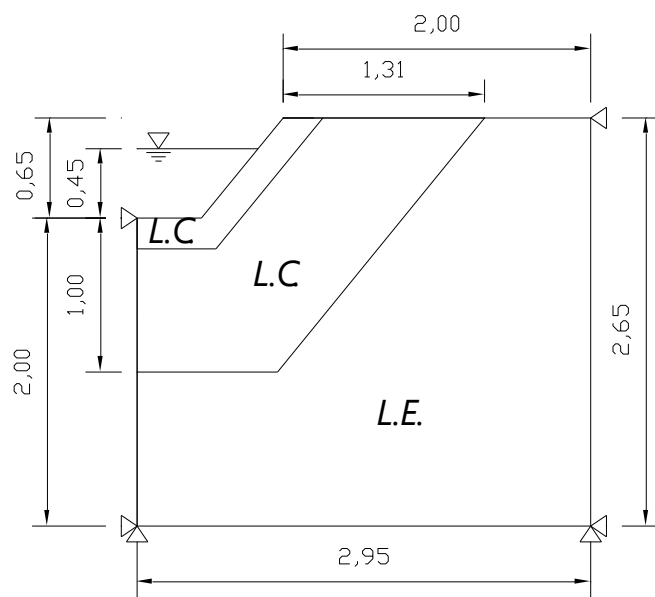


Figura 6: Estratos y dimensiones

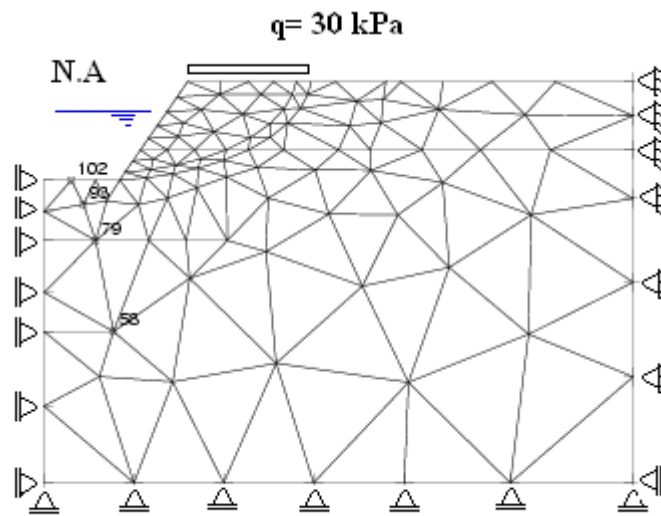


Figura 7: Malla de elementos finitos y condiciones de borde

5.1 Casos de estudio

Se consideraron cuatro casos de estudio, denominados escenarios, según el espesor del tratamiento con suelo compactado, para evaluar la respuesta en cada uno de ellos. El primero de ellos, escenario 1 (Esc. 1), corresponde al suelo en condición natural, es decir inalterado y los demás escenarios 2, 3 y 4, mediante tratamiento con suelo compactado al 98% del ensayo de compactación con espesor variable de 0.20 m, 0.40 m y 1.00 m, respectivamente. La condición de succión impuesta inicial se indica en la Figura 8 y la evolución al régimen estacionario, en estado final de succión, para el Esc. 1 y el Esc. 4, se muestran en Figura 9.

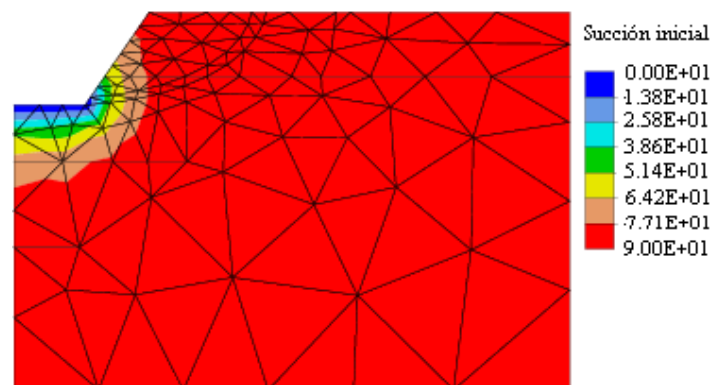


Figura 8: Condición inicial de succión

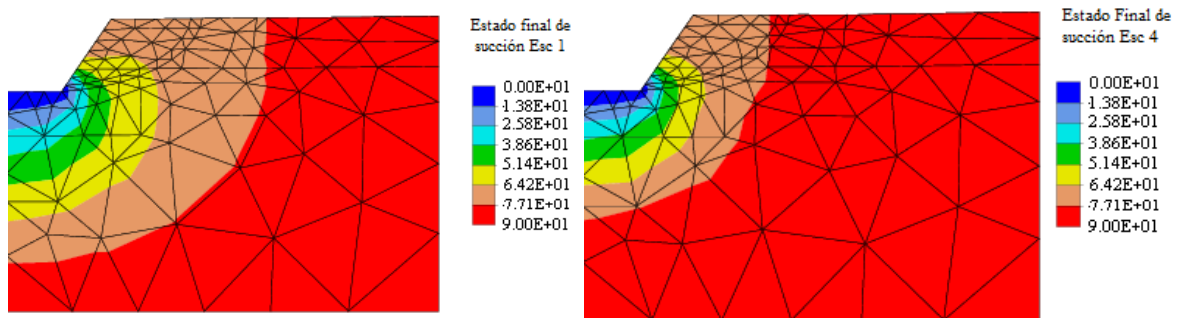


Figura 9: Estado final de succión Esc. 1 y Esc. 4

5.2 Resultados

Se determinaron los valores de las deformaciones del suelo resultante de los casos analizados en distintos puntos de interés de la modelación. En la [Figura 10](#) se indican las deformaciones verticales para el Esc. 1 y en la [Figura 11](#) se muestran los desplazamientos de los nodos 102 (fondo de cuneta) y el nodo 108 (borde superior de la misma) en función del tiempo expresado en días y para los escenarios 1 y 4. En la [Figura 12](#) se muestra la deformación del suelo en profundidad por debajo de la solera como desplazamientos de los nodos 102, 93, 79 y 58. Se observa la influencia que ejerce el espesor del tratamiento con suelo compactado.

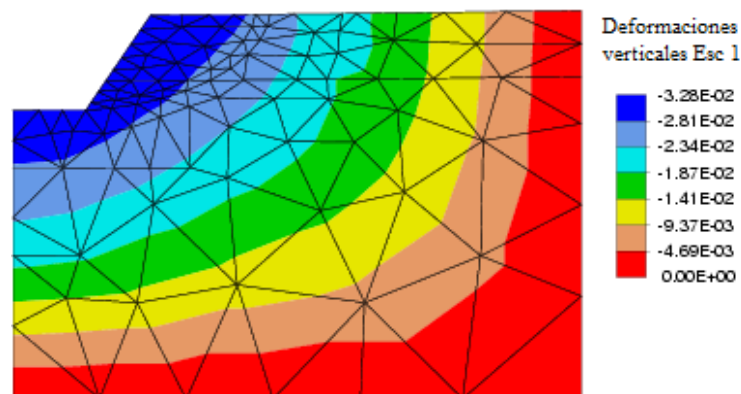


Figura 10: Deformaciones verticales en Esc. 1

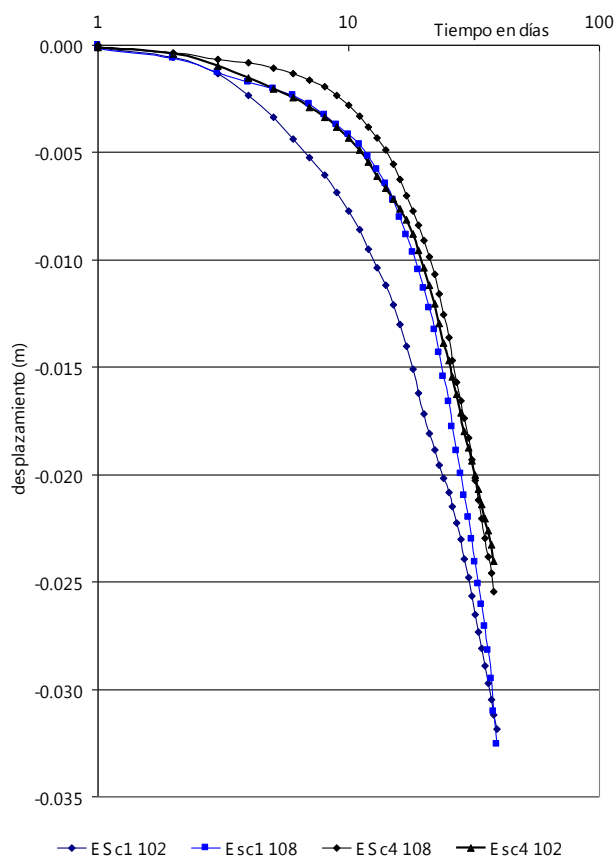


Figura 11: Desplazamientos en nodos 102 y 108

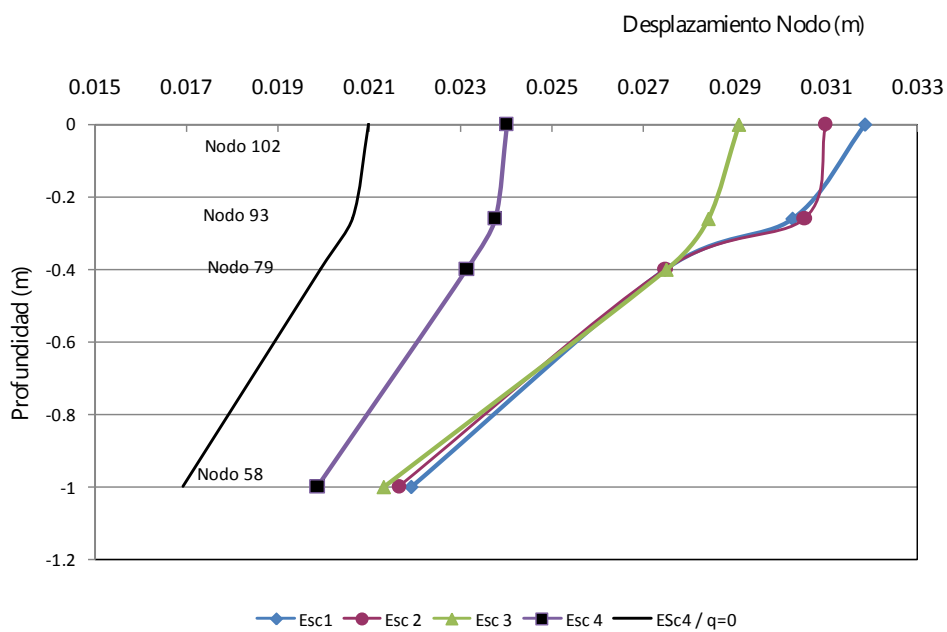


Figura 12: Desplazamientos en profundidad

6 CONCLUSIONES

Se ha presentado e implementado un modelo para simulación de flujo en suelos parcialmente saturados, con determinación de la infiltración y las deformaciones en un estrato de suelo de características loésicas. El modelo constitutivo elastoplástico empleado es el extendido de MRS-Lade para medios no saturados. Para reproducir la respuesta del limo inalterado y compactado se calibraron los parámetros comparando la respuesta con resultados experimentales en laboratorio. Las simulaciones numéricas llevadas a cabo permitieron obtener la evolución de la infiltración en el tiempo, con los valores de succión resultante y las deformaciones producidas en el suelo. El modelo permite el estudio del comportamiento de limos de características colapsables y el análisis de los espesores de tratamiento con suelo compactado para controlar la infiltración y reducir los asentamientos. También se determinó la influencia de la sobrecarga lateral debido a tránsito y la comparación de la deformación debida únicamente al peso propio del suelo y la carga de agua. De la simulación lograda se concluye que para lograr resultados significativos en el cambio de la respuesta, es decir limitar la infiltración y reducir a valores aceptables los asentamientos, se debe realizar un tratamiento de reemplazo del limo inalterado por limo compactado en un espesor no menor a un metro.

REFERENCIAS

- Gräsle W., Baumgardtl T., Horn R. y Richards B.G. Interaction between soil mechanical properties of structured soils and hydraulic process-Theoretical fundamentals of a model. *Unsaturated Soils*, 2, 719-724. Balkema, 1995.
- Richards, B.G., Modelling interactive load-deformation and flow processes in soils, including unsaturated and swelling soils. *Proceedings of the 6th Asut-NZ Conference on Geomechanics*, 18-37. New Zealand, 1992.
- Schrefler B. y Bolzon G. Compaction in gas reservoirs due to capillary effects. *Computational Plasticity, Section Plasticity approaches geotechnics*, CIMNE, 1625-1630, 1997.
- Schiava, R., Modelación y análisis computacional de suelos parcialmente saturados. Tesis Doctoral. UNT, 2009.
- Sheng D., Smith D., Sloan S. y Gens A. Finite Element Formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 27(9), 745-765, 2003.
- Taylor R.L. *A Finite Element Analisis Program-FEAP*, Theory Manual, University of California at Berkeley, 2000.
- Xie D.Y., Liu F.Y., Han X.L. y Wu L.Y. A new type of triaxial apparatus for unsaturated soils. *Unsaturated Soils*, 3, 1551-1558. Balkema, 1995.
- Zur, A., and Wiseman, G., A study of collapse phenomena of an undisturbed loess. *8 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2.2, 256-268, 1973.