

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Análisis numérico del proceso de infiltración-deformación en suelos parcialmente saturados reforzados con geosintéticos permeables usando un modelo acoplado

Juan C. GUZMAN<sup>a,1</sup>, Edwin F.GARCIA-ARISTIZABAL<sup>a</sup> y Carlos A. VEGA-POSADA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia

**Resumen.** El proceso de infiltración de agua influye directamente en la estabilidad de llenos, terraplenes y estructuras de suelo reforzado. Es por esto, que se requiere comprender el comportamiento hidro-mecánico de estas estructuras sujetas a variaciones en la humedad durante la infiltración. La presente investigación desarrolla un análisis numérico del proceso de infiltración en terraplenes reforzados con geosintéticos no tejidos bajo condiciones parcialmente saturadas. Se realiza la comparación de terraplenes con y sin refuerzo, en términos del grado de saturación y el desarrollo de deformaciones viscoplásticas durante el evento de lluvia. Los resultados obtenidos muestran la poca capacidad de drenaje que presenta el terraplén reforzado, debido a la inclusión del geotextil; observándose una acumulación de agua y, consecuentemente, una concentración de deformaciones justamente en la interfaz suelo-geotextil. Este resultado permite identificar el fenómeno de la barrera capilar entre estos dos materiales. Igualmente, se puede estimar las condiciones de estabilidad y servicio del terraplén durante el proceso de infiltración. Por lo tanto, en esta investigación se logró establecer la existencia, desarrollo y efectos de la barrera capilar, integrando la deformación del material y condiciones hidromecánicas existentes durante el proceso de infiltración. Con el propósito de aportar en el conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras de suelo reforzado bajo condiciones parcialmente saturadas sujetas a lluvia de infiltración. Los cuales, se podrían implementar en el diseño y construcción de muros mecánicamente estabilizados (*MSE Wall*).

**Palabras Clave.** Análisis numérico, barrera capilar, modelo acoplado, suelo parcialmente saturado, geosintético permeable.

## 1. Introducción

La estabilidad de las estructuras de suelo reforzado está gobernada principalmente por el flujo de agua durante el proceso de infiltración y la influencia de la succión generada entre el suelo y el material de refuerzo (usualmente geosintético) [1].

---

<sup>1</sup> Autor de correspondencia: Juan C. Guzmán, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Calle 70 # 52-21. A. A. 1226. Medellín, Colombia.; E-mail: juanc.guzman@udea.edu.co.

Varios autores han evaluado el comportamiento hidráulico y mecánico de terraplenes reforzados con geosintético bajo condiciones parcialmente saturadas [2-4]. Estos estudios evidencian la dificultad y oposición al flujo de agua a través del geotextil, concluyendo sobre la existencia y desarrollo de la barrera capilar en la interfaz suelo-geotextil. Cabe destacar, que el proceso de infiltración y posteriormente el análisis de estabilidad se realizan generalmente con software comerciales, entre los que se destacan GEO-SLOPE y PLAXIS 2D. Sin embargo, estos modelos determinan la estabilidad del terraplén a partir del análisis de equilibrio límite (factor de seguridad), sin contemplar la variación en el cambio de volumen y la influencia e interacción entre el proceso de infiltración y el desarrollo de deformaciones durante el evento de lluvia [5].

Por lo tanto, la presente investigación plantea evaluar la existencia, desarrollo y posibles efectos de la barrera capilar en terraplenes reforzados con geotextil no tejido permeable en condiciones parcialmente saturadas durante el proceso de infiltración, con el uso de un modelo bidimensional acoplado de infiltración-deformación.

El comportamiento hidromecánico de los terraplenes se realiza a partir de la distribución del grado de saturación y deformaciones viscoplásticas, con el fin de aportar en el análisis de los procesos de drenaje y estabilidad de suelos reforzados con geosintéticos permeables, empleados en la construcción de llenos para vías e infraestructura.

## 2. Modelo constitutivo

El modelo empleado es llamado COMVI (*Consolidation Multiphase Viscoplastic Analysis*), desarrollado por Oka [6] en la Universidad de Kyoto, Japón. El proceso de infiltración se simula bajo condiciones parcialmente saturadas basadas en la teoría de medios porosos [7]. A continuación, se presentan la formulación básica del modelo acoplado de infiltración-deformación utilizado para el análisis.

El tensor de esfuerzos  $\sigma_{ij}$  se obtiene como la suma de los esfuerzos parciales.

$$\sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + n^S P^F \delta_{ij} \quad (1)$$

donde  $P^W$  y  $P^G$  es la presión de poros del agua y del aire, respectivamente,  $n$  representa la porosidad,  $n^\alpha$  es la fracción volumétrica de la fase  $\alpha$  (Sólido, líquido, gas) y  $P^F$  es el promedio de las presiones según el grado de saturación ( $s$ ), calculado con la Ec. (2):

$$P^F = sP^W + (1 - s)P^G \quad (2)$$

Definiendo el esfuerzo efectivo generalizado empleado en el modelo bajo condiciones parcialmente saturadas.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (3)$$

### 2.1. Modelo elasto-viscoplástico para suelos parcialmente saturados

El efecto de la succión se introduce en el modelo a partir de la Ec. (4):

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \left[ 1 + S_I \exp\left\{-S_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\}\right] \tag{4}$$

donde  $\varepsilon_{kk}^{vp}$  es la deformación viscoplástica volumétrica,  $\lambda$  y  $\kappa$  son los coeficientes de compresión y expansión, respectivamente, y  $e_0$  es la relación de vacíos inicial.  $P_i^C$  es el valor de la succión inicial,  $P^C$  es el valor de succión actual,  $S_I$  es el parámetro del material que denota la relación entre la resistencia saturada y cuando la succión es  $P_i^C$ .  $S_d$  es el parámetro que controla el cambio de incremento o disminución de la resistencia.  $\sigma'_{ma}$  es el parámetro de ablandamiento usado para describir la degradación del material debido a cambios estructurales.

La superficie potencial viscoplástica está dada por:

$$f_y = n_{(0)}^* + M^* \ln\left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}\right) = 0 \tag{5}$$

donde  $M^*$  toma valor de  $\sqrt{n_{ij}^* n_{ij}^*} \sigma'_m$  en estado crítico,  $\sigma'_m$  es el esfuerzo efectivo medio,  $n_{ij}^* = S_{ij} / \sigma'_m$  es el tensor de esfuerzo desviador, y  $\sigma'_{mb}$  es el parámetro de endurecimiento del material, el cual controla el tamaño de la superficie de frontera.

Finalmente, el tensor de deformación volumétrica se define a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \langle \Phi(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \theta} \tag{6}$$

$$C_{ijkl} = A \delta_{kl} + B(\delta_{kl} \delta_{jl} + \delta_{ij} \delta_{jk}) \tag{7}$$

$$C_1 = 2B, C_2 = 3A + 2B \tag{8}$$

donde  $f_p$  es la superficie de potencial viscoplástico,  $\Phi$  denota una función del efecto de velocidad de carga, A and B son parámetros del material, los cuales tienen relación con la componente desviadora  $C_1$  y la componente volumétrica  $C_2$  de los parámetros viscoplásticos. Para más detalle sobre la formulación del modelo se recomienda al lector remitirse a [8].

### 3. Condiciones de análisis

El modelo COMVI emplea elementos finitos para simular y evaluar el comportamiento de los materiales (suelo-geotextil) durante el proceso de infiltración. La configuración geométrica está compuesta por elementos cuadriláteros de 8 nodos, los cuales son empleados para calcular desplazamientos mediante integración gaussiana. Cuatro de estos nodos se emplean para calcular presiones de poros de agua y aire en el centro de cada elemento.

La Figura 1 muestra la geometría, dimensiones y condiciones de frontera utilizadas en las estructuras de suelo reforzadas. Se realiza una densificación de la malla en la interfaz suelo-geotextil con el fin de obtener mayor detalle del comportamiento hidráulico y mecánico en la interacción de estos materiales. El flujo de aire se permite

en todas las fronteras, con una presión del aire inicial  $P^G$  igual a cero. En términos de las condiciones de frontera, en el fondo del terraplén se restringe el desplazamiento en ambas direcciones (vertical y horizontal), mientras que en las paredes laterales se limita el desplazamiento en dirección horizontal.

Para las condiciones de drenaje, en el fondo del terraplén se establece una restricción al flujo (frontera impermeable). La base y las paredes laterales se consideran fronteras permeables. Por otro lado, en la superficie del terraplén se ingresa el flujo de agua derivado de la lluvia establecida. La posición del nivel freático se ubica en la base del terraplén inicialmente. El ingreso de la lluvia es en la parte superior del terraplén. La intensidad de lluvia aplicada fue de 20 mm/h durante 4 horas de simulación, tanto para el terraplén con y sin refuerzo. Las condiciones establecidas anteriormente son similares a las descritas en [9].

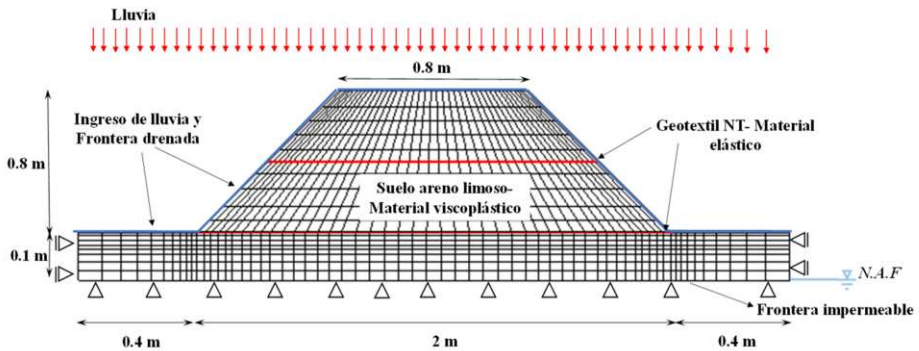


Figura 1. Condiciones de frontera y geometría del terraplén reforzado.

### 3.1. Caracterización de materiales

La estructura de suelo reforzado está conformado principalmente por un suelo areno limoso y un material de refuerzo. Para este último material, se utilizó un geotextil no tejido permeable. Se incluyeron dos capas de geotextil en la estructura de suelo, ubicadas a la altura de la base y en la mitad del cuerpo del terraplén aproximadamente.

El suelo se modela como un material viscoplastico, mientras que el geotextil se emplea como un material elástico. En las Tablas 1 y 2 se presentan las propiedades para ambos materiales. Para la curva de retención de agua se utiliza el modelo propuesto por Van Genuchten [10]. Los parámetros y valores seleccionados fueron a partir de la caracterización realizada en [9] y [11], respectivamente.

## 4. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra el avance del frente de saturación para el terraplén con y sin refuerzo (Geotextil no tejido) durante el proceso de infiltración. Inicialmente, se observa un incremento en el grado de saturación para ambas estructuras de suelo. Este incremento se presenta en el contorno del terraplén, siendo esta superficie la primera en interactuar con el agua, producto del evento de lluvia simulado ( $I=20$  mm/h).

A medida que el tiempo de lluvia avanza, el aumento en el grado de saturación se intensifica y en la base del terraplén se presentan valores cercanos a 1.0 en el intervalo

de tiempo  $t=3.0$  y  $4.0$  horas. Es decir, en la base se genera un estado de saturación completo, lo cual puede representar el ascenso del nivel freático ubicado inicialmente en la parte inferior del terraplén. No obstante, la distribución y el flujo de agua en el terraplén reforzado difieren con el terraplén sin refuerzo, al observarse un cambio del flujo en el interior del terraplén, justamente en la interfaz suelo-geotextil.

**Tabla 1.** Parámetros viscoplástico del suelo.

Parámetro del material	Símbolo	Valor
Parámetro viscoplástico	$m'$	23
Parámetro viscoplástico (1/s)	$C_1$	$1 \times 10^{-8}$
Parámetro viscoplástico (1/s)	$C_2$	$1 \times 10^{-8}$
Relación de esfuerzos en estado crítico	$M^*_m$	0.947
Parámetro del método de la línea tangente rígida	$\theta$	0.50
Índice de compresión	$\lambda$	0.136
Índice de expansión	$\kappa$	0.0175
Módulo elástico inicial de corte (kPa)	$G_0$	20000
Relación de vacíos inicial	$e_0$	0.5983
Parámetro estructural	$\beta$	0.0
Parámetro estructural	$\sigma'_{mat}/\sigma'_{mai}$	1
Permeabilidad saturada vertical (m/s)	$k^W_{sv}$	$1.83 \times 10^{-5}$
Permeabilidad saturada horizontal (m/s)	$k^W_{sh}$	$1.83 \times 10^{-5}$
Permeabilidad del gas en condiciones secas (m/s)	$k^G_s$	$1.00 \times 10^{-3}$
Parámetro de Van Genuchten (1/kPa)	$\alpha$	2.0
Parámetro de Van Genuchten	$n'$	1.2
Parámetro de succión	$S_I$	0.2
Parámetro de succión	$S_d$	0.25
Saturación máxima	$S_{max}$	0.99
Saturación mínima	$S_{min}$	0.0
Parámetro de coeficiente de permeabilidad	$a$	3.0
Parámetro de coeficiente de permeabilidad	$b$	2.3

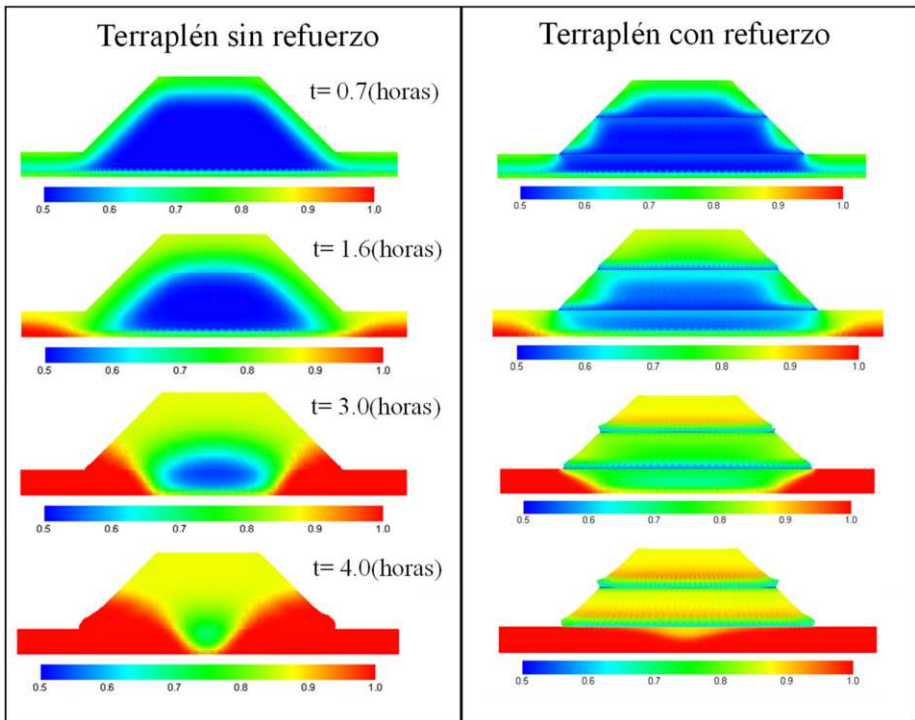
**Tabla 2.** Parámetros elásticos del geotextil no tejido (NT).

Parámetro del material	Símbolo	Valor
Masa por unidad de área ( $g/m^2$ )	$u_A$	400
Espesor (mm)	$t_{GTX}$	4
Porosidad	$n_{GTX}$	0.89
Relación de vacíos inicial	$e_{0G}$	8.10
Permeabilidad saturada vertical (m/s)	$k^W_{sv}$	$3.5 \times 10^{-3}$
Permeabilidad saturada horizontal (m/s)	$k^W_{sh}$	$2.3 \times 10^{-2}$
Módulo de Elasticidad lineal (kPa)	$E$	20000
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.3
Parámetro de Van Genuchten (1/kPa)	$\alpha$	9.20
Parámetro de Van Genuchten	$n'$	3.20
Saturación máxima	$S_{max}$	0.82
Saturación mínima	$S_{min}$	0.01
Parámetro de coeficiente de permeabilidad	$a$	3.0
Parámetro de coeficiente de permeabilidad	$b$	2.3

La diferencia en el proceso de infiltración debido a la inclusión del geotextil es notoria en los tiempo finales ( $t=3.0$  y  $4.0h$ ). Para el caso del terraplén reforzado; se desarrollan grados de saturación cercanos a 0.9 en el suelo por encima de la capa de geotextil, que a su vez superan los valores presentados por debajo del mismo, siendo estos los niveles de saturación ( $S=0.7-0.8$ ) más bajos en la estructura de suelo en  $t=3.0$ . Dicho comportamiento es contraste con el exhibido por el terraplén sin refuerzo, en el

cual se observa una transición e incremento en el grado de saturación de manera progresiva y continua en toda la estructura de suelo durante el proceso de infiltración. Generando así, un estado de saturación uniforme en la base y posteriormente, en el cuerpo del terraplén.

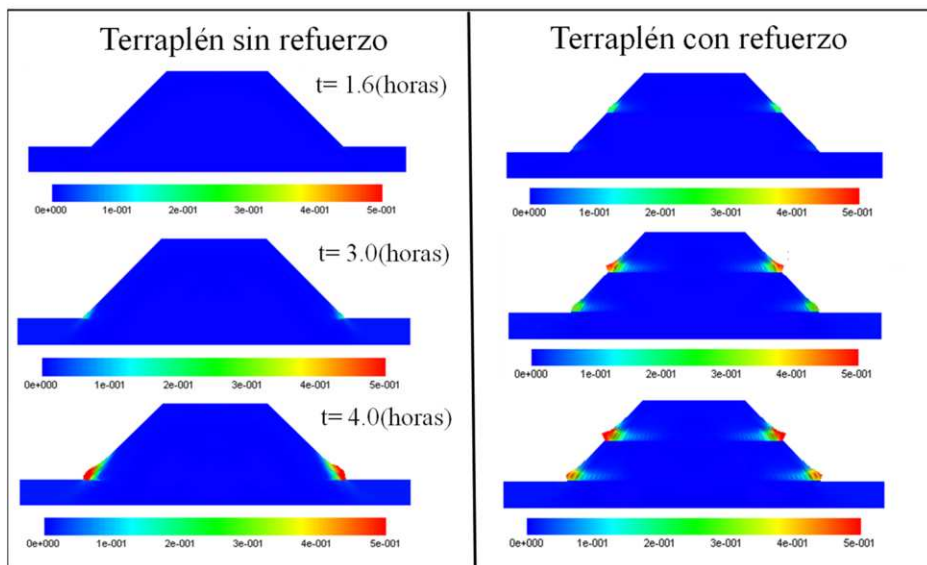
Por lo tanto, la inclusión del geotextil impide el flujo de agua a través del mismo, lo cual genera una acumulación de agua y por consiguiente, un aumento en el grado de saturación por encima de él. Por esta razón, se infiere la poca capacidad del geotextil como material drenante bajo condiciones parcialmente saturadas. Este resultado es acorde al presentado por [12] y [13], en los cuales se determina de forma experimental y numérica el efecto hidráulico impuesto por el geotextil, aludiendo dicho comportamiento al fenómeno de la barrera capilar existente en la interacción de materiales con distintos niveles de succión y conductividades hidráulicas. En este caso se manifiesta por la interacción entre suelo arena limoso y el geotextil no tejido.



**Figura 2.** Distribución del grado de saturación para el terraplén con y sin refuerzo sujetos al proceso de infiltración durante 4 horas con intensidad de lluvia constante.

De igual manera, la Figura 3 muestra el desarrollo de las deformaciones viscoplásticas generadas durante el proceso de infiltración. A partir de esta Figura, se puede describir el efecto producido por el geotextil en términos del comportamiento mecánico del terraplén, al evidenciar una concentración de deformaciones en la interfaz suelo-geotextil como consecuencia de la acumulación de agua descrita anteriormente. En esta zona se alcanzan valores de deformaciones acumuladas entre 2.5% y 4% en los tiempos  $t=1.6$  h y  $t=3.0$  h, respectivamente. A diferencia del terraplén sin refuerzo, en el cual se determinan deformaciones menores al 1%, ubicadas principalmente en la pata del terraplén.

Finalmente, después de 4 horas de lluvia se observa una concentración de deformaciones en la pata del terraplén para ambos casos, debido a los niveles de saturación cercanos a 1.0 en la base del terraplén y, posteriormente, el posible ascenso del nivel freático. Sin embargo, en el terraplén reforzado se alcanza niveles críticos de deformaciones cercanos al 5% en la interfaz suelo-geotextil, lo cual puede inducir superficies de falla, afectando la estabilidad local del terraplén.



**Figura 3.** Comparación de la distribución de la deformación volumétrica viscoplástica para el terraplén con y sin refuerzo sujetos al proceso de infiltración.

## 5. Conclusiones

Mediante el modelo acoplado de infiltración-deformación llamado COMVI, se evaluó el comportamiento hidro-mecánico de las estructuras reforzadas con geotextil no tejido durante el proceso de infiltración en condiciones parcialmente saturadas.

A partir de los resultados obtenidos con la variación temporal del grado de saturación, se identifica la diferencia en el proceso de infiltración para el terraplén con y sin refuerzo, resaltando los altos niveles de saturación que se presentan en la interfaz suelo-geotextil. Por lo tanto, se puede establecer que la efectividad del geotextil como material drenante depende del estado de saturación existente, reduciendo de manera notoria el flujo de agua a través de este material bajo condiciones parcialmente saturadas.

Mediante los resultados de deformación viscoplástica, es posible establecer el mecanismo de falla inducido por el fenómeno de la barrera capilar. Se observa una concentración de deformaciones en la interfaz suelo-geotextil como efecto de la retención de agua en dicha zona. Este resultado sugiere evaluar el comportamiento y la interacción entre el suelo y el geotextil, acoplando el desarrollo de las presiones de poros y las deformaciones generadas durante el proceso de infiltración.

Este análisis permite determinar las condiciones de servicio de la estructura durante el proceso de infiltración. De igual manera, poder evaluar la estabilidad del terraplén y

el efecto de la barrera capilar integrando distintas condiciones hidromecánicas y comportamientos viscoplásticos de los materiales comúnmente empleados en las estructuras de suelo reforzado sujetos al proceso de infiltración. Por lo tanto, la presente investigación pretende aportar en el conocimiento sobre el comportamiento hidromecánico de las estructuras de suelo reforzadas bajo condiciones parcialmente. Una aplicación directa, podría ser en muros mecánicamente estabilizados (*MSE Wall*), los cuales se han posicionado como una alternativa en la infraestructura vial, debido a su desempeño mecánico y rentabilidad en comparación con estructuras de concreto reforzado [14].

Finalmente, se resalta la capacidad del modelo acoplado en representar y caracterizar las condiciones hidromecánicas, cambios volumétricos e interacción de varios materiales sujetos a lluvia de infiltración en condiciones parcialmente saturadas. Por ende, el modelo se podría emplear para evaluar la influencia de las propiedades hidráulicas en la existencia y desarrollo de la barrera capilar, teniendo en cuenta la anisotropía de los materiales, evaluando el efecto de dichas propiedades en distintas direcciones y la estabilidad de las estructuras de suelo bajo distintos escenarios y materiales empleados.

## Referencias

- [1] F. H. M. Portelinha and J. G. Zornberg, Development of capillary barriers during water infiltration in a geotextile-reinforced soil wall, in 10th International conference of geosynthetics, Berlin, Germany, (2014), 1–7.
- [2] A. Jana and A. Dey, Effectiveness of Geotextile in Reinforced Soil Walls Backfilled With Fine Soil, in 6th Asian Regional Conference in Geosynthetics - Geosynthetics for Infrastructure Development, New Delhi, India, (2016), no. November, 8–11.
- [3] J. N. Thuo, K. H. Yang, and C. C. Huang, Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers, *Geosynthetics International*, vol. 22, (6), (2015), 457–474.
- [4] A. Chinkulkijniwat, S. Horpibulsuk, D. Bui Van, A. Udomchai, R. Goodary, and A. Arulrajah, Influential factors affecting drainage design considerations for mechanical stabilised earth walls using geocomposites, *Geosynthetics International*, vol. 24, (3), (2016), 224–241.
- [5] Y. Kim, S. Jeong, and J. Kim, Coupled infiltration model of unsaturated porous media for steady rainfall, *Soils and Foundations*, vol. 56, (6), (2016), 1071–1081.
- [6] F. Oka, T. Kodaka, S. Kimoto, Y.-S. Kim, and N. Yamasaki, An elasto-viscoplastic model and multiphase coupled FE analysis for unsaturated soil, in Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication, ASCE, Carefree, Arizona, vol. 147, (2), (2006), 2039–2050.
- [7] M. A. Biot, Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *Journal of applied physics*, vol. 33, (4), (1962), 1482–1498.
- [8] E. García, F. Oka, and S. Kimoto, Numerical analysis of a one-dimensional infiltration problem in unsaturated soil by a seepage–deformation coupled method, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 35, (5), (2011), 544–568.
- [9] S. Kimoto, F. Oka, and E. García, Numerical simulation of the rainfall infiltration on unsaturated soil slope considering a seepage flow, *Geotechnical Engineering*, vol. 44, (3), (2013), 1–13.
- [10] M. T. Van Genuchten, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, vol. 44, (5), (1980), 892–898.
- [11] C. P. K. Gallage, T. Uchimura, and E. F. García, Function of permeable geosynthetics in unsaturated embankments subjected to rainfall infiltration, *Geosynthetics International*, vol. 14, (2), (2007), 89–99.
- [12] J. G. Zornberg, M. M. Azevedo, and C. B. Pickles, Evaluation of the Development of Capillary Barriers at the Interface between Fine-Grained Soils and Nonwoven Geotextiles, *Geotechnical Special Publication*, vol. 2016–January, (275) GSP, (2016), 15–17.
- [13] T. Iryo and R. K. Rowe, Infiltration into an embankment reinforced by nonwoven geotextiles, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, (4), (2005), 1145–1159.
- [14] C. N. Khoury, G. A. Miller, and K. Hatami, Unsaturated soil-geotextile interface behavior, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 29, (1), (2011), 17–28.