

Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua

Numerical analysis of water infiltration in an unsaturated residual soil by using the water retention curve

Erasmus G. Carnero Carnero^{1*}, Gonzalo G. Carnero Guzmán²

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

² Monash University, Australia

* Autor para correspondencia, e-mail: ecarnero53@yahoo.es

ARTÍCULO ORIGINAL

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 23-07-2018

Artículo aceptado: 28-09-2018

On line: 29-10-2018

PALABRAS CLAVES:

Suelo no saturado,
curva de retención de agua,
succión,
infiltración en suelos,
elementos finitos.

ORIGINAL ARTICLE

INFORMATION OF ARTICLE

Artículo recibido: 23-07-2018

Artículo aceptado: 28-09-2018

On line: 29-10-2018

KEYWORDS:

Unsaturated soil,
soil water retention curve,
suction,
water infiltration in soils,
finite elements.

RESUMEN

El análisis de infiltración de agua en suelos es indispensable para comprender como la variación de humedad del suelo ocurre en situaciones reales y cuál es su influencia en sus propiedades ingenieriles. Sin embargo, dicho análisis requiere los parámetros no saturados del suelo para el cálculo. Estos parámetros, tales como la conductividad hidráulica no saturada, son estimados utilizando la curva de retención de agua del suelo (SWRC, por sus siglas en inglés). La SWRC gobierna el proceso de hidratación y deshidratación en el suelo. El presente trabajo, estudia la infiltración de agua de un suelo residual de Brasil para dos condiciones iniciales no saturadas. El análisis fue ejecutado mediante un software de elementos finitos usando la SWRC del suelo que fue obtenida experimentalmente. Los resultados muestran que el tiempo requerido para alcanzar la saturación depende del grado de saturación inicial del suelo y la calidad de los datos experimentales en la obtención de la SWRC.

ABSTRACT

The water infiltration analysis in soils is indispensable in order to understand how the moisture variations in the soil occurs in real situations as well as its influence in the engineering properties. However, such analysis requires the unsaturated soil parameters for the computations. These parameters, such as the unsaturated hydraulic conductivity can be estimated by using the soil water retention curve (SWRC). The SWRC governs the hydration and dehydration process in soils. The current research, studies the water infiltrations in a residual soil from Brazil under two unsaturated initial conditions. The analysis was performed by using a finite elements software employing the SWRC of the soil obtained experimentally. The results show that the saturation time is in function of the initial saturation of the soil and the quality of experimental data in the SWRC.

INTRODUCCIÓN

Los macizos terrosos en regiones tropicales con climas áridos y semiáridos (mayor parte del mundo) se hallan en un estado conocido como “no saturado”. El estado no saturado significa que el suelo, además de tener partículas sólidas y agua, también tiene aire entre sus poros (Fredlund y Rahardjo, 2012). En el suelo no saturado, los fluidos (agua y aire) en los poros afectan a los fenómenos relacionados con el comportamiento mecánico, variación volumétrica y el comportamiento hidráulico (Karup et al. 2017).

El estudio de estos suelos es llevado a cabo por la mecánica de suelos no saturados. Su importancia en la ingeniería moderna no se da solo por el hecho de que la mayor parte de los suelos en el mundo son no saturados, sino también porque permite entender los fenómenos que no son desconsiderados por la mecánica de suelos clásica. Particularmente, ciertos problemas de la ingeniería geotécnica requieren ser analizados considerando los principios de la mecánica de suelos no saturados los cuales son: infiltración de agua en suelos, análisis de estabilidad de taludes naturales considerando condiciones climáticas, reptación de laderas, diseño de estructuras de contención con filtros, problemas de suelos colapsibles, desecación de suelos, suelos compactados, suelos expansivos, flujo de agua subterránea, transporte de contaminantes en el suelo, transporte de gas en suelos, interacción suelo-geotextiles, entre otros. Sin embargo, el estudio experimental del suelo no saturado impone grandes desafíos dependiendo del tipo de estudio deseado (permeabilidad, consolidación, resistencia al corte, etc.). Estos estudios requieren primero definir las propiedades de retención de líquidos del suelo como un medio poroso lo cual se encuentra expresado en la curva de retención de agua del suelo (SWRC, por sus siglas en inglés). El presente trabajo muestra la aplicabilidad de la SWRC en el análisis de la infiltración de agua en suelos. Primero, se mostrará los conceptos teóricos por detrás de la SWRC. Segundo, se utilizará la SWRC de un suelo residual

obtenida por Carnero (2014) en el análisis numérico de infiltración de agua para dos condiciones iniciales de no saturación diferentes.

1.1. Succión

La succión en suelos es el estado de energía (o potencial) de la presión de agua en suelos. La determinación de la succión es básica para determinar el estado de tensiones, conductividad hidráulica y transferencia de agua en suelos no saturados. La succión puede ser expresada de dos maneras: como la suma negativa de potenciales (Lu y Likos, 2004) o como la suma positiva de los componentes de energía libre en el suelo (Fredlund et al. 2012). La succión, también llamada de succión total (ψ), está compuesta de dos partes: succión matricial y succión osmótica. La primera está relacionada al tipo de partícula y el ordenamiento estructural del suelo mientras que la segunda ocurre debido a la presencia de sales y otras sustancias disueltas en el agua del suelo (Marinho, 1994). En los estudios relacionados al comportamiento mecánico e hidráulico del suelo se analiza principalmente la succión matricial, y termina siendo llamada únicamente de succión (Carnero y Carnero, 2015).

1.2. Curva de retención de agua del suelo

La succión experimentada por el suelo está íntimamente ligada al contenido de humedad del mismo, y esta dependencia entre las variables se representa en la curva de retención del agua del suelo, SWRC. Gráficamente, se representa a través de la succión matricial y el contenido de humedad en términos gravimétricos, volumétricos o en grado de saturación. La determinación de la curva de retención se realiza a partir de trayectorias típicas obtenidas por procedimientos de secado o humedecimiento de muestras de suelo (Georgetti, 2010). En el proceso de secado, la muestra es previamente saturada y sometida a succiones crecientes, produciendo una reducción en la humedad del suelo. En el proceso de humedecimiento, la muestra seca es sometida a succiones decrecientes, lo cual incrementa el contenido de humedad. Cuando se comparan curvas de retención de ambos procedimientos de un mismo

suelo, la curva de secado tiene valores de humedades más elevados que la curva de humedecimiento para un mismo nivel de succión debido a histéresis producido por la no uniformidad de los poros, el efecto de la variación del ángulo de mojado en los procesos de secado y humedecido, y el aprisionamiento de aire en los vacíos (Hillel, 1971). La Figura 1 muestra cualitativamente la SWRC y la histéresis, siendo que:

- θ_s es el contenido de humedad volumétrica en la condición saturada para la curva de secado.
- ψ_b es la presión de entrada de aire, que corresponde a la succión en la cual el aire comienza a entrar en los poros mayores del suelo.
- θ_r es el contenido de humedad volumétrica residual en el cual es necesario gran incremento en la succión para remover el agua remanente en los poros.
- θ'_s es el contenido de humedad volumétrica en la condición saturada para la curva de humedecimiento. El contenido de aire residual es la diferencia entre θ_s y θ'_s .

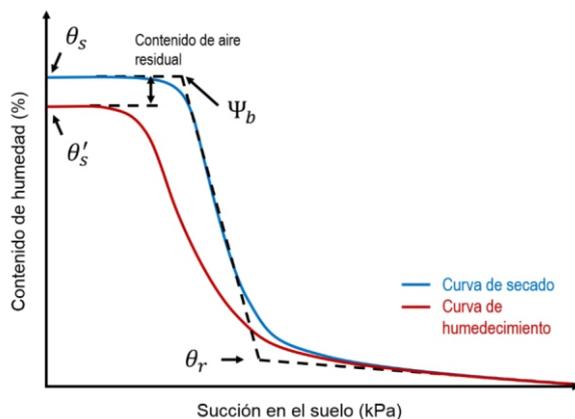


Figura 1 – Esquema de una curva de retención de agua de un suelo.

Para simplificar el uso de la SWRC en la previsión de propiedades del suelo, algunos investigadores crearon ecuaciones que definen las partes más importantes de la misma. Sysuev et al. (2013) reúnen las ecuaciones más conocidas, donde los autores consideran que la ecuación propuesta por Fredlund y Xing (1994) es la que mejor representa las propiedades de la SWRC seguida por la curva propuesta por van Genutchen (1980) comúnmente utilizada en modelos numéricos.

1.3. Obtención de la SWRC en laboratorio

(Vilar, 2006) resume las diversas técnicas experimentales creadas por diferentes autores para la obtención de la SWRC y las separa en métodos directos e indirectos. Como métodos directos se tiene la placa de succión, placa de presión, el tensiómetro de alta capacidad, entre otros (Hilf, 1956; Ridley y Burland, 1993; Libardi, 1995; Carnero, 2014, entre otros). Como métodos indirectos se tiene la técnica del papel filtro, la técnica osmótica la técnica de las sales, entre otros (Chandler y Gutierrez, 1986; Marinho, 1994; Sun et al., 2014; Marinho et al. 2016, entre otros).

1.4. Modelamiento en 1D de infiltración en suelos no saturados utilizando elementos finitos

El fenómeno de infiltración en suelos no saturados es un problema de gran interés para las áreas de estudio de hidrología, ciencias del suelo, agricultura e ingeniería geotécnica (Fredlund y Rahardjo, 2012). Para obtener un modelamiento numérico que represente escenarios reales, se debe tener especial cuidado con las condiciones de frontera y las propiedades del material (Fredlund y Houston, 2009). Las condiciones de frontera definen si el suelo se encuentra seco, no saturado, o saturado, y cuáles son las condiciones del ambiente que producen el movimiento de agua (temperatura, lluvia, humedad relativa, etc.). Las propiedades del material más importantes a ser consideradas son la conductividad hidráulica saturada del material y la SWRC (entre otros, dependiendo de la complejidad del análisis). Combinando ambos parámetros, los programas computacionales estiman la conductividad hidráulica no saturada del material mediante modelos números propuestos por diversos autores (Mualem, 1976; van Genutchen, 1980; Durner, 1994; Fredlund et al, 1994). Los resultados numéricos obtenidos por programas computacionales pueden ser comparados con métodos analíticos tales como el propuesto por Warrick et al. (1985), el cual fue creado para análisis 1D y continúa siendo utilizado con éxito en la actualidad. La infiltración es uno de los ejemplos más simples en los cuales la SWRC puede ser utilizada.

Casos más complejos pueden ser representados incrementando las condiciones de frontera tales como humedad relativa, temperatura, entre otros.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del suelo empleado en las investigaciones

El suelo empleado en el presente estudio fue estudiado por Carnero (2014). El suelo fue obtenido del campus experimental de la Universidade de Sao Paulo, Brasil y ha servido para diversas investigaciones (e.g. Marinho et al. 2016). El lugar para retirar el suelo fue un talud de suelo residual de gneis con una composición principalmente de arena limosa micácea con núcleos de caolín derivados de feldespato y pequeñas venas de cuarzo (Carnero y Carnero, 2014). Fueron ejecutados los ensayos de caracterización del suelo, como son: masa específica, límite de liquidez, límite de plasticidad y análisis granulométrico. Juntamente con estos, se realizó los ensayos de compactación con Proctor Estándar. La Tabla 1 presenta las características del suelo y la Figura 2 presenta la curva de compactación. El punto de estudio para la obtención de la SWRC se ubica en la humedad óptima, y es llamado de punto "O" para la presente investigación (de acuerdo a la Figura 2). Todos los cuerpos de prueba utilizados para la SWRC fueron hechos para alcanzar la densidad seca y humedad del punto "O" de la Figura 2.

Tabla 1 - Caracterización del suelo empleado por Carnero (2014) y parámetros de compactación obtenidos.

SUCS	ρ (g/cm ³)	LL (%)	IP (%)	W_{opt} (%)	$\gamma_{seca\ max}$ (g/cm ³)
ML	2.71	48	19	21.5	1.635

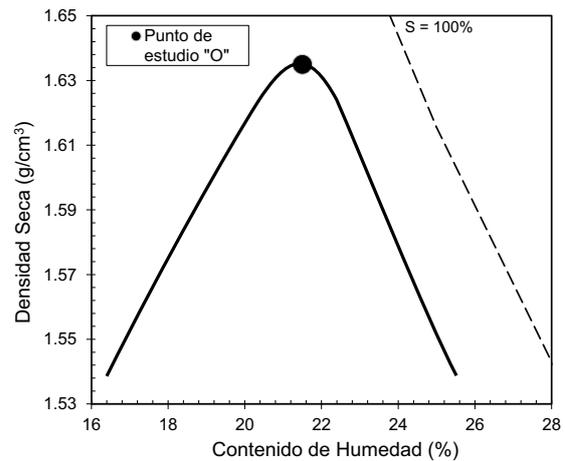


Figura 2 - Curva de compactación del suelo estudiado y punto de estudio para la obtención de la SWRC.

2.2 Obtención de la SWRC en laboratorio

Carnero (2014) utilizó tres técnicas para obtener la SWRC del suelo estudiado, las cuales son: placa de succión, placa de presión y el papel filtro. La placa de succión fue utilizada para la obtención de puntos experimentales para valores de succión entre 0 y 30 kPa. La placa de presión fue usada para succiones de 30 hasta 1500 kPa. Finalmente, el papel filtro fue usado para succiones de 1500 hasta 20000 kPa. Mayores detalles sobre las técnicas pueden ser encontrados en Carnero (2014).

La preparación de las muestras consistió en compactar dos muestras con las propiedades del punto "O" en la curva de compactación. Las muestras fueron compactadas estáticamente, con una altura y un diámetro de 2 y 3.8 cm respectivamente. Las características físicas de las muestras se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Características físicas de las muestras (modificado de Carnero, 2014).

Muestra	w (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Índice de vacíos (adm)	Saturación (%)	θ_v (%)
RO1	22.2	1.620	0.67	89.6	36.0
RO2	22.4	1.619	0.67	90.2	36.3

Posterior a la preparación de las muestras, estas fueron colocadas en la placa de succión. El proceso de saturación utilizando la placa de succión llevó una semana para ser finalizado. Al final de este procedimiento, las muestras expandieron un 14% del

volumen inicial. A continuación, la fase de desaturación fue iniciada. Se aplicaron niveles de succión en la siguiente secuencia: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25 y 30 kPa respectivamente. Después de alcanzar la succión de 30kPa, las muestras fueron colocadas en la placa de presión. Se aplicaron niveles de succión en la siguiente secuencia: 30, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 kPa respectivamente. Las presiones fueron aplicadas en función a la presión de aire impuesta en el interior de la cámara.

Posteriormente, se utilizó la técnica de papel filtro para mayores succiones. La técnica se ejecuta colocando dos papeles filtro en contacto directo con las muestras, en la parte superior e inferior respectivamente. Se utiliza una pinza para este procedimiento para evitar modificar las características originales del papel. Las muestras son luego envueltas en papel plástico y papel aluminio y son dejadas en reposo dentro de una caja de tecnopor por un periodo definido, a lo largo del cual, la humedad del cuerpo de prueba y del papel entraran en equilibrio. Este procedimiento garantiza que el flujo de agua ocurra solo entre ambos materiales y no haya evaporación. El tiempo mínimo para alcanzar el equilibrio es presentado por Marinho (1997) y Marinho et al. (2016). Subsiguientemente, se utiliza la curva de calibración de Chandler et al. (1992) para estimar la succión en función a la humedad de cada papel filtro.

RESULTADOS

La Figura 3 presenta las SWRC obtenidas de cada muestra. Se observa una gran semejanza entre ambas curvas, lo que evidencia que ambas muestras poseen condiciones iniciales similares. El grado de saturación alcanzado en la condición saturada es 93%, el grado de saturación residual está en torno a 5%, lo que representa el agua higroscópica del suelo. El agua higroscópica es la cantidad de agua dentro de las partículas arcillosas del suelo. Esta agua permanece en el suelo dentro de condiciones normales incluso para succiones mayores a 1 millón

de kPa y solo puede ser secada si la muestra es puesta en un horno. La entrada de aire de las curvas fue calculada usando el método gráfico aplicado por Oliveira (2004) el cual se basa en intersectar una línea horizontal trazada en la parte superior de la curva con una línea tangente que pasa por el punto de inflexión de la misma. El valor obtenido para ambas curvas es de 150 kPa, el cual es típico de suelos limosos de la zona (Stuermer, 1998; Oliveira, 2004, Marinho et al. 2016, entre otros). Por lo tanto, el suelo estudiado puede retener su condición de saturación hasta 150 kPa, si la succión es mayor a este valor, comenzará el proceso de desaturación hasta alcanzar el grado de saturación residual.

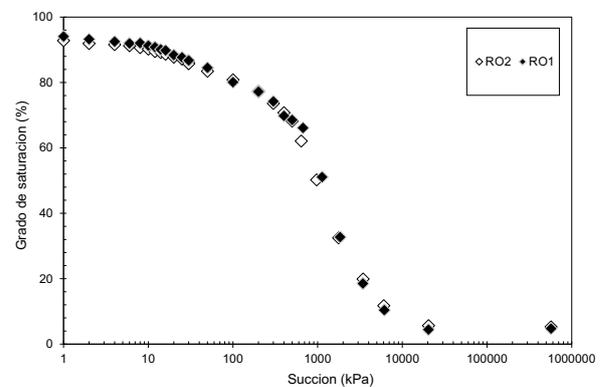


Figura 3 – Puntos experimentales obtenidos de las muestras RO1 y RO2, en grado de saturación versus succión (Modificado de Carnero, 2014).

La Figura 4 muestra las variaciones volumétricas (índice de vacíos) en función a los contenidos de humedad y del grado de saturación de las muestras. Se puede observar, que antes de la fase de saturación de las muestras el índice de vacíos es menor, lo cual indica que la saturación produjo un hinchamiento en los cuerpos de prueba. La expansión debido a la saturación es de 14% del volumen inicial de las muestras. El índice de vacíos inicial estuvo por debajo de los valores alcanzados durante el secado de las muestras, lo que indica que el suelo residual estudiado, después de ser saturado, no retoma sus características iniciales. Este detalle es importante si se considera utilizar el suelo para obras de ingeniería, pues indica que si el suelo llega a la saturación ocurrirá expansión, lo que puede inestabilizar la obra ejecutada.

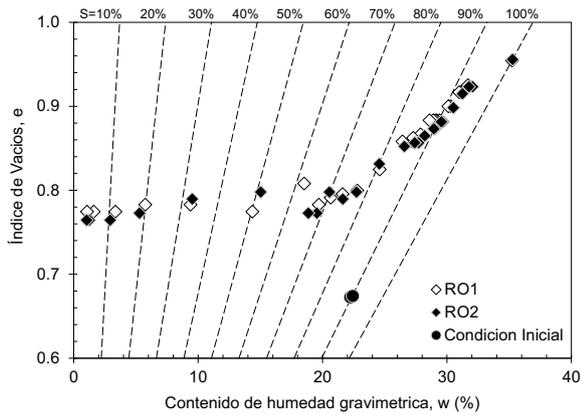


Figura 4 – Variación del índice de vacíos en función al contenido de humedad gravimétrica (%) y del grado de saturación (%) (Modificado de Carnero, 2014).

DISCUSIÓN

4.1. Aplicación de la ecuación de ajuste de van Genuchten (1980)

Como fue mencionado anteriormente, la ecuación de ajuste de van Genuchten (1980) es de las más usadas en la actualidad y provee un ajuste bueno para datos experimentales. Las curvas obtenidas fueron ajustadas usando el software RETC 6.02 desarrollado por PC-Progress (licencia gratuita). El software realiza 200 iteraciones permitiendo encontrar los parámetros α , m y n de la ecuación de van Genuchten (1980). Fue utilizado un ajuste unimodal para las curvas y los puntos experimentales fueron introducidos en términos de humedad volumétrica y succión, así como los valores de θ_s y θ_r para cada curva de retención. La Tabla 3 muestra los valores de los parámetros obtenidos para cada curva. Puede observarse que ambas curvas poseen valores similares siendo el valor de n el mismo para ambos casos. Los parámetros α , m y n evidencian que el suelo posee alta entrada de aire (α) y la zona de transición se encuentra entre succiones de 100 a 10000 kPa. Figura 5 muestra el ajuste obtenido mediante la ecuación de ajuste de van Genuchten (1980) para ambas muestras. Los símbolos representan los puntos experimentales, en cuanto las líneas representan las SWRC ajustadas usando van Genuchten (1980). Debido a la similitud de ambas curvas, se puede considerar que ambas son iguales, por

ende, los parámetros de los ajustes usados como datos de entrada para el modelamiento numérico serán los de la muestra RO1 presentes en la Tabla 3. El ajuste presentado en la Figura 5 muestra un distanciamiento con los resultados experimentales de saturaciones entre 75 y 95% debido a que la ecuación propuesta por van Genuchten (1980) fuerza el ajuste a un valor constante entre la saturación total y la entrada de aire (succión = 150 kPa, Carnero, 2014). Por otro lado, la ecuación propuesta por Fredlund y Xing (1994) se ajusta mejor a los puntos experimentales en la zona mencionada. Sin embargo, van Genuchten (1980) es ventajoso en el sentido que la ecuación es simple y los modelos numéricos son resueltos en menor tiempo y con buenos resultados. Adicionalmente, la ecuación de van Genuchten (1980) está disponible en RETC 6.02 para ser utilizada directamente en el modelamiento numérico en Hydrus 2D, debido a ello, los parámetros van Genuchten (1980) en la Tabla 3 fueron utilizados en la presente investigación.

Tabla 3 – Parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten (1980) (modificado de Carnero, 2014).

Muestra	α (1/kPa)	m	n
RO1	0.0015	0.832	1.005
RO2	0.0016	0.831	1.005

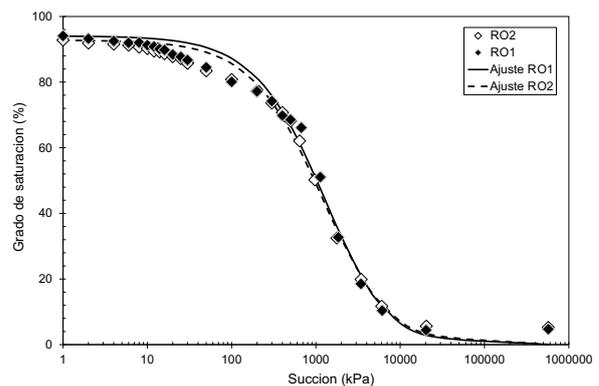


Figura 5 – Ajustes de los datos experimentales mediante el uso de la ecuación de van Genuchten (1980) para obtener las SWRC del suelo estudiado (Modificado de Carnero, 2014).

4.2. Modelamiento de infiltración 1D utilizando la SWRC

Como mencionado anteriormente, el análisis de la infiltración puede ser desarrollado en base a la SWRC

y la conductividad hidráulica saturada del material. Para la presente investigación, el software Hydrus 2D desarrollado por PC-Progress (licencia gratuita) fue utilizado para realizar el análisis numérico. El software usa el método de elementos finitos para calcular las presiones de agua en el modelo gráfico creado en el software (Yu et al. 2010). El primer paso en el modelamiento es definir las dimensiones del suelo a ser analizado. Para este estudio, se eligió una columna de suelo de 1m de altura con un ancho de 0.2m. Dos condiciones iniciales serán estudiadas, las cuales son, 60% y 40% de grado de saturación respectivamente, la cuales son condiciones comunes en las que suelos residuales se encuentran. Para cada una de estas condiciones, se utiliza la SWRC (Figura 5) del suelo a fin de estimar el valor de succión que corresponde a cada grado de saturación. De este modo, en base a la SWRC, se observa que las succiones son 800 y 1500 kPa, para 60 y 40% de grado de saturación, respectivamente. Ambas succiones serán utilizadas como condiciones iniciales del modelo numérico.

Las condiciones de fronteras de este estudio son de 0m en la parte superior de la columna simboliza la presencia de agua en esa zona, e indica que esta zona se encuentra saturada (succión = 0). A seguir, las succiones iniciales del suelo son introducidas en unidades de presión de metros, así, -80m de presión representa 800 kPa. Esta condición de frontera se coloca en la parte inferior de la columna para indicar que el suelo está a 60% de saturación (Figura 6). De forma similar, -150m de presión se coloca en la parte inferior de la columna para representar que el suelo inicia con 40% de grado de saturación.

Al comenzar el análisis (tiempo = 0 segundos), estas condiciones son constantes en toda la columna de suelo, posteriormente, debido a la infiltración de agua de la parte superior, la columna incrementa su humedad paulatinamente, por ende, la succión se reduce con el tiempo hasta alcanzar el equilibrio, lo que significa que la columna debe llegar a la saturación en un periodo de tiempo que depende de las propiedades no saturadas del material.

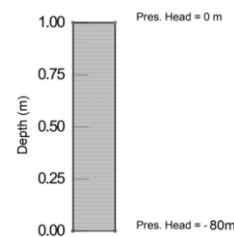


Figura 6 – Modelo geométrico de la columna de suelo y condiciones de frontera aplicadas para el Caso 1 de 60% de grado de saturación inicial.

El contenido de humedad volumétrico del suelo es estimado por el software en base a la SWRC obtenida por Carnero (2014) usando los parámetros de la ecuación de van Genuchten (1980) de la Tabla 3. La conductividad hidráulica saturada fue estimada usando la ecuación propuesta por Kozeny (1927) y posteriormente modificada por Carman (1937, 1956):

$$K = \frac{\rho g \mu n^{31-n} d_{10}^{102180}}{2180} \quad \text{Ec. 1}$$

En donde: ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad, μ es la viscosidad dinámica del fluido, n es la porosidad (Tabla 2), y d_{10} es el diámetro del 10% que pasa en la curva granulométrica (basado en Carnero, 2014). Basado en este método, la conductividad hidráulica saturada del suelo es de 1.27×10^{-6} m/s. El valor obtenido mediante la Ec. 1 es compatible con resultados experimentales de suelos residuales de la región estudiada (Mendes, 2008). Sin embargo, cabe resaltar que la obtención experimental de la conductividad hidráulica es importante y dichos estudios pueden ser incluidos en una futura investigación. La conductividad hidráulica saturada junto con la SWRC son introducidos en el software juntos con el contenido de humedad volumétrico saturado y residual del suelo.

La Figura 7 muestra la obtención de la función de la conductividad hidráulica no saturada del material, obtenida iterando la SWRC con la conductividad hidráulica saturada mediante la ecuación de van Genuchten (1980). La máxima conductividad hidráulica del suelo siempre será aquella de la condición saturada. Cuanto más seco el suelo, menor es su conductividad hidráulica debido a que el suelo

posee aire y este reduce la transmisión de agua entre las partículas. La función también nos muestra que la conductividad hidráulica al inicio del modelo está en torno a 10^{-9} m/s que corresponde a la succión de 800 kPa impuesta para el Caso 1. Para el Caso 2, se observa que la conductividad hidráulica está en torno a 10^{-10} m/s para una succión de 1500 kPa. Este detalle nos demuestra que la diferencia de succiones estudiadas representa una variación de 100 veces en la conductividad hidráulica de ambos casos.

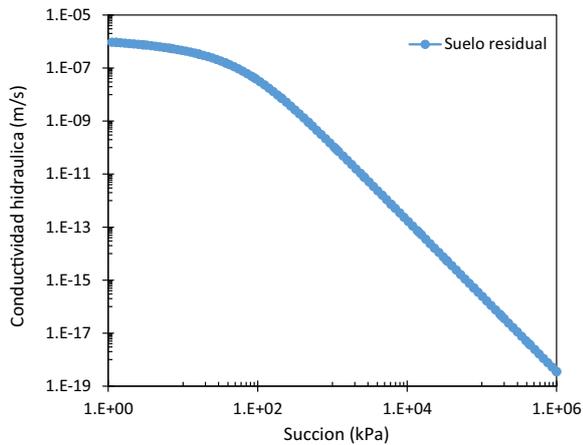


Figura 7 – Función de la conductividad hidráulica no saturada calculada por Hydrus 2D.

En base a la función obtenida, el tiempo para alcanzar el equilibrio es estimado. La Figura 8 muestra (a) la variación de contenido de humedad volumétrica (θ) y (b) el perfil de presiones de agua a lo largo de la columna de suelo de 1m a cada dos horas de análisis para el Caso 1. Puede observarse que, al inicio del modelo, la succión en la columna es de 800kPa o $\theta = 0.28$ (línea azul vertical). Mientras que el tiempo avanza, la zona superior reduce su succión y tiende a 0kPa (condición saturada). Antes de finalizar las primeras dos horas, se observa que los primeros 0.4m de la columna en la parte superior alcanzaron la condición saturada. A partir de las primeras 2 horas, el agua infiltra y satura 0.1m más de la columna por cada hora. A partir de las 10 horas de iniciado el análisis, se observa que las curvas son iguales, lo que indica que el equilibrio de succiones fue alcanzado en el Caso 1. Sin embargo, puede observarse que la parte inferior de la columna no alcanza 0 kPa debido a que el software asume que la presión de 800 kPa en la parte

inferior debe ser mantenido a lo largo del tiempo. Este artificio del software no invalida el equilibrio alcanzado. La interpretación correcta es que esta succión ya no existe y por ende la infiltración es total. Similarmente, el contenido de humedad volumétrica varía en función del tiempo, desde un valor constante ($\theta = 0.28$) hasta alcanzar la saturación ($\theta = 0.44$).

La Figura 9 muestra el Caso 2 en donde la succión inicial de la columna es 1500 kPa. Similar a la Figura anterior, con el correr de las horas, el frente de infiltración avanza hacia la base de la columna. El contenido de humedad volumétrica (θ) varía entre 0.18 y 0.44 entre la condición inicial y final, respectivamente. El proceso de saturación toma más tiempo que en el Caso 1 y el frente saturado tiene una pendiente menor al Caso 1 debido al bajo contenido de humedad inicial de la columna. El análisis muestra que el equilibrio se alcanza después de 14 horas lo cual indica que el equilibrio de succión alcanzada por el Caso 1 es 70% del tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en el Caso 2.

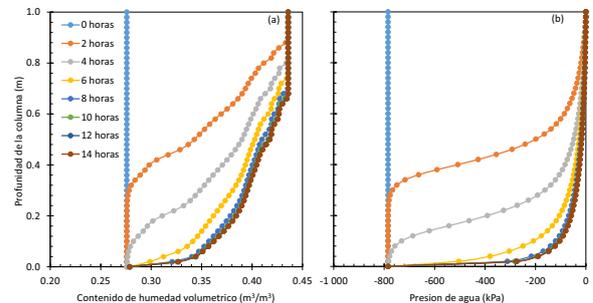


Figura 8 – Distribución de (a) humedad volumétrica y (b) succiones debido a la infiltración a cada 2 horas para el Caso 1 cuando el grado de saturación inicial del suelo es 60% a lo largo de la columna de suelo.

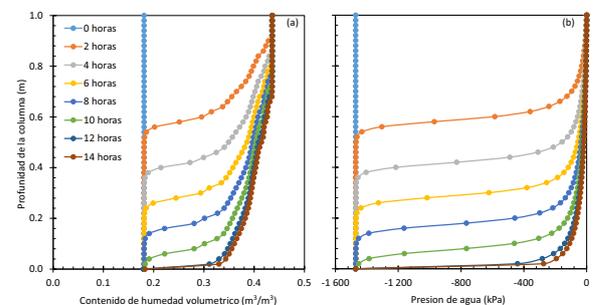


Figura 9 – Distribución de (a) humedad volumétrica y (b) succiones debido a la infiltración a cada 2 horas para el Caso 2 cuando el grado de saturación inicial del suelo es 40% a lo largo de la columna de suelo

Los resultados muestran que el proceso de infiltración es constante y depende claramente de la conductividad hidráulica del material de 1.27×10^{-6} m/s y de la SWRC. Si el análisis fuera ejecutado con parámetros típicos de un material arenoso, el tiempo para alcanzar el equilibrio sería considerablemente menor debido a que sus propiedades de retención son mucho menores comparadas con suelos limosos. Por otro lado, si el análisis es efectuado en un suelo puramente arcilloso, el tiempo de infiltración se incrementa grandemente, debido a la alta tortuosidad y baja permeabilidad de este material.

Debido a que el suelo estudiado presenta expansibilidad cuando llega a la saturación, el tiempo en el cual esta ocurre es de gran importancia para la ingeniería. En base a los resultados se puede decir que se tiene entre 10 y 14 horas para que el suelo pierda toda su succión y por ende, la expansión por saturación se produzca. Como consecuencia la resistencia del suelo será disminuida y la probabilidad de colapso aumenta. Los resultados de un análisis 1D como el efectuado en este estudio pueden asistir a los ingenieros y prever la pérdida de resistencia con lo cual soluciones idóneas pueden ser tomadas antes de que la saturación del suelo se lleve a cabo.

Por otro lado, al mismo modelo pueden ser agregadas condiciones de fronteras adicionales para representar la interacción entre el suelo y el medio ambiente. Por ejemplo, se puede representar el fenómeno de evaporación mediante temperatura o humedad relativa del aire. Todos los modelos utilizan la SWRC, por lo cual, su obtención experimental es importante y permite el análisis de múltiples escenarios.

5. CONCLUSIONES

La SWRC utilizada en el presente estudio muestra que el suelo estudiado expande cuando alcanza la saturación, lo cual indica que cuidados especiales deben ser adoptados cuando el suelo es utilizado en obras de ingeniería y expuesto a infiltración.

El análisis numérico 1D muestra que la infiltración será completada luego de 10 y 14 horas, para las condiciones iniciales de saturación de 60% y 40%, respectivamente. Si el suelo se encontrara en estado totalmente seco o de baja saturación, el tiempo para que la infiltración total ocurra puede tomar varios días, y, por ende, las propiedades iniciales de saturación el suelo controlan el tiempo de infiltración. La curva de retención de suelos es una pieza imprescindible en el análisis de infiltración de agua en suelo y requiere ser obtenida experimentalmente para estimar parámetros tales como la conductividad hidráulica no saturada y el tiempo de infiltración de agua en el suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carman, P.C. (1937) Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, v.15, p. 150-166.
- Carman, P.C. (1956) Flow of gases through porous media. Butterworths, London. 182p.
- Carnero, G.G. (2014) Contribution to the study of the behavior of a quasi-saturated unsaturated compacted soil. MSc dissertation, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, (In Portuguese). 229p.
- Carnero, G.G.; Carnero, E. G. (2015). Técnica constructiva de terraplenes húmedos y su aplicación en la geotecnia moderna. *Rev. Investig. Altoandín.*, 17(3), 311-320. doi: <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.142>
- Chandler, R.J.; Crilly, M.S.; Montgomery-Smith, G. (1992) A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceeding of the Institution of Civil Engineering*, 92(2), p. 82-89.
- Chandler, R.J.; Gutierrez, C.I. (1986) The filter-paper method of suction measurement. *Geotechnique*, 36(2), p. 265-268.

- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour Res*, 30(2), 11-23. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/93WR02676>
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H.; Fredlund, M.D. (2012) Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, New York, 926p.
- Fredlund, D.G.; Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), p. 521-532.
- Fredlund, D.G.; Xing, A.; & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546. doi: <http://dx.doi.org/10.1139/t94-062>
- Fredlund, D.G., Houston, S.L. (2009). Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(6), 694-707. doi: <http://dx.doi.org/10.1139/t09-010>
- Georgetti, G.B. (2010) Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW). Tese (mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos, 2010.
- Hilf, J.W. (1956) An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. PhD thesis – Faculty of Graduate School, University of Colorado, Denver.
- Hillel, D. (1971) Physical principles. In: *Soil and Water: Physical principles and processes*. New York: Academic Press, p. 5-127.
- Karup, D., Moldrup, P., Tuller, M., Arthur, E., & Jonge, L. (2017). Prediction of the soil water retention curve for structured soil from saturation to oven-dryness. *European Journal of Soil Science*, 68(1), 57-65.
- Kozeny, J. (1927) Ueber kapillare leitung des wassers im boden. *Sitzunberg Akad. Wiss, Wien*, 136, (2a), p. 271-306.
- Libardi. P.L. (1995) Dinamica da agua no solo. Piracicaba: ESALQ/USP – Departamento de Fisica e Meteorologia, 497p.
- Lu, N.; Likos W.J. (2004). Unsaturated soil mechanics. Hoboken, N.J.: J. Wiley. 556p.
- Marinho, F.A.M. (1994) Medição de sucção com o método do papel filtro. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação - Foz de Iguaçu - Paraná - Novembro. pp.515-5227.
- Marinho, F. A. M. (1997) Medição de sucção em solos. In: *Anais Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, 3, Rio de Janeiro. v2, p. 373-384.
- Marinho, F.A.M. (2005) Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Concurso de Livre-Docência (Geomecânica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201p.
- Marinho, F.A.M., Carnero Guzman, G.G., & Del Gaudio Orlando, P. (2016). Constant Water Content Compression Tests on Unsaturated Compacted Soil with Suction Measurement Using a HCT. *International Journal of Geomechanics*, 16(6) D4015008.
- Mendes, R.M (2004). Estudo das propriedades geotecnicas de solos residuais tropicais nao saturados de Ubatuba (SP). Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.

- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Oliveira, O.M. (2004) Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- Ridley, A.M.; Burland, J.B. (1993) A new instrument of the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique*, 43(2), p. 321-324.
- Stuermer, M.M. (1998) Estudo da capacidade de retenção de água em um solo residual compactado. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 121p.
- Sun, W.; Sun D. A.; Fang, L; Liu, S. (2014) Soil-water characteristics of Gaomiaozi bentonite by vapour equilibrium technique. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (1) , p . 4 8 - 5 4 . doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.12.004>
- Sysuev, V., Maksimov, I., Alekseev, V., & Maksimov, V. (2013). Soil water retention curves based on idealized models. *Russian Agricultural Sciences*, 39(5), 522-525.
- Van Genuchten, M. Th. (1980) A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of American Journal*, 44(5), p. 893-898.
- Vilar, O.M. (2006) Introducao a mecanica dos solos nao saturados. Notas de aula da disciplina de resistencia ao cisalhamento dos solos. Sao Carlos: EESC/USP – Departamento de Geotecnia, 2006.
- Warrick, A.W.; Lomen, D.O.; And Yates, S.R. (1985) A generalized solution to infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 49(1), p.34-38.
- Yu, Ch., And Ch. Zheng, (2010) Hydrus: Software for Flow and Transport Modeling in Variably Saturated Media. Software Spotlight, *Ground Water*, 48(6), 787-791, 2010.

