

Características de la curva de retención de agua en un suelo tropical compactado

Characteristics of the water retention curve in a compacted tropical soil



Iván Fernando Otálvaro C.
Engineering School- Javeriana Pontifical University, Cali, Colombia
Manoel Porfírio Cordão-Neto
Department of Civil and Environmental Engineering- University of Brasilia, Brasilia, Brazil

ABSTRACT

The relationship between soil suction and water storage is denoted as the water retention curve (WRC). This relationship has been widely used for predicting the engineering behavior of unsaturated soils. For many researchers this relationship provides a useful tool to bridge the gap between theory and implementation of unsaturated soil mechanics. In this paper are analyzed the compaction effect in the water retention curve for tropical weathering soil highly aggregated. In natural conditions this soil show bimodal-shaped water retention curves. The filter-paper and suction-plate methods are used for obtain the water retention curve. The suction is measured before saturation, on the drying path for dynamic compacted samples with different moisture content. The relationship between compaction and the shape of the retention curve shape are discussed.

RESUMEN

Actualmente la cobertura de la brecha entre la teoría y la implementación de la mecánica de suelos no saturados está tratándose de cerrar con el uso de la curva de retención agua suelo (WRC) o curva característica humedad succión. Son innumerables las propuestas para obtener parámetros de modelos que incluyen el efecto de la saturación parcial mediante la WRC. En este artículo es analizada la influencia de la compactación en la WRC de un suelo tropical fuertemente agregado que exhibe un comportamiento bimodal. La WRC es obtenida por la técnica del papel filtro y placa de succión para muestras compactadas dinámicamente con diferentes humedades y energías. Es estimada la distribución de poros a partir de la curva de retención de agua. Es analizado el efecto de la compactación en los valores de entrada de aire de los macro-poros y micro-poros. Es discutida la variación y la relación entre la compactación y la forma de la WRC para diferentes humedades en trayectorias de secado.

1 INTRODUCCIÓN

Los suelos tropicales presentan un comportamiento geotécnico complejo de caracterizar, debido a una serie de particularidades derivadas de su origen y la interacción con los agentes atmosféricos. Los procesos de meteorización que intervienen en su formación producen una serie de compuestos discontinuos que contienen desde minerales originales en la roca hasta arcillo-minerales formados a partir del material parental, y en algunos casos particulares son pobres en sílice y presentan contenido considerable de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Por otra parte, debido a la relación entre la infiltración y la evaporación en las regiones tropicales este tipo de suelos se caracterizan por un estado de saturación parcial. Condición que en zonas como el Planalto Central brasileiro varía estacionalmente con los periodos de lluvia.

De acuerdo con Mitchell & Sitar (1982), los suelos tropicales presentan características diferenciadas con respecto a los sedimentos no meteorizados tales como; agregados y aglomeraciones de partículas debido a la acción de agentes cementantes; minerales de arcilla susceptibles al secado; endurecimiento por secado;

pesos unitarios secos bajos cuando son compactados; humedades naturales superiores a la óptima, entre otros.

La estructura derivada del proceso de formación del suelo y las interacciones con los agentes atmosféricos han despertado el interés por caracterizar este tipo de geomateriales. Debido a la necesidad de; disminuir los daños en infraestructura ocasionados por fenómenos como el colapso; reducir la vulnerabilidad por desastres naturales como inestabilidad de taludes y laderas; y aprovechar condiciones favorables de resistencia al cizallamiento generadas por la succión estacionalmente, con el objeto de optimizar estructuras de contención para excavaciones temporales durante la construcción de obras civiles, entre otros. Este tipo de problemas pueden ser abordados en la práctica mediante la utilización de la curva de retención de agua en el suelo, WRC por sus siglas en inglés.

La curva de retención de agua en el suelo es la relación entre la succión en el suelo y el contenido de agua almacenado en los poros del mismo. Usualmente la WRC es definida en términos de la succión matricial, expresada como la diferencia entre la presión de aire y la presión del agua al interior de los poros del suelo $u_a - u_w$. La WRC relata directamente el comportamiento hidromecánico del suelo, como la resistencia al corte, el

cambio de volumen y el flujo de agua. Vanapalli et al. (1996) utilizan parámetros que definen forma de la WRC para predecir el incremento de la resistencia al cizallamiento con la succión. Thu et al. (2007), incorporan la WRC en la definición de los parámetros de un modelo elastoplástico para suelo no saturado. van Genuchten (1980), propuso una ecuación simple que permite predecir la permeabilidad no saturada a partir de la WRC.

La succión matricial guarda una estrecha relación con la estructura del suelo, la cual a su vez es el resultado del tamaño, forma y distribución de los poros (Houston et al., 1994). El tamaño de los poros al igual que el tamaño y distribución de los granos presenta una alta variación, incluyendo usualmente varios órdenes de magnitud. El tamaño y la distribución de los poros en algunos suelos tropicales suele ser bimodal, debido a la presencia de agregaciones en el suelo. De acuerdo con Otálvaro & Codão-Neto (2010), en suelos de origen sedimentario es posible tener arreglos de partículas gruesas con tamaños considerablemente superiores a los granos más finos de tal modo que los granos finos no alcancen a llenar completamente los vacíos formados por los granos gruesos, dando origen a dos tamaños de poros dominantes, macro poros y micro poros. En tanto, para los suelos tropicales es común tener distribuciones bimodales debido a la cementación de partículas imemperizadas que al formar agregaciones dejan macro poros en la interfase del contacto con otros granos mayores y/o agregaciones, agregaciones que en su interior contienen micro poros. En la Figura 1 es presentada una curva de densidad de tamaño de poros (PSD) y su respectiva WRC típicas de suelos con distribución de poros bimodal.

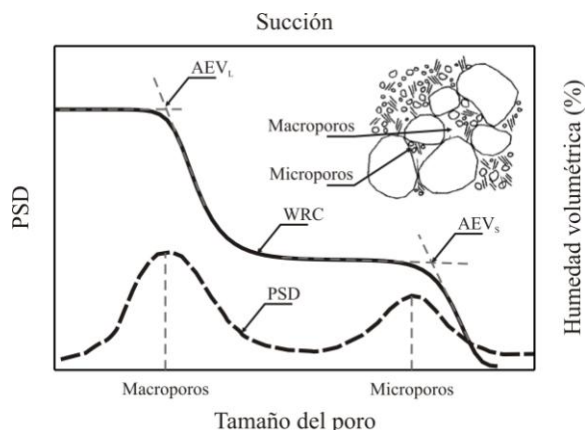


Figura 1. Densidad de tamaño de poros y WRC para suelos bimodales (modificado de Otálvaro & Codão-Neto, 2010)

La forma de la WRC presentada en la Figura 1, difiere de las curvas típicas unimodales en forma de "S". La distribución de poros bimodal hace que la WRC presente dos valores de entrada de aire (AEV) y una meseta en la zona intermedia de desaturación. El primer valor de entrada de aire es usualmente bajo y corresponde al inicio de la desaturación de los macro poros, en los suelos compactados estudiados resulto

menor de 8 kPa. El segundo valor de entrada de aire corresponde a la desaturación de los micro poros; en este estudio fue del orden de 10,000 kPa.

Durner (1994), extiende la ecuación unimodal presentada por van Genuchten (1980) a funciones bimodales y multimodales introduciendo factores de peso en una combinación lineal de funciones individuales unimodales de van Genuchten. Factores que son determinados a partir del mejor ajuste de las parejas medidas de humedad succión. La expresión general de la SWCC tendrá la siguiente forma:

$$\theta = \sum_{i=1}^N p_i n_{pi} \int_S^{\infty} g(S) dS \quad [1]$$

Donde, θ = humedad volumétrica; i = número de modos; p_i = factores de peso del porcentaje de poros dominante en el modo i ; n_{pi} = porosidad en cada modo i ; S = succión matricial; $g(S)$ = función simple de la relación humedad succión. Introduciendo la ecuación unimodal de van Genuchten (1980) en la ecuación [1] en el caso bimodal, $i=2$, se obtiene:

$$\theta(S) = p_l n_{pl} \left[\frac{1}{1 + (a_l \cdot S)^{n_l}} \right]^{m_l} + p_s n_{ps} \left[\frac{1}{1 + (a_s \cdot S)^{n_s}} \right]^{m_s} \quad [2]$$

Donde, p_l y p_s , son los factores de peso de macroporos y microporos respectivamente; a_l , n_l y m_l , son los parámetros de ajuste para los macroporos; a_s , n_s y m_s , son los parámetros de ajuste para los microporos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo fue utilizado un material de préstamo proveniente de la vía EPTG que conecta el Plano Piloto de Brasilia con una de sus ciudades satélites conocida como Taguatinga. Fueron recolectadas sólo muestras alteradas en saco, con una masa total aproximada de 1,000 kg. El sitio de muestreo se encuentra en una región ambiental conocida como el Cerrado Brasileiro, región caracterizada por una cobertura de suelo resultado de la meteorización, predominantemente química, asociada a los procesos de lixiviación y laterización de edades entre el Terciario y el Cuaternario (Araki, 1997).

Inicialmente fueron efectuadas dos pruebas simples para identificar la susceptibilidad del suelo al secado. La primera consistió en evaluar el contenido natural de humedad con dos temperaturas de secado 60°C y 105°C; los contenidos de humedad obtenidos fueron de 22.5% y 23.0% respectivamente. En la determinación del contenido de humedad con la temperatura de secado de 60°C se mantuvo la muestra en el horno por un período superior a 24 h hasta que la masa medida estuviese estable. El segundo chequeo fue hecho a partir de la diferencia entre los límites de consistencia variando los métodos de preparación de la muestra, secado al aire y

humedad natural; la muestra preparada con la humedad natural presentó un límite líquido de 42% y un índice plástico de 11%, en tanto la muestra seca al aire se obtuvieron valores de 40% y 12% respectivamente. En ambos casos las diferencias son menores que la desviación estándar aceptada para el ensayo, hecho con el cual se descarta la sensibilidad de este material al secado.

En la Tabla 1 son presentadas las propiedades índice del suelo para muestras preparadas vía seca. Algunas de las determinaciones fueron efectuadas hasta 9 veces para obtener el coeficiente de variación muestral COV, el cual es una medida adimensional de la variabilidad de los parámetros, el coeficiente es obtenido del cociente entre la desviación estándar y el valor medio.

Tabla 1. Características del suelo estudiado.

Propiedad	Valor medio	COV (%)
Materia orgánica	2.5%	--
Contenido de humedad ¹	23.0%	--
Ferromagnéticos ²	8.1%	12.8
SiO ₂ ³	19.8%	--
CEC	8.0 mE/100ml	--
pH en agua	6.0	2.4
pH en KCl	5.6	2.6
Límite líquido	40.0%	1.8
Índice plástico	12%	12.0
Gs	2.76	1.1

¹ contenido de humedad natural

² ferromagnéticos retenidos en la malla No. 200

³ contenido de sílice obtenido por ataque sulfúrico

En la Figura 2 se presenta el tamaño y distribución de las partículas, la cual fue obtenida mediante tamizado mecánico y difracción por rayos láser. El tamaño de las partículas presenta una diferencia considerable cuando es utilizado el hexametáfosfato de sodio como agente defloculante. La diferencia entre ambas curvas indica que un porcentaje considerable de partículas tamaño limo y arcilla se encuentran agregadas formando paquetes de partículas con tamaño arena. Esta es una característica típica de los suelos con distribución de tamaño de poros bimodal y multimodal.

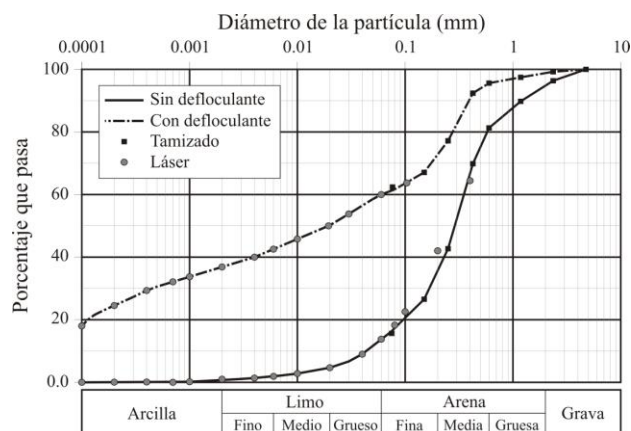


Figura 2. Tamaño y distribución de las partículas del suelo estudiado

El suelo después de secado fue compactado con tres energías diferentes, incluyendo como límites inferior y superior el Proctor normal (PN) y modificado (PM) respectivamente. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos de la compactación, la humedad óptima de 24% para el PN se encuentra por encima de la humedad natural de 23% mientras que para el PM 19.5% está por debajo.

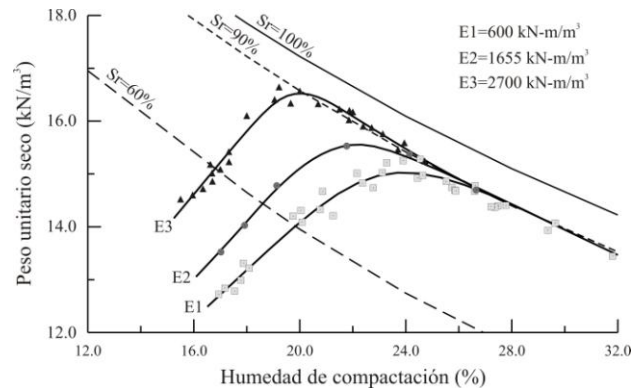


Figura 3. Características de compactación del suelo estudiado

En el presente trabajo es analizado el efecto de la compactación en función de la humedad manteniendo la energía Proctor normal como energía de referencia, debido que en la energía modificada la distribución de poros se torna unimodal y por consiguiente se reducen los efectos de la compactación en la WRC.

2.1 Técnica adoptada para obtener la curva de retención de agua (WRC)

Debido a la extensión del rango esperado para la variación de la succión en función de la humedad entre 1 kPa y 30,000 kPa, y al contraste entre los valores de entrada de aire de los macro poros y los micro poros se usaron dos técnicas para obtener la curva característica. Para las succiones superiores a los 10 kPa fue utilizada la técnica del papel filtro, ampliamente aceptada y difundida debido a su simplicidad y bajo costo. Mientras que para las succiones inferiores a 15 kPa fue desarrollada y construida una placa de succión basada en el modelo presentado por Feuerharmel et al. (2006).

La técnica del papel filtro ha sido usada por numerosos investigadores para medir la succión matricial y total (Gardner, 1937.; Marinho, 1994; Houston et al., 1994; Marinho & Oliveira, 2006). Aunque el método de papel de filtro es sencillo, requiere mucho cuidado y bases teóricas que permitan entender su principio para hacer medidas correctas de la succión (Marinho & Oliveira, 2006). Algunos aspectos como el tiempo de equilibrio y la calidad del contacto son claves en los resultados obtenidos y el tipo de succión que se mide. La succión matricial es medida cuando el papel filtro se encuentra en contacto pleno con el suelo, y el agua absorbida por el papel presenta una concentración igual al agua del suelo. Si el papel no tiene un contacto pleno

con el suelo el agua recibida por el papel es transmitida como vapor, y está siendo medida la succión total. En la Tabla 2 se enumeran los detalles adoptados para efectuar la medición de la succión matricial con el método del papel filtro.

Tabla 2. Detalles del método de papel filtro adoptado.

Aspecto	Procedimiento adoptado
Tipo de papel filtro	Whatman No. 42
Tipo de succión media	Matricial (contacto pleno)
Ecuación de calibración	Chandler et al. (1992)
Condición inicial del papel	Seco al aire (directo de la caja)
Volumen de la muestra	20 cm ³
Tamaño del papel	> 9 cm ²
Embalaje	Disco acrílico sobre el papel para garantizar el contacto pleno, 1ra. capa con papel de vinilo, 2da. capa con papel aluminio, y 3ra. capa con papel de vinilo sellado con cinta adhesiva, y colocados dentro de una bolsa plástica autosellable
Trayectoria	Trayectoria de secado previa saturación por capilaridad
Temperatura del ensayo	25°C ± 0.5°C garantizada por una caja doble de poliestireno expandido (EPS) almacenada en una sala con temperatura controlada
Tiempo de equilibrio	14 días

El método de la placa de succión se caracteriza por la aplicación directa de una presión de agua negativa a la muestra, el valor aplicado es limitado a 100 kPa debido a la cavitación teórica del agua dentro del tubo de drenaje (Feuerharmel et al., 2006). La placa de succión fue usada para la determinación de las succiones bajas que incluye el valor de entrada de aire de los macro poros. El equipo desarrollado está conformado por tres sistemas principales (ver Figura 4): i) una celda de acero inoxidable conformada por tres cuerpos, base, anillo porta muestras y anillo superior, la base tiene una entrada y una salida para el agua desairada, un fondo rebajado con forma de espiral para facilitar la saturación en el cual es fijada una cerámica porosa con un valor de entrada de aire de 1 bar, el anillo superior está provisto de una tapa acrílica perforada; ii) sistema de saturación, compuesto por un reservorio de 5 l y una mesa que provee una diferencia de nivel de 1.5 m con respecto al reservorio; iii) un sistema de imposición de succión conformado por una repisa ubicada a 2.3 m del piso del laboratorio, un tubo guía con mordazas de aluminio para desplazar la bureta verticalmente proveyendo una diferencia de nivel de 2.0 m, y una bureta graduada de 50 ml, calibrada con un sensor de 1mm³ de precisión.

El procedimiento de ensayo en la placa de succión contempló los siguientes pasos: i) saturación de la cerámica porosa de alto valor de entrada de aire; ii) emplazamiento del cuerpo de prueba en el anillo porta muestras; iii) saturación del cuerpo de prueba por capilaridad; iv) emplazamiento del anillo porta muestras en la celda; v) aplicación de la succión deseada,

manteniendo presión de aire igual a cero mediante la tapa perforada superior y deslizando la bureta hacia abajo de la posición de la celda para aplicar una pequeña presión negativa; vi) finalmente es abierta la válvula conectada con la bureta aplicando la succión y es registrado el cambio de volumen en función del tiempo, corrigiendo la succión debido al cambio en la columna de agua de la bureta. En general la mayor parte de las muestras presentaron un tiempo de estabilización de 2 h para succiones inferiores a 10 kPa.



Figura 4. Placa de succión y componentes.

2.2 Estimación del tamaño y distribución de los poros

El tamaño y distribución de los poros es una herramienta para la caracterización de la estructura del suelo, ya que la distribución de poros está relacionada con el comportamiento del suelo, incluyendo: la conductividad hidráulica, las deformaciones volumétricas y la retención de agua (Barrera, 2002). Los métodos desarrollados para obtener el tamaño y la distribución de los poros, al igual que el tamaño de los granos, presenta limitaciones relacionadas con la amplitud de los tamaños de poros a ser medidos. En la literatura se tienen reportes de diferentes técnicas utilizadas para medir el tamaño y la distribución de poros, dentro de ellas se destaca: el análisis de imágenes a partir de microscopía óptica y electrónica de barrido, la succión capilar, la intrusión de mercurio (MIP) y la adsorción de nitrógeno. De las técnicas comúnmente usadas la menos limitada es la intrusión de mercurio, que puede medir tamaños con una variación de cinco órdenes de magnitud, un equipo estándar con una presión de 100 MPa consigue inyectar mercurio en tamaños desde 160Å hasta 600 μm. Washburn (1921) propone el uso de la técnica de intrusión de mercurio para estudiar el tamaño y la distribución de los poros, el autor indica que la presión

absoluta, p , para insertar mercurio en un poro cilíndrico de diámetro, D , se relacionan de la siguiente manera:

$$p = -\frac{4\gamma\cos\phi}{D} \quad [3]$$

Donde, γ es la tensión superficial del mercurio; ϕ es el ángulo de contacto entre el mercurio y el poro del suelo. Un valor típico, y de amplia aceptación, para la tensión superficial del mercurio es de 0.484 N/m. El ángulo de contacto es función del tipo de material, Diamond (1970), reporta ángulos de 139° para montmorillonitas y de 147° para otras arcillas. Delage & Lefebvre (1984) usaron 141° para arcillas. Romero (1999) empleó un ángulo de 140° para arcillas del grupo caolinitas o illitas.

Romero (1999) establece una analogía mecánica entre la succión matricial ($u_a - u_w$) y la presión absoluta p de la ecuación [3] encontrando la siguiente relación:

$$u_a - u_w \approx 0.196p \quad [4]$$

Mascarenha (2008), usando la relación de la ecuación [4] recorre el camino inverso y estima el tamaño de los poros a partir de la WRC. De manera análoga la cantidad de aire en los poros se puede relacionar con los poros inyectados con mercurio como sigue:

$$e_{nw} = (1 - Sr)e \quad [5]$$

Donde, e_{nw} es el índice poros inyectados con mercurio; Sr el grado de saturación del suelo; y e la relación de vacíos. La derivada de la relación e_{nw} vs $\log(D)$ provee la densidad de tamaño de poros (PSD), la cual sirve como herramienta para identificar los tamaños dominantes. En este trabajo fue estimada la distribución y tamaño de los poros a partir de la WRC y las ecuaciones [3], [4] y [5]. Para una función continua de la WRC según la ecuación [2].

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La presentación de los resultados y sus respectivos análisis han sido divididos en dos partes: la primera correspondiente a la variación de la WRC para la energía Proctor normal en función de la humedad de compactación, finalizando con algunas observaciones efectuadas para la variación de la energía en el ramo seco; la segunda parte contempla la estimación del tamaño y distribución de los poros y su relación con la compactación para la energía Proctor normal.

3.1 Curva de retención de agua (WRC)

La utilización de los dos métodos de medición de la succión permitió identificar el comportamiento bimodal de la WRC (ver Figura 5). Condición que es más acentuada en el ramo seco y disminuye conforme se incrementa la humedad de compactación. Con la trayectoria y el método de saturación y secado seleccionados, la relación de vacíos no sufrió cambios significativos hasta

los 1,000 kPa de succión, y presentó las mayores variaciones cuando superó este.

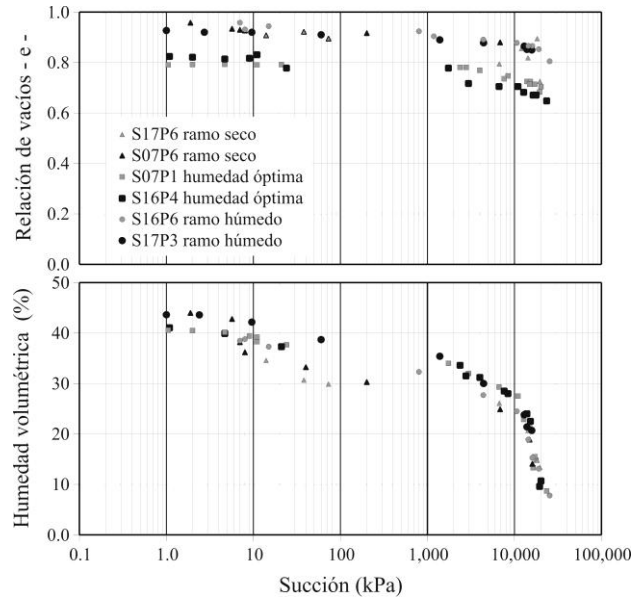


Figura 5. Resultados típicos humedad succión para diferentes humedades de compactación energía Proctor normal

En la Figura 6 se presentan los resultados del ajuste de la ecuación [2] para las WRC obtenidas en los cuerpos de prueba compactados con la energía Proctor normal. La forma e inclinación de la WRC se va suavizando progresivamente con el incremento de la humedad de compactación para los valores de succión inferiores a 1,000 kPa, mientras que para valores de succión superiores se mantiene la inclinación final y el punto de máxima curvatura, y por consiguiente el valor de entrada de aire de los micro poros. En la zona de succiones inferiores a los 1,000 kPa la diferencia de humedad entre la zona saturada y desaturada de los macro poros va reduciéndose con el incremento de la humedad de compactación.

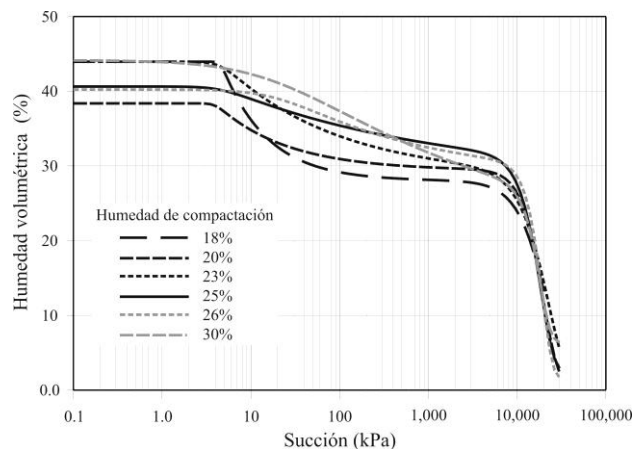


Figura 6. Curvas de retención obtenidas para el mejor ajuste de la ecuación [2] para la energía Proctor normal

En términos generales puede decirse que conforme crece la humedad de compactación la WRC pasa de una forma bimodal acentuada a imperceptible, es decir, de bimodal a prácticamente unimodal como se observa en la WRC correspondiente al 30% de humedad de compactación. Por otra parte es importante destacar el resultado obtenido para la WRC correspondiente al 20% de humedad, la cual está por debajo de la WRC en la humedad óptima para la zona saturada, este resultado se presentó debido a la dificultad en la saturación de los cuerpos de prueba para dicha humedad, con el método seleccionado.

Los resultados mostrados en la Figura 7 corroboran las observaciones efectuadas en las WRC de la Figura 6. Por una parte, el valor de entrada de aire de los macro poros (AEV_L) presenta una tendencia creciente con la humedad de compactación, mientras que, el valor de entrada de aire de los micro poros (EAV_S) permanece prácticamente constante. Por otra parte, el parámetro de forma n_L de la ecuación [2] relacionado con la inclinación de la WRC después del AEV_L se reduce significativamente con el incremento de la humedad de compactación, este hecho sumado al incremento del AEV_L son los responsables de suavizar la forma WRC.

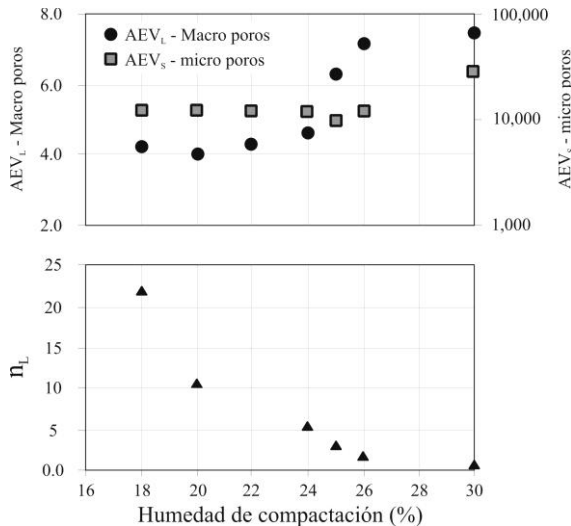


Figura 7. Influencia de la humedad de compactación en la forma de la curva de retención para el mejor ajuste de la ecuación [2] en la energía Proctor normal

En relación al incremento de la energía de compactación el valor de entrada de aire de los macro poros se torna difícil de identificar debido a la forma plana de la curva. El valor de entrada de aire de los micro poros se mantuvo constante.

3.2 Tamaño y distribución de los poros

El tamaño y distribución de los poros fue obtenido a partir de la WRC siguiendo la propuesta de Mascarenha (2008). En este numeral son mostrados los resultados obtenidos sólo para los cuerpos de prueba compactados en la energía Proctor normal. En la Figura

8 se presenta la relación obtenida entre la WRC y la densidad del tamaño del poro.

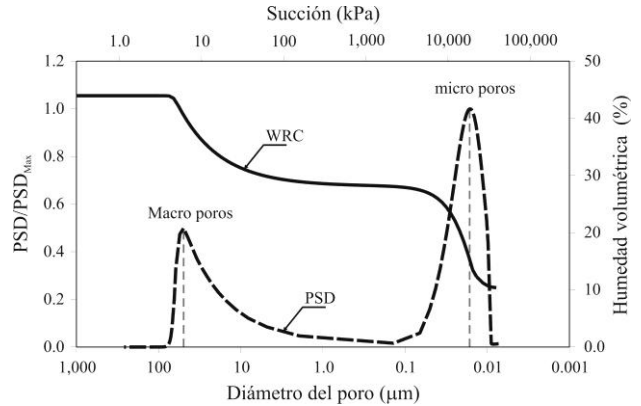


Figura 8. Relación entre la curva de retención y la densidad del tamaño del poro para una humedad de compactación del 18% en la energía Proctor normal

Al igual que la WRC la distribución de poros es claramente bimodal en las humedades de compactación igual al 18% (ver Figura 9). El carácter bimodal de la distribución poros y el tamaño de los macro poros se va reduciendo conforme se incrementa la humedad de compactación. El valor de los micro poros permanece prácticamente constante del orden de $0.02 \mu\text{m}$. Los macro poros varía desde $50 \mu\text{m}$ para una humedad de compactación del 18% hasta $26 \mu\text{m}$ para el 25%, humedad que corresponde a la óptima, y a partir de esta condición de compactación en la zona correspondiente a los tamaños identificados de los macro poros la curva que representa la densidad de tamaño de poros no presenta valores pico. Esta condición ayuda a entender la reducción del carácter bimodal en la WRC conforme se incrementa el contenido de humedad en la compactación.

La presencia marcada de macro poros en el ramo seco de la curva de compactación para suelos finos así como la reducción en el tamaño de los mismos cuando se aproxima a la humedad óptima coincide con resultados reportados por otros autores para suelos finos (García-Beogochea et al., 1979; Reed et al., 1979; Miao et al., 2007).

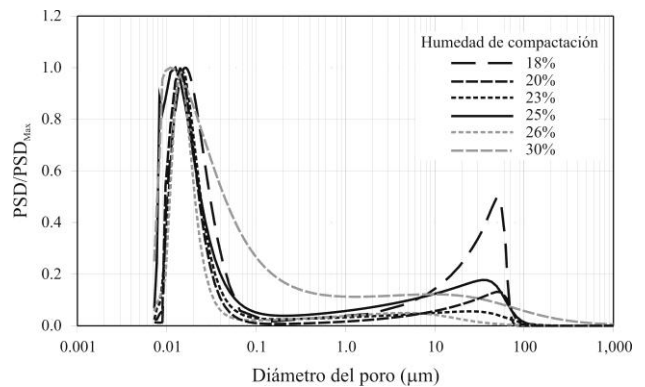


Figura 9. Densidad de distribución de poros para la energía Proctor normal

4 CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó una placa de succión capaz de medir succiones hasta 15 kPa, que combinada con el método de papel filtro permitió obtener la curva de retención para un suelo tropical compactado, identificando una forma bimodal.

En el ramo seco de la curva de compactación para la menor energía la curva de retención presenta una forma bimodal marcada, condición que se desvanece en el ramo húmedo.

Para las energías, humedades y el método de compactación utilizado el valor de entrada de aire de los micro poros se mantuvo en el mismo orden de magnitud, mostrando que las agregaciones y poros relacionados con dicha succión constituyen un nivel de estructura que no es alterado por las condiciones de carga o trayectorias de tensión.

En los suelos estudiados para la energía Proctor normal el valor de entrada de aire de los macro poros es función de la humedad de compactación y crece conforme se incrementa la misma.

Las dos técnicas utilizadas en esta investigación para la determinación de la succión y la curva de retención WRC derivada constituyen una herramienta simple y de bajo costo para estimar el tamaño y distribución de los poros.

5. REFERENCIAS

- Araki, M.S. 1997. *Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsáveis do Distrito Federal*, Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM – 040A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.
- Barrera, M.B. 2002. *Estudio Experimental del Comportamiento Hidro-mecánico de Suelos Colapsables*, Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Del Terreno y Cartografía, Universidad Politécnica de Cataluña, 480 p.
- Delage, P. and Lefebvre, G. 1984. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, 21: 21-35.
- Diamond, S. 1970. Pore size distribution in clays, *Clays & Clay Minerals*, 18:7-23.
- Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Res.* 30: 211–223.
- Feuerharmel, C. Gehling, W.Y.Y. and Bica, A.V.D. 2006. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils. *Geotechnical Testing Journal* 29: 1-7.
- García-Bengochea, I. Lovell, C.W. and Altschaeffl, A.G. 1979. Relation between pore size distribution and permeability of silty clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105:839-856.
- Gardner, R. 1937. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture Range, *Soil Science*, 43: 277–283.
- Houston, S.L. Houston, W.N. and Wagner, A.M. 1994. Laboratory filter paper suction measurements, *Geotechnical Testing Journal*, 17: 185-194.
- Marinho, F.A.M. 1994. Medição da sucção com o método do papel filtro, *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. De Fundações*, Foz de Iguaçu/PR, Brazil: 515–522.
- Marinho, F.A.M. and Oliveira, O.M.. 2006. The Filter Paper Method Revisited, *Geotechnical Testing Journal*, 29:1-9.
- Mascarenha, M.M.A. 2008. *Influência da Microestrutura no Comportamento Hidro-mecânico de uma Argila Siltosa não Saturada Incluindo Pequenas Deformações*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158p.
- Miao, L. Houston, S.L. Cui, Y. and Yuan, J. 2007. Relationship between soil structure and mechanical behavior for an expansive unsaturated clay, *Canadian Geotechnical Journal* 44: 126–137.
- Mitchell, J.K. and Sitar, N. 1982. Engineering properties of tropical residual soils, *Proceedings of the Conference on Engineering and Construction in Tropical Residual Soils*, ASCE, Honolulu, HI: 30-57.
- Otálvaro, I.F. y Cordão-Neto, M.P. 2010. Comportamiento bimodal de la curva de retención de la arcilla roja de Brasilia, *XIII Congreso Colombiano de Geotecnia*, Manizales, Colombia.
- Reed, M. A. Lovell, C. W. Altschaeffl, A. G. and Wood, L. E. 1979. Frost-heaving rate predicted from pore size distribution, *Canadian Geotechnical Journal*, 16:463-472.
- Romero, E. 1999. *Characterisation and Thermo Hydro-mechanical Behaviour of Unsaturated Boom Clay: An Experimental Study*, PhD. Theses, Departamento de Ingeniería Del Terreno y Cartografía, Universidad Politécnica de Cataluña, 405p.
- Thu, T.M. Rahardjo, H. and Leong, E. 2007. Elastoplastic model for unsaturated soil with incorporation of the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 44: 67-77.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal* 44: 892–898.
- Vanapalli, S.K. Fredlund, D.G. Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.
- Washburn, E.W. 1921. A note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 7:115-116.