

Predicción de la resistencia al corte en los suelos naturales derivados de ceniza volcánica

J.C. García-Leal

Programa de Ingeniería Civil – Universidad del Quindío, Armenia, Quindío/Colombia

J. E. Colmenares M.

Departamento de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C./Colombia



ABSTRACT

An experimental program, using the direct shear apparatus, to study the strength-water content relationship of two natural soils derived from volcanic ash (silty sand and sandy silt) was developed. Samples of soil were subjected to wet-dry cycles and their shear strength was measured at different water contents. The soil water retention curve was evaluated using the filter paper method. Suction in the sheared samples was estimated from the Soil Water Retention Curve (SWRC). Different approaches to estimate the shear strength-suction relationship were used to evaluate the quality of the predictions. The comparison of the predicted shear strength and the experimental results, indicates that it is possible to make acceptable predictions of unsaturated shear strength for those kind soils.

PRESENTACIONES TÉCNICAS

Se desarrolló un programa experimental en dos suelos naturales de ceniza volcánica (arena limosa y limo arenoso), para estudiar la relación entre el contenido de agua y la resistencia al corte medida en el aparato de corte directo. Se usaron varias muestras de suelo en ciclos de humedecimiento-secado, cuya resistencia fue medida bajo diferentes valores de la humedad. También, se elaboraron curvas de retención de humedad, usando el método del papel de filtro para medir la succión. Posteriormente, se estimó la relación resistencia-succión mediante diferentes modelos de predicción. La comparación de las predicciones y los datos experimentales mostró que es posible hacer adecuadas predicciones de la resistencia en este tipo de suelos.

1 INTRODUCTION

En las regiones volcánicas, las características del clima, la topografía y la profundidad de los niveles freáticos generan condiciones favorables para que existan suelos en condición parcialmente saturada. Por tanto, en estas regiones la mayoría de los suelos de ceniza volcánica tienen una componente de la resistencia al corte derivada de la interacción entre el agua y el aire de los poros. La medición y predicción de esta componente de la resistencia de un suelo en estado natural, es uno de los problemas que pueden resolverse mediante la aplicación de la mecánica de suelos parcialmente saturados.

En Colombia, aún no está extendido el uso de una tecnología que permita una medición rigurosa de la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado. Todavía es usual considerar que el suelo se encuentra siempre en estado saturado. Sin embargo, mientras se implementa dicha tecnología es posible estimar la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado mediante herramientas de uso corriente en los laboratorios de mecánica de suelos. En ese caso, las características de la resistencia al corte del suelo saturado se pueden relacionar con el comportamiento suelo-agua, observado mediante la curva de retención de humedad. Posteriormente, con la información obtenida en ensayos de resistencia del suelo saturado, y con las características de la curva de retención de agua, se

puede calibrar un modelo empírico para estimar la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado.

2 ECUACIONES DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Para predecir la resistencia al corte de los suelos saturados se utiliza muy frecuentemente el criterio de falla de Mohr-Coulomb (M-C). En término de los esfuerzos efectivos éste se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad [1]$$

Donde, τ = resistencia al corte del suelo; σ' = esfuerzo normal efectivo; c' = cohesión efectiva; ϕ' = ángulo de resistencia al corte efectivo.

La extensión del criterio de M-C a los suelos parcialmente saturados se realiza generalmente de acuerdo con dos enfoques conceptuales: un enfoque basado en el principio de esfuerzos efectivos; y otro que está basado en variables independientes de estado de esfuerzos.

El enfoque de esfuerzos efectivos está representado en la ecuación de Bishop (1959), que se escribe como:

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad [2]$$

Donde, σ' = esfuerzo normal efectivo; σ_n = esfuerzo normal total; u_a = presión de aire en los poros; u_w = presión de agua en los poros; y χ = parámetro relacionado con el grado de saturación.

Al combinar la Eq. 2 y la Eq. 1, se obtiene el criterio de resistencia M-C extendido al suelo parcialmente saturado a partir de los esfuerzos efectivos:

$$\tau = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad [3]$$

El valor del parámetro χ es un aspecto débil de este criterio, ya que su valor es diferente en procesos de cambio de volumen e incremento de esfuerzo cortante. Además, este parámetro no tiene una relación única con el grado de saturación, sino que depende de diferentes factores intrínsecos y ambientales.

El segundo enfoque fue desarrollado por Fredlund y Morgenstern (1977), y está basado en las variables independientes de estado de esfuerzos (Coleman 1962). El criterio de resistencia M-C extendido a los suelos parcialmente saturados (Fredlund et al. 1978), se escribe como:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad [4]$$

Donde, $(\sigma_n - u_a)$ = esfuerzo normal neto; $(u_a - u_w)$ = succión matricial; y c' = cohesión efectiva. El ángulo de resistencia al corte efectivo ϕ' , está asociado a la contribución del esfuerzo normal neto a la resistencia, y el ángulo ϕ^b a la contribución de la succión.

Se han propuesto diferentes modelos, elaborados a partir de los dos enfoques de resistencia la corte. Éstos se agrupan en dos categorías: a) modelos empíricos, que usan la curva de retención de humedad y las propiedades del suelo saturado; y b) ecuaciones, en su mayoría de tipo elíptico o hiperbólico, con parámetros ligados a propiedades del suelo saturado. En los modelos empíricos los parámetros de las ecuaciones se encuentran a partir de la interpretación física del comportamiento del suelo, conservando la forma de los criterios expresados en las Eqs. 3 y 4 (v.gr. Khalili y Khabbaz 1998; Öberg y Sällfors 1995; Vanapalli et al. 1996). En los modelos del segundo tipo se trata de reproducir la forma de la envolvente de resistencia respecto a la succión, sin que necesariamente se respete la forma fundamental del criterio de resistencia de M-C (v.gr. Escario y Juca 1989; Miao et al. 2001; Rassam y Cook 2002). A continuación se describen algunos de los modelos mencionados.

2.1 Modelo de Vanapalli et al. (1996)

Estos autores propusieron que el aporte de la succión a la resistencia al corte es proporcional al área de agua en los poros, respecto al valor de dicha contribución cuando el suelo está saturado. Como la contribución de la succión se expresa mediante el tercer término del lado derecho de la Eq. 4 y en el suelo saturado se cumple que $\tan \phi^b = \tan \phi$ (Escario y Jucá 1989; Gan y Fredlund 1996) entonces:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w)(a_w \tan \phi') \quad [6]$$

Donde: τ_{us} =resistencia al corte aportada por la succión; y a_w =área normalizada de agua en los poros. En una sección transversal de suelo, a_w se define por la relación entre el área de agua para un grado de saturación cualquiera y el área de agua del suelo saturado. Cuando cambia la cantidad de agua en el suelo, cambia el área de agua normalizada, y de manera similar cambia la humedad volumétrica normalizada (Θ). Por la semejanza del comportamiento entre a_w y Θ , se propuso la relación:

$$a_w = \Theta^\kappa = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa \quad [7]$$

Donde, donde θ es el contenido volumétrico de agua, θ_s es el contenido volumétrico de agua del suelo saturado, y κ es un parámetro de ajuste. De la solución de la Eq. 6 se obtuvo un criterio empírico para la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(\Theta^k \tan \phi') \quad [8]$$

Este modelo ha sido probado en todos los intervalos de la succión con un buen ajuste a los datos (v.gr. Nishimura y Fredlund 2000; Vanapalli 2001; Vanapalli y Fredlund 2000; Vanapalli et al. 2000).

2.2 Modelo de Öberg & Sällfors (1995)

Esta propuesta se basa en el enfoque de esfuerzos efectivos de Bishop (1959). Los autores establecieron como hipótesis que el parámetro χ representa la relación del área de los poros ocupada por el agua:

$$\chi = \frac{A_{dw}}{A_w} \quad [9]$$

Donde, A_{tw} = área total de poros en una sección del suelo, que equivale al área de agua en el suelo completamente saturado; y A_{dw} = área de agua en los poros para cualquier grado de saturación. Si se asume que los volúmenes de suelo pueden sustituir las áreas correspondientes en una sección dada del terreno, entonces el grado de saturación es equivalente al parámetro χ de la ecuación de Bishop (1959). De la Eq. 3 se obtuvo el siguiente criterio empírico de resistencia al corte:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(S \tan \phi') \quad [10]$$

2.3 Modelo de Khalili & Khabbaz (1998)

Estos autores utilizaron la Eq. 3 para describir la resistencia cuando un suelo parcialmente saturado alcanza la condición saturada. En dicha condición, la

presión de agua iguala el valor de la presión de aire en los poros $u_w = u_a$ y por tanto:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' \quad [11]$$

La diferencia entre la resistencia al corte en condición saturada y la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado, representa la contribución de la succión a la resistencia al corte del suelo. Se encontró una relación única entre los valores del parámetro χ y la succión matricial normalizada respecto al valor de entrada de aire:

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^M \quad [12]$$

Donde, $(u_a - u_w)_b$ = valor de entrada de aire. En suelos de diferente origen, el parámetro exponente M osciló entre -0.40 en suelos arcillosos y -0.65 en suelos arenosos. Resolviendo la Eq. 3 obtuvieron:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left\{ \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^M \tan \phi' \right\} \quad [13]$$

Para valores de $(u_a - u_w)$ menores o iguales al valor de entrada de aire, la Eq. 12 toma un valor igual a 1, y la resistencia al corte es la que tiene el suelo saturado.

2.4 Ecuación de Rassam & Cook (2002)

Este modelo utiliza una ecuación potencial aditiva generada a partir de la Eq. 4. El atractivo de este modelo consiste en que requiere conocer la resistencia al corte solamente en el punto de saturación residual. La ecuación que describe la componente de resistencia al corte por efecto de la succión (τ_{us}) está expresada como:

$$\tau_{us} = \left\{ (u_a - u_w) - \varphi \left[\frac{(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b}{\tan \phi'} \right]^\beta \right\} \tan \phi' \quad [14]$$

Donde, φ y β son parámetros de ajuste. Los parámetros toman los valores:

$$\beta = \frac{\tan \phi' [(u_a - u_w)_r - (u_a - u_w)_b]}{(u_a - u_w)_r \tan \phi' - \tau_{sr}} \quad [15]$$

$$\varphi = \frac{(u_a - u_w)_r \tan \phi' - \tau_{sr}}{[(u_a - u_w)_r - (u_a - u_w)_b]^\beta} \quad [16]$$

Donde, $(u_a - u_w)_r$ = valor de la succión en el punto de saturación residual; y τ_{sr} = resistencia al corte bajo la condición de saturación residual. Este modelo es válido solamente para valores de la succión por encima del valor de entrada de aire. Cuando la succión es igual al valor residual la resistencia al corte alcanza un valor máximo.

3 SUELOS DE CENIZA VOLCÁNICA

Los suelos de ceniza volcánica son los suelos residuales originados en la meteorización de los piroclastos de caída. En Colombia, se encuentran en el 11.6% de la superficie del país (Malagón et al. 1991).

Estos suelos presentan características y propiedades consideradas únicas. Algunas de estas características son, por ejemplo, una muy difícil dispersión de las partículas arcillosas; una alta facilidad de drenaje simultáneamente con una alta capacidad de retención de agua; y unos cambios físicos irreversibles tras el secado y el amasado. Como consecuencia, los indicadores utilizados en geotecnia para hacer la caracterización convencional, no resultan confiables cuando se aplican a estos suelos. Por ejemplo, la humedad natural, el tamaño de partículas y los límites de Atterberg, tienden a indicar erróneamente que no son buenos materiales para usos ingenieriles (Wesley 2002). En este tipo de suelos se presentan altos valores de la macroporosidad y la microporosidad. Esto se debe a la distribución amplia de los tamaños de los poros (Malagón et al. 1995; Moldrup et al. 2003; Pinzón 1992).

La presencia de minerales arcillosos no cristalinos está asociada a las propiedades físicas consideradas únicas (Maeda et al. 1977). La rápida meteorización del vidrio volcánico contenido en la ceniza volcánica parental produce minerales arcillosos como: alófana, ferrihidrita e imogolita. El mineral no cristalino más abundante es la alófana, un mineral con partículas individuales que tienen una forma globular, muy diferente a la forma laminar de los minerales arcillosos comunes. La estructura de una arcilla alofánica está compuesta de agregados de partículas globulares que se enlazan entre sí, formando un arreglo muy abierto parecido a un collar de perlas (Adachi y Karube 1999); cuando esta estructura se contrae el efecto es permanente.

Para este estudio se utilizaron muestras naturales de suelos de ceniza volcánica, de bloques de suelo labrados a mano. Los suelos se muestrearon en el campus de la Universidad del Quindío, Colombia (4° 30.4' N, 75° 37.5' W). Este sitio se encuentra a una altitud de 1500 m s.n.m, presenta una temperatura media de 23°C, y una precipitación promedio anual de 3000 mm. La actividad de los volcanes produjo en la zona de estudio un depósito volcánico con una superficie de 600 km². Este depósito consiste en una sucesión de flujos piroclásticos, lahares, y acumulaciones fluviales y glaciales, cubierta por una secuencia de cenizas volcánicas, cuyo espesor alcanza entre 15 y 20 m en el sitio de muestreo (Sandoval 2001) (ver Figura 1). Las muestras para el estudio se tomaron de los 4 m superiores del perfil, de las capas de ceniza volcánica producidas por el Volcán-Cerro Machín, con edades cercanas a 4800 años (Rueda 2000).

En el sitio se tomaron muestras de dos capas de suelo de ceniza volcánica: una capa de arena limosa de color olivo (AL); y una capa de limo arenoso de color café amarillento oscuro (LA). La capa de material LA se localizó a una mayor profundidad que la capa LA.

Las características ingenieriles de los suelos utilizados se presentan en la Tabla 1.



Figura 1. Aspecto del perfil de suelos en la zona

Tabla 1. Características de los suelos estudiados.

Características	AL	LA
Gravedad específica, G_s	2.66	2.58
Tamaños > 2 mm (%)	100	100
Tamaños < 75 μm (%)	25	58
Peso específico seco γ_d (kN/m^3)	11.3	5.7
Relación de vacíos, e	1.3	3.4
Porosidad, n (%)	57	78
Límite líquido (%) ¹	-	103
Límite plástico (%)	-	77
Límite de contracción (%)	-	53
Humedad gravim. w (%)	41	97
Humedad volum. θ (%)	48	57

¹el suelo AL no exhibe plasticidad

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Elaboración de las curvas de retención de humedad

Se obtuvieron las curvas de retención de humedad de muestras naturales en procesos de secado y humedecimiento. Se elaboraron muestras en forma de platillo, de 12 cm de diámetro y 2.5 cm de altura aproximadamente. En el laboratorio, las muestras se humedecieron para obtener un estado cercano a la saturación, se envolvieron en láminas de plástico, y se dejaron curar durante 24 horas en un ambiente de temperatura constante 23°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). Las muestras no se consolidaron y tampoco se les aplicó ningún incremento de esfuerzo en el transcurso de los ensayos. Para los ensayos en proceso de humedecimiento, las muestras se secaron inicialmente al aire en el ambiente de laboratorio. Para que el secado al aire ocurriera de una manera gradual, éstas se envolvieron en una lámina de plástico.

Las mediciones de succión se realizaron mediante la técnica del papel de filtro, siguiendo un procedimiento practicado por Colmenares (2002) en el Imperial College de Londres. La medición de succión se hizo por contacto directo entre el papel de filtro Schleicher & Schuell No.589 y la cara plana de las muestras. El suelo y el papel de filtro se mantuvieron en contacto mediante la presión suave ejercida con discos de material acrílico. Estos discos se colocaron en ambas caras de la muestra, en forma de sandwich. La muestra ensamblada se aisló con láminas de plástico, y se colocó en un ambiente de temperatura controlada durante 7 días. Una vez cumplido el tiempo necesario para el equilibrio de humedad papel-suelo, se midieron las humedades, y se estimó la succión mediante la ecuación de calibración del papel de McQueen & Miller (1968) (En Fredlund y Rahardjo 1993).

4.2 Ensayos de resistencia al corte

Se realizaron ensayos de resistencia al corte de muestras naturales, con diferentes valores de esfuerzo normal y humedad, en procesos de secado y de humedecimiento. Se seleccionaron valores de la humedad para ensayo, distribuidos a lo largo del intervalo de succión, entre el estado saturado y el estado de saturación residual. También se hicieron ensayos en la condición saturada (con muestra inundada) y en la condición seca al aire. El tratamiento para el humedecimiento y secado de estas muestras fue el mismo dado a las muestras para elaborar las curvas de retención de humedad: las muestras saturadas se secaron suavemente y las muestras secas se humedecieron gradualmente, para obtener muestras con diferentes valores de humedad.

Para los ensayos de resistencia se utilizó una máquina convencional de corte directo, con muestras de sección cuadrada de 50 mm x 50 mm y espesor de 18 mm. Las muestras se consolidaron bajo esfuerzos de 12, 50 y 150 kPa. La cizalladura se aplicó a una velocidad de desplazamiento horizontal igual a 0.50 mm/min.

Al inicio y al final de cada ensayo, se realizaron mediciones de la humedad. En cada muestra se midieron dos valores de humedad gravimétrica; uno en cada mitad por encima y por debajo del plano de falla. Los volúmenes de la muestra se midieron al final de la etapa de consolidación. Para estimar la succión se utilizó la humedad volumétrica antes de comenzar la etapa de falla y la humedad gravimétrica al terminar dicha etapa. Se asumió que los cambios de volumen y de la cantidad de agua fueron muy pequeños, y no afectaron de manera significativa el valor de la succión durante la etapa de corte. En los ensayos con muestra inundada se asumió la condición saturada al inicio del ensayo.

5 RESULTADOS

5.1 Características de la relación suelo-agua

En la Figura 2 se muestran los resultados de la elaboración de las curvas de retención para los suelos de ceniza volcánica AL y LA. También, se presenta el ajuste

matemático de los valores experimentales, mediante el modelo propuesto por Fredlund y Xing (1994).

Las curvas de retención en proceso de secado iniciaron en un grado de saturación menor que 100%. Eso se debe a las limitaciones experimentales de la técnica de medición de succión que no permite el inicio de la curva de retención con el suelo inundado. Esto se evidencia aún más en este tipo de suelos, debido a su característica fábrica abierta. Para determinar los puntos característicos de la curva de retención de humedad en proceso de secado: el valor de entrada de aire y la succión residual, se aplicó el método gráfico sugerido por Vanapalli et al. (1998). De esta manera, se estimaron valores de entrada de aire iguales a 10 kPa y 5 kPa en los suelos LA y AL respectivamente. En el intervalo de succión alta no fue posible identificar con suficiente claridad un punto de inflexión en las curvas de retención. Por consiguiente, no se pudo determinar el valor de la succión residual mediante la técnica gráfica. Este tipo de dificultad está reportado en arcillas densas y en suelos con distribución bimodal de tamaños de los poros (Vanapalli et al. 1998). El valor de la succión residual fue asumido como una constante igual a 25000 kPa, cercana a la succión en el estado seco al aire.

En ambos suelos el comportamiento suelo-agua fue similar en el intervalo de tamaños de poros más grandes (> 3 μm aprox., succión < 100 kPa). En el intervalo de los poros más pequeños, para un mismo valor de humedad el suelo LA presentó una succión diez veces mayor que el suelo AL.

5.2 Resistencia al corte

Con base en las envolventes de resistencia al corte, trazadas para los ensayos realizados a valores del esfuerzo normal efectivo de 12, 50 y 150 kPa, se obtuvieron los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb (ver la Tabla 2). Se obtuvieron valores del ángulo de resistencia al corte pico entre 36° y 40°. Es interesante observar que en el suelo natural el valor de la cohesión de la arena limosa AL fue casi tres veces superior a la cohesión del limo arenoso LA, un comportamiento que no es consistente con la textura y plasticidad de estos suelos.

Tabla 2. Parámetros de Mohr-Coulomb

Suelo / Condición Ensayo	c' (kPa)	ϕ (°)
AL / Natural (inundado)	51	39.5
AL / Seco al aire (inundado)	22	36.1
LA / Natural (inundado)	16	36.7
LA / Seco al aire (inundado)	14	39.2

El secado aumentó el ángulo de resistencia al corte pico del limo arenoso (LA) y redujo el ángulo de resistencia al corte pico de la arena limosa (AL) (ver la Figura 3). Además, redujo la cohesión en ambos suelos. La reducción de la cohesión fue mucho más significativa en la arena limosa (AL), que perdió más de la mitad del valor de la cohesión respecto al valor de la cohesión del suelo natural. Esto sugiere que los efectos de la microestructura

son mayores en el suelo de textura más gruesa (AL) que en el suelo más fino (LA). El efecto neto del secado al aire fue el acercamiento de las envolventes de Mohr-Coulomb de los dos suelos estudiados, con una tendencia a representar un suelo único cuando se llevaron ambos suelos al estado seco.

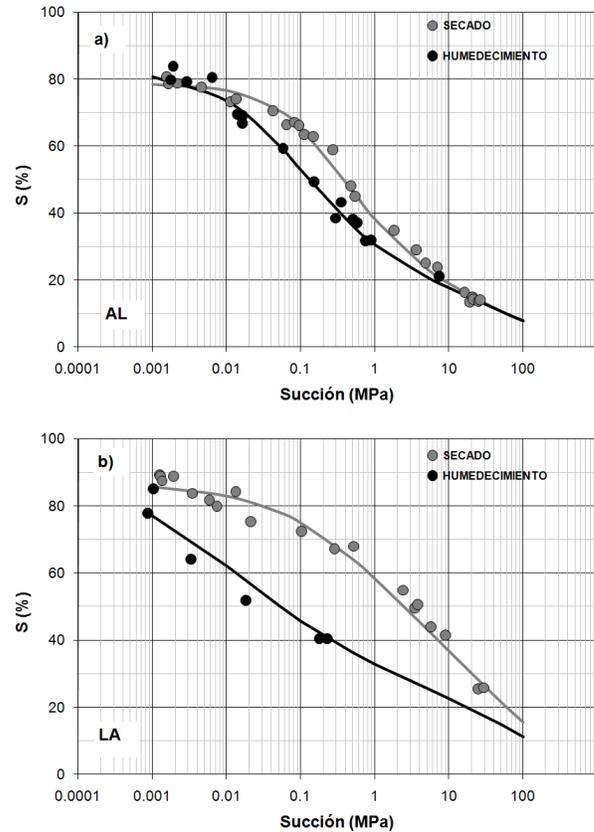


Figura 2. Curvas de retención de humedad, que relacionan la succión con el grado de saturación (S). a) curva del suelo AL; b) curva del suelo LA

El secado produjo el incremento de la resistencia al corte. La resistencia inicial del suelo inundado (casi saturado) se incrementó hasta un valor máximo, y luego disminuyó hasta un valor mínimo de resistencia con el suelo seco al aire. Ambos suelos alcanzaron el estado seco al aire con saturación cercana a $S=20\%$. El comportamiento fue similar para todos los valores del esfuerzo normal. En general, en el proceso de secado la resistencia al corte creció. En el suelo LA hasta que alcanzó valores de succión entre 4000 y 7000 kPa, y en el suelo AL hasta que la succión estuvo entre 800 y 1000 kPa. El incremento de la resistencia fue más acelerado para valores de succión relativamente bajos: hasta 150-200 kPa en LA y hasta 20-30 kPa en AL. Inmediatamente después ocurrió un descenso brusco de la resistencia, correspondiente a grados de saturación entre 60 y 70%. Algo similar sucedió en el proceso de humedecimiento, pero con valores del grado de saturación entre 30 y 40%.

5.3 Ecuaciones de resistencia al corte

Se determinaron los parámetros para los modelos empíricos de Öberg y Sällfors (1995), Vanapalli et al. (1996), Khalili y Khabbaz (1998) y Rassam y Cook (2002).

En la Figura 4 se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio y los modelos de resistencia al corte en función de la succión, para el intervalo de succión < 1500 kPa y un esfuerzo normal de 50 kPa. Las mejores predicciones de la resistencia se obtuvieron con los modelos de Vanapalli et al. (1996) y Khalili y Khabbaz (1998). En un intervalo de succión hasta 30000 kPa, estas ecuaciones modelaron la resistencia al corte de una forma adecuada, para los valores más pequeños y los más grandes de la succión. Las predicciones menos acertadas se observaron para los valores de succión entre 1500 y 7000 kPa. Este intervalo está asociado al estado residual de saturación.

Los parámetros para estos modelos se presentan en la Tabla 3. Los parámetros de los modelos de Öberg y Sällfors (1995) y Rassam y Cook (2002) se obtuvieron directamente del criterio de resistencia M-C.

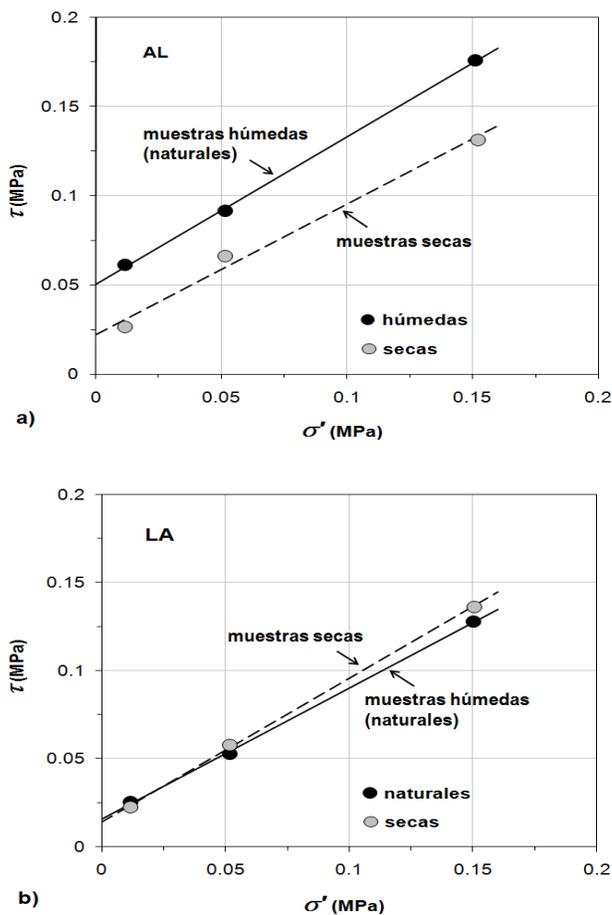


Figura 3. Envolventes de resistencia al corte pico

Los mejores ajustes a los valores de la resistencia al corte se encontraron con la ecuación de Vanapalli et al.

(1996) en el intervalo de succión menor a 1500 kPa (ver la Figura 5). En este intervalo se encuentran la mayoría de los problemas prácticos de ingeniería, y corresponde con humedades cercanas a la natural y grados de saturación mayores de 60%.

La mejor predicción de resistencia al corte se obtuvo para un esfuerzo normal de 12 kPa. Al respecto hay que notar que las curvas de retención de humedad se obtuvieron bajo un esfuerzo exterior nulo, sin consolidar el suelo natural. Eventualmente, al aplicar los esfuerzos normales de 50 y 150 kPa en los ensayos de resistencia al corte, pudo haberse excedido el esfuerzo vertical de cedencia. Si esto sucedió, se produjeron cambios en la fábrica del suelo que modificaron la distribución de tamaños de los poros. Esto sugiere la necesidad de elaborar la curva de retención de humedad bajo un estado de esfuerzos similar al estado durante la falla del suelo.

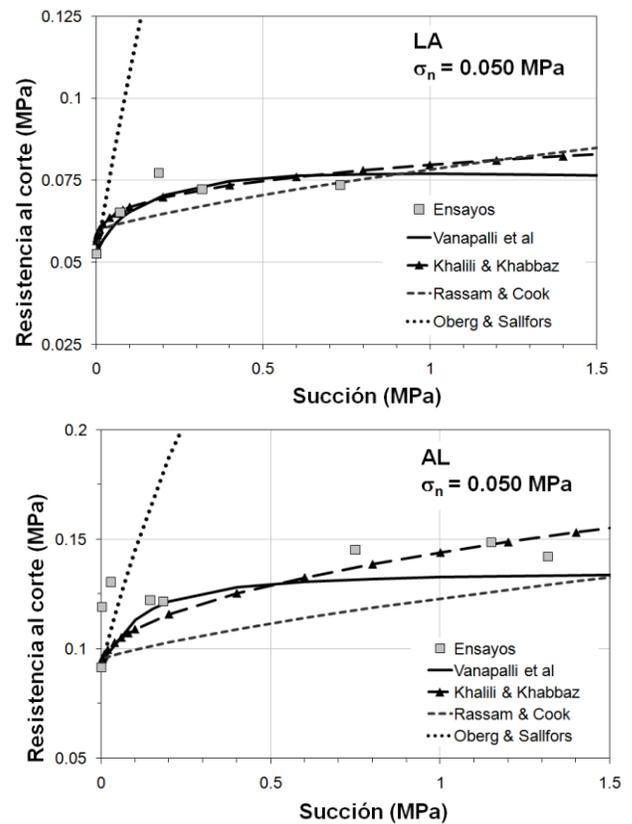


Figura 4. Comparación de modelos de resistencia al corte respecto a la succión, para suelos de ceniza volcánica.

Tabla 3. Parámetros de las ecuaciones de Vanapalli et al. (1996) y Khalili y Khabbaz (1998), succión < 1500 kPa.

Parámetro / Esfuerzo normal	AL	LA
κ / 12 kPa	3.7	6.8
κ / 50 kPa	2.8	6.2
κ / 150 kPa	2.6	5.5

M/ 12 kPa	-0.68	-0.82
M/ 50 kPa	-0.52	-0.72
M/ 150 kPa	-0.43	-0.67

También se modelaron los valores de la resistencia al corte en proceso de humedecimiento, por medio de las ecuaciones de Vanapalli *et al.* (1996b). Se observó que el parámetro κ converge hacia un valor único, alrededor de $\kappa=3$, para ambos tipos de suelo. Esta convergencia del parámetro κ hacia un valor único, es consistente con el acercamiento que tienen las envolventes de Mohr-Coulomb. Esto parece indicar que este tipo de suelos tiende hacia un comportamiento único, después de un ciclo secado-humedecimiento. Si esta suposición fuera válida, las diferencias de textura y plasticidad en estado natural, serían irrelevantes al momento de evaluar el comportamiento de la resistencia al corte después de ciclos de secado-humedecimiento.

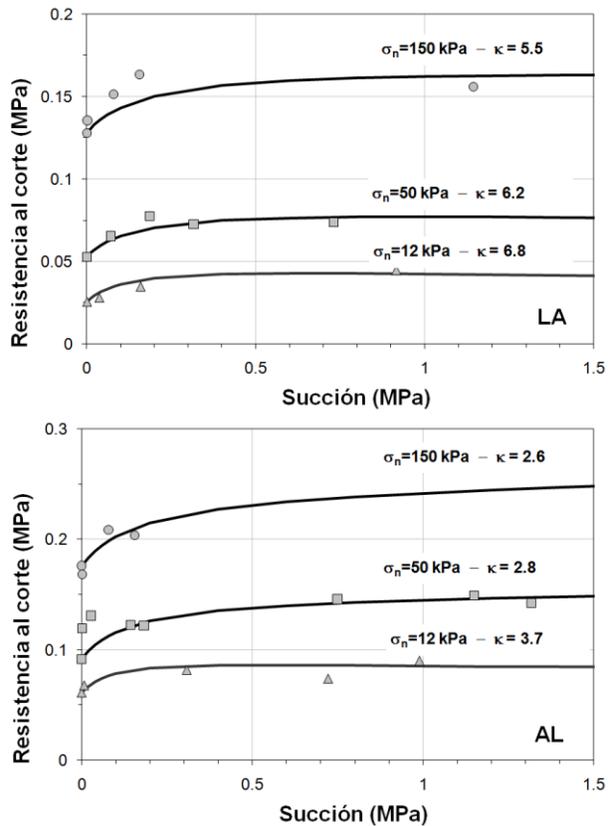


Figura 5. Resistencia al corte en función de la succión según la ecuación de Vanapalli *et al.* (1996).

La predicción de resultados observada en la Figura 5, indica que en la práctica de un laboratorio convencional de mecánica de suelos, podría obtenerse una adecuada predicción de resistencia mediante la Eq. 8 de Vanapalli *et al.* (1996). Ésta podría ser empleada en análisis preliminares o de prefactibilidad en suelos de ceniza volcánica similares a los estudiados. En dicha ecuación puede reemplazarse la humedad volumétrica normalizada

(θ) por el grado de saturación (S), que es utilizado de forma más rutinaria. Para los suelos más arenosos de ceniza volcánica, con plasticidad nula, un valor medio del parámetro $\kappa=3$ permite modelar de forma adecuada la resistencia al corte. Para los suelos más arcillosos o limosos, podría emplearse un parámetro $\kappa=6$. Para tener un concepto de la magnitud de la contribución de la succión a la resistencia se estimó la componente de cohesión por succión (denominada también como cohesión capilar) en función del grado de saturación (ver la Figura 6). Se observó que para grados de saturación menores de 60%, por seguridad es conveniente despreciar la contribución de la succión en la resistencia.

El modelo de Öberg y Sällfors (1995) no representó el comportamiento de los suelos estudiados, en ningún intervalo de la succión. Estos autores sugirieron la aplicación de este modelo a los suelos no arcillosos. Sin embargo, la resistencia al corte de suelos arenosos de ceniza volcánica no se pudo modelar, posiblemente debido a que estos suelos generalmente no presentan una distribución unimodal de tamaños de los poros. El modelo de Rassam & Cook (2002) tampoco hizo una predicción muy acertada de la resistencia, pero podría ser una buena opción como parte de un estimativo preliminar muy rápido, pues requiere solamente un ensayo de resistencia al corte en la condición de suelo parcialmente saturado.

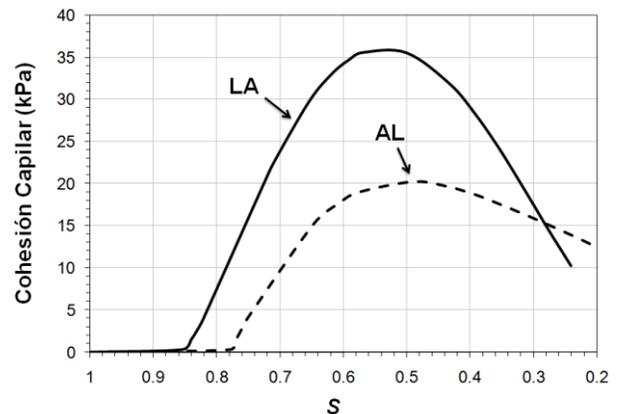


Figura 6. Componente de cohesión debida a la succión en función del grado de saturación.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron algunos modelos empíricos del criterio de resistencia M-C, aplicados a suelos de ceniza volcánica parcialmente saturados. Estos modelos fueron calibrados a partir de ensayos convencionales de corte directo, y de la elaboración de curvas de retención de humedad de los suelos en condición inalterada.

Los criterios de resistencia propuestos por Vanapalli *et al.* (1996) y Khalili & Khabbaz (1998), modelaron aceptablemente la resistencia al corte de las cenizas volcánicas naturales en procesos de secado y humedecimiento, especialmente en el intervalo de

succión < 1500 kPa. Mediante la aplicación de estos modelos es posible hacer una caracterización preliminar del suelo de ceniza volcánica para elaborar análisis de prefactibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el estímulo y soporte financiero suministrado por la Universidad del Quindío y la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

- Adachi, Y., and Karube, J. 1999. Application of a scaling law to the analysis of allophane aggregates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 151: 43-47.
- Bishop, A.W. 1959. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*(39): 859-863.
- Coleman, J.D. 1962. Stress/strain relations for partly saturated soil (correspondence). *Geotechnique*, 12(4): 348-350.
- Colmenares, J.E. 2002. *Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures*, University of London. Imperial College of Science, Technology and Medicine., London.
- Escario, V., and Juca, C. 1989. Strength and deformation of partly saturated soils. *In 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol.1, pp. 43-46.
- Escario, V., and Jucá, C. 1989. Strength and deformation of partly saturated soils. *In 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Rio de Janeiro, pp. 43-46.
- Fredlund, D.G., and Morgenstern, N.R. 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 103: 447-466.
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D.G., and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 521-532.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3): 313-321.
- Gan, J.K.M., and Fredlund, D.G. 1996. Shear strength characteristics of two saprolitic soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 595-609.
- Khalili, N., and Khabbaz, M.H. 1998. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, 48(5): 681-687.
- Maeda, T., Takenaka, H., and Warkentin, B.P. 1977. Physical properties of allophane soils. *In Advances in Agronomy*. Academic Press, Inc. pp. 229-264.
- Malagón, D., Pulido, C., and Llinás, R. 1991. Génesis y taxonomía de los andisoles colombianos. *Investigaciones IGAC*, 3(1): 1-95.
- Malagón, D., Pulido, C., Llinás, R.D., Chamorro, C., and Fernández, J. 1995. *Suelos de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. D.C.
- Miao, L., Yin, Z., and Liu, S. 2001. Empirical function representing the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 24(2): 220-223.
- Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olesen, T., Komatsu, T., and Rolston, D. 2003. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 67: 32-40.
- Nishimura, T., and Fredlund, D.G. 2000. Relationship between shear strength and matric suction in an unsaturated silty soil. *In Asian Conference on Unsaturated Soils*. A.A. Balkema, Singapore, pp. 563-568.
- Öberg, A., and Sällfors, G. 1995. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. *In First International Conference on Unsaturated Soils*. A.A. Balkema, Paris, pp. 151-158.
- Pinzón, A. 1992. Cambios en las propiedades físicas de los andisoles debidos al secado. *Investigaciones*, 4(1): 59-101.
- Rassam, D.W., and Cook, F. 2002. Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 25(2): 215-220.
- Rueda, H. 2000. *Depósitos de caída asociados a la actividad del Volcán Cerro Machín*. Título en Geología, Universidad de Caldas, Manizales.
- Sandoval, A. 2001. *Comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas del glacis del Quindío*. Magister, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Vanapalli, S.K. 2001. A simple experimental procedure for determining the fitting parameter, k for predicting the shear strength of an unsaturated soil. *In 54th Canadian Geotechnical Conference*, Calgary, pp. 622-629.
- Vanapalli, S.K., and Fredlund, D.G. 2000. Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. *In Geo-Denver 2000*. ASCE, Denver, pp. 195-209.
- Vanapalli, S.K., Sillers, W.S., and Fredlund, D.G. 1998. The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils. *In 51st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, Alberta.
- Vanapalli, S.K., Wright, A., and Fredlund, D.G. 2000. Shear strength behavior of a silty soil over the suction range from 0 to 1,000,000 kPa. *In 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, pp. 1161-1168.
- 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.
- Wesley, L.D. 2002. Geotechnical characterization and behaviour of allophane clays. *In International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*. Singapore.