

Compresibilidad de suelos no saturados

Compressibility for unsaturated soils

Eduardo Rojas González¹ y **J. Alfredo Zepeda Garrido¹** Profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro

RESUMEN. La compresibilidad de los suelos no saturados depende de su grado de saturación (o del valor de la succión, ya que ambas cantidades están relacionadas por medio de la curva característica del material) así como de la historia de secado-humedecimiento del suelo debido al fenómeno de histéresis. En este artículo se muestran los resultados de una serie de ensayos odométricos a succión controlada con los cuales se pudo determinar la compresibilidad del suelo para diversos valores de la succión. Estos resultados muestran que la compresibilidad de un suelo no saturado se puede escribir como la suma del producto de la fracción saturada y no saturada multiplicada por su respectiva compresibilidad. De esta manera, resulta que el principio de la ecuación de resistencia al cortante de los suelos no saturados es también válido para modelar el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados.

Palabras Clave: Compresibilidad, succión, suelos no saturados

1. ANTECEDENTES

La ecuación de esfuerzos efectivos de Bishop ha resurgido como una variable de estado dentro de los modelos constitutivos para suelos no saturados (Wheeler et al 2003, Tamagnini 2004). El uso de esta ecuación ha permitido establecer modelos más sencillos que arrojan resultados más realistas comparados con los modelos que hacen uso de las llamadas variables independientes de esfuerzo (como son el esfuerzo neto y la succión). Sin embargo, hasta ahora, la ecuación de Bishop solo se ha utilizado para modelar el comportamiento de los suelos no saturados sujetos a esfuerzo cortante pero no para modelar su comportamiento volumétrico.

La ecuación original de Bishop se escribe como

$$\sigma^* = \sigma - u_a + s\chi \quad (1)$$

en donde σ^* representa el esfuerzo de Bishop, σ es el esfuerzo total, $s = u_a - u_w$ es la succión que representa la diferencia entre la presión de aire (u_a) y la presión de agua (u_w) y χ es el parámetro de Bishop. Bishop no pudo establecer ninguna relación con la cual se pudiera determinar el valor del parámetro χ , sin embargo, en una versión simplificada, este parámetro se ha aproximado al grado de saturación del suelo (Oberg y Salfors, 1995). Recientemente, se ha podido demostrar que el valor de χ depende de la forma en la que el agua se distribuye al interior del suelo y esa distribución se puede obtener a partir del modelado de los poros del suelo (Rojas 2006).

El volumen de vacíos de un suelo se puede considerar como un conjunto de poros de muy diversos tamaños entre los cuales se encuentran distribuidos los sólidos. De acuerdo con las mediciones de algunos investigadores utilizando el método de intrusión de mercurio (Simms y Yanful, 2001), la distribución de poros de un suelo se puede representar aproximadamente como una función de distribución normal en los ejes de volumen de poros contra el logaritmo del tamaño del poro. Los tamaños de poro que se pueden medir por este procedimiento pueden ir desde una centésima de micra hasta doscientas micras. Aunque todavía existen algunos poros mayores y menores a estos tamaños en los suelos, el volumen que estos ocupan es pequeño comparado con el resto de los poros. Esto se sabe ya que el volumen de vacíos que se puede obtener a partir de las mediciones de porosimetría es del orden del 80 al 90% del volumen de vacíos real del suelo.

Se conoce que el fenómeno de llenado y vaciado de los poros de un suelo se rige por la ecuación de Laplace, la cual se escribe como

$$u_a - u_w = 2T / R_c \quad (2)$$

en donde T es la tensión superficial de la interfase aire-agua y R_c es el radio máximo que puede tener un elemento para poder llenarse con la fase líquida. Si consideramos que una red porosa interconectada consta de un gran número de cavidades y de una serie de gargantas o canales que enlaza a cada uno de los poros entre sí, podemos decir que dicha red está conformada por dos tipos de elementos: los sitios o cavidades y los enlaces o gargantas. Los sitios son aquellos poros que

pueden contener un volumen importante de líquido y producen los resultados de las pruebas de porosimetría. Por el contrario, los enlaces son únicamente gargantas que ligan a los poros entre sí y contienen un volumen muy reducido de líquido. Esto se puede observar cuando se estudian los huecos que forman arreglos de esferas de diversos tamaños. Sin embargo, los enlaces juegan un papel muy importante en el fenómeno de secado del material ya que para que un sitio pueda drenar el líquido, es necesario que al menos una de las gargantas o enlaces que lo rodean tenga un radio superior al crítico. Esto quiere decir que cuando se aplica un cierto valor de succión, todos aquellos poros de radio igual o inferior al radio crítico (R_c) permanecerán saturados. Solo aquellos poros de radio mayor al crítico son susceptibles de drenar el líquido. Este fenómeno se muestra en la Figura 1.

Por el contrario, cuando un suelo se humedece, el fenómeno se inicia con los poros sin líquido y un valor muy alto de succión. Al disminuir la succión, primeramente el agua penetra los poros de menor tamaño (enlaces) oponiéndose al humedecimiento los de mayor tamaño (sitios). Conforme la succión se reduce los sitios comienzan a llenarse de líquido y el avance del frente húmedo se realiza paulatinamente a medida que los sitios se van saturando. Este fenómeno se muestra en la Figura 2.

Cuando se observa la estructura de un suelo natural a través del microscopio, se puede comprobar que se presenta el fenómeno de segregación, es decir, que existen zonas de poros pequeños y zonas de poros grandes entre las cuales se ubican las zonas con poros de tamaño intermedio. Los poros pequeños se forman por el aglutinamiento de partículas arcillosas en forma de paquetes. Estos paquetes se encuentran rodeados por estructuras de partículas mayores de limo o arena. Este fenómeno de segregación provoca que durante los fenómenos de secado y humedecimiento de un suelo se presenten zonas saturadas y zonas no saturadas. En las primeras todos los poros están saturados y las partículas interiores se encuentran rodeadas de agua. En las segundas, las partículas se encuentran primordialmente rodeadas de aire con meniscos aislados de interfase agua-aire que ligan unas partículas con otras.

Además, las zonas saturadas (que están conformadas por partículas finas) están delimitadas en todo su perímetro por poros pequeños con meniscos de interfase agua-aire que presentan el mismo radio de curvatura que los meniscos de las zonas no saturadas. Por lo tanto, la presión de agua dentro de la zona saturada toma el

mismo valor que en las zonas no saturadas y por lo tanto la succión es la misma en ambas zonas.

Mediante un análisis estático de los esfuerzos, áreas y volúmenes involucrados en cada zona, se puede obtener a la siguiente ecuación (Rojas, 2006):

$$\sigma_i^* = \sigma_i - u_a + (u_a - u_w)(f_s + S_w^u(1 - f_s)) \quad (3)$$

En donde σ_i^* representa el esfuerzo equivalente en la dirección i , $f_s = V^s/V$ es la fracción de suelo saturado que se obtiene con el cociente del volumen de suelo saturado (incluyendo vacíos y sólidos) entre el volumen total de suelo. Finalmente, S_w^u representa el grado de saturación de la fracción no saturada. Esta ecuación tiene una interpretación sencilla: cuando se trata de un suelo completamente saturado $f_s = 1$ y se obtiene la ecuación de esfuerzos efectivos de Terzaghi. Si se trata con un suelo el cual posee únicamente meniscos sin fracción saturada, como puede ser el caso de una arena limpia de granulometría uniforme, entonces $f_s = 0$ y se obtiene la ecuación de esfuerzos de Bishop. De acuerdo con algunas comparaciones experimentales, se ha podido establecer que la ecuación (3) representa adecuadamente el esfuerzo relacionado con la resistencia al cortante en los suelos no saturados (Rojas, 2006). Por otro lado, el parámetro f_s toma valores cercanos (aunque no iguales) al grado de saturación global del suelo, de ahí el relativo éxito que ha tenido el uso de la ecuación simplificada de Bishop para explicar la resistencia al cortante de los suelos no saturados.

Para establecer el valor de los parámetros f_s y S_w^u es necesario recurrir a los modelos micromecánicos que puedan simular los fenómenos de secado y humedecimiento de los suelos incluyendo el fenómeno de histéresis de la curva característica. Además es necesario que puedan simular la estructura sólida. Este tipo de modelos debe contar al menos con cuatro tipos de elementos: los sitios o poros, los enlaces o gargantas, los macroporos y los sólidos. Los sitios y enlaces forman una red porosa en donde se introducen los macroporos. Estos últimos son poros de grandes dimensiones que, de acuerdo con Simms y Yanful (2001), colapsan ante un incremento de la succión. La figura 3 muestra una porción de una red porosa con sus cuatro elementos.

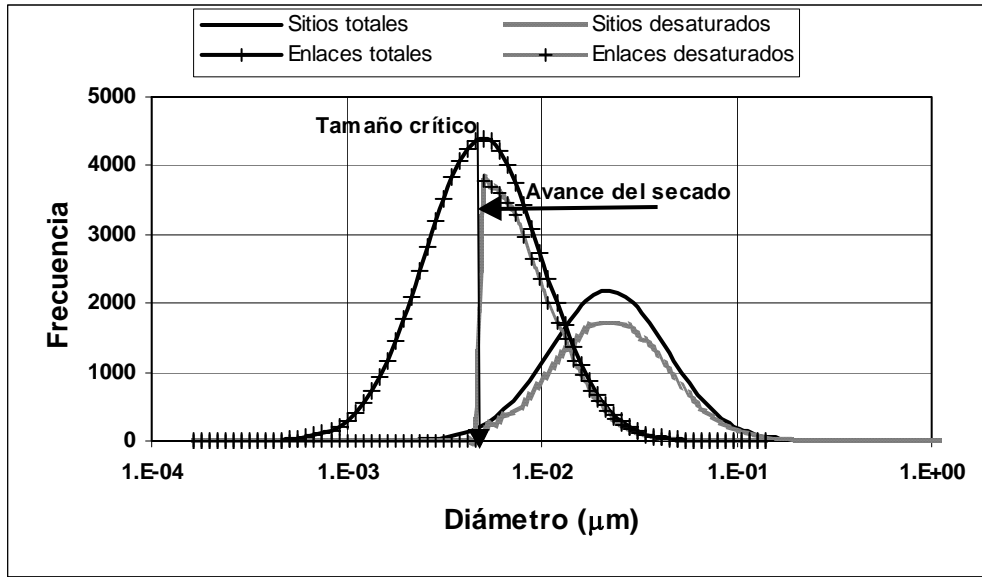


Figura 1. Secado de una red porosa. Los enlaces regulan el fenómeno.

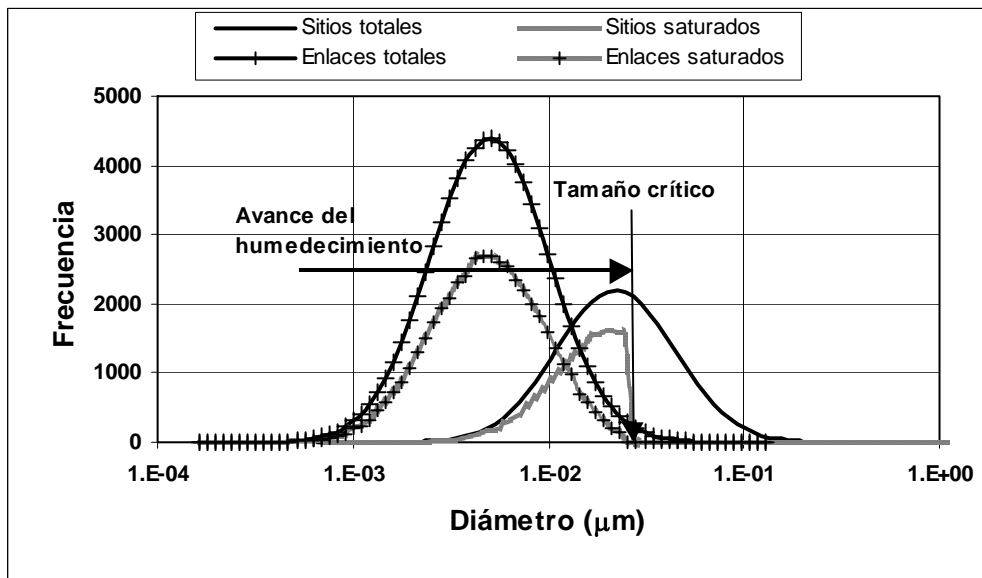


Figura 2. Humedecimiento de un área porosa. Los sitios regulan el fenómeno.

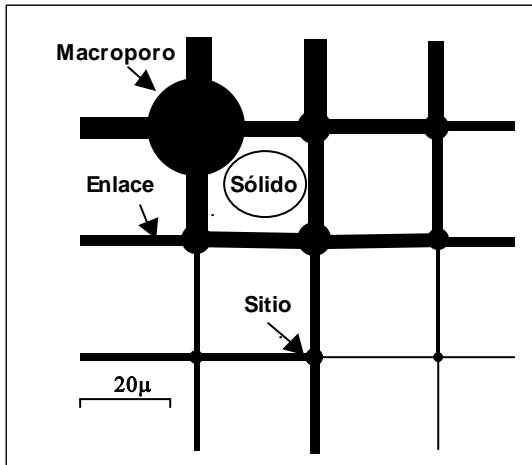


Figura 3. Elementos de un modelo micromecánico.

Para desarrollar un modelo micromecánico se puede proceder de la siguiente manera. El tamaño de cada elemento poroso (sitios, enlaces macroporos) se toma de los resultados de las pruebas de porosimetría por intrusión de mercurio. El tamaño de las partículas se obtiene del análisis granulométrico por vía seca y húmeda. Con estos datos y el tamaño de la red (la cual se recomienda que sea al menos de 100x100x100 elementos) se puede definir el número de partículas y poros de cada tamaño que se necesita ubicar dentro de la red porosa.

En primera instancia, los sitios y enlaces se colocan siguiendo un procedimiento estocástico. Sin embargo, dado que los enlaces no pueden ser mayores que los sitios, entonces se realizan una serie de correcciones entre las posiciones de los elementos hasta lograr que la red sea físicamente posible. Este proceso produce el fenómeno de segregación en donde los poros pequeños tienden a ubicarse en ciertas zonas rodeadas de poros medios y estos a su vez de los mayores. Este resultado provoca que la red porosa adquiera una estructura similar a la de un suelo real en donde existen paquetes de material fino rodeados de partículas mayores. Una vez definidas las posiciones finales de sitios y enlaces, se colocan los macroporos de acuerdo a un procedimiento también estocástico, ya que siendo mayores que los sitios no perturban la pertinencia de la red. Finalmente se colocan los sólidos. Dado que existe una relación entre tamaño de poro y tamaño de partícula, los sólidos se colocan dependiendo de los tamaños de poros que le rodean.

Una vez establecidas las posiciones de todos los elementos dentro de la red, es posible simular los procesos de humedecimiento y secado. Para ellos se establecen las reglas que rigen cada fenómeno. Por ejemplo para que un poro que se encuentra lleno de gas

pueda saturarse con líquido, es necesario, primero, que su radio sea inferior o igual al radio crítico R_c de acuerdo a la ecuación de Laplace, segundo, que al menos uno de los enlaces que lo rodean se encuentre ya saturado y finalmente, que el gas pueda salir por otro de los enlaces para conducirlo al exterior de la red. Todos estos procesos se pueden integrar dentro de un programa de computo con el cual se pueden obtener las curvas de humedecimiento y secado del suelo (Rojas y Rojas 2005), así como los parámetros f_s y S_w^u requeridos para obtener los esfuerzos equivalentes del suelo.

Todo este procedimiento se ha aplicado para estudiar el fenómeno de resistencia al cortante de los suelos no saturados. Sin embargo, hasta ahora no se ha podido definir si el mismo principio de esfuerzos equivalentes se puede aplicar para estudiar el comportamiento volumétrico de estos materiales. Para analizar esta posibilidad se realizaron una serie de ensayos odométricos a succión controlada en donde se determinó el valor de la compresibilidad del suelo para diversas succiones. El equipo, material y procedimiento utilizado se detallan en la siguiente sección.

2. EQUIPO MATERIAL Y PROCEDIMIENTO

Los ensayos se realizaron en un odómetro de banco de succión controlada. Para aplicar la succión se recurre al principio de traslación de ejes, de tal manera que se aplica una presión de aire superior a la presión de agua y su diferencia es el valor de la succión aplicada a la muestra de suelo. La presión de aire se aplica por la parte superior del odómetro mientras que la presión de agua se aplica por la parte inferior por medio de un disco de cerámica de alto valor de entrada de aire. La presión de aire se regula por medio de un manómetro mientras que la presión de agua así como el volumen que entra o sale de la cámara se mide mediante un aparato GDS de tornillo capaz de regular la presión a ± 2 kPa y medir volúmenes de agua de 1 mm^3 .

El material utilizado consistió en un limo arcilloso de la presa de Búfalo, cercana a Sydney, Australia. Sus características se especifican en la Tabla 1.

Límite líquido (%)	39.6
Límite plástico (%)	23.7
Peso específico de sólidos	2.69
Valor de entrada de aire	100
Peso seco óptimo (kN/m^3)	17.5
Contenido de agua óptimo (%)	18.4

La curva granulométrica del material obtenida por vía seca y húmeda se muestra en la Figura 4. La curva de

porosimetría por intrusión de mercurio se muestra en la Figura 5 y la Figura 6 muestra la curva característica de secado que es la trayectoria que se siguió durante todos los ensayos.

El material se mezcló con un volumen de agua igual a dos veces el límite líquido para obtener una mezcla de suelo prácticamente saturada. En esas condiciones se colocó en el odómetro y se consolidó aplicando incrementos de carga hasta alcanzar presiones de al menos 200 kPa de esfuerzo axial. Cada nuevo incremento se aplicaba hasta que el material terminaba de deformarse. Una vez alcanzado el esfuerzo máximo, el material se descargaba hasta un esfuerzo de 10kPa y en esas condiciones se aplicaba las presiones de aire y agua necesarias para lograr la succión requerida. Una vez que el material drenaba el agua necesaria para alcanzar el equilibrio por la succión impuesta, se recargaba la muestra y se llevaba a valores de esfuerzo axial cercanos al límite de carga del odómetro (1000 kPa). Se decidió utilizar este procedimiento de carga para asegurarse que la succión se aplicaba dentro del rango elástico del material de manera que al aplicar la

succión el material mostrara únicamente comportamiento elástico y durante la recarga se observara con precisión el esfuerzo de fluencia del material.

Una vez terminada la etapa de carga, la muestra se pesaba, medía y secaba para obtener su contenido de agua y corroborar los valores obtenidos de deformaciones y volúmenes drenados de agua. En general se observó una muy buena concordancia en las mediciones realizadas.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras 7 y 8 se muestran los resultados de los ensayos realizados con valores de 200 y 400 kPa de succión respectivamente. Las gráficas se muestran en los ejes de esfuerzos efectivos (obtenidos a partir de la Ec 3) contra relación de vacíos. La pendiente de la curva de compresión virgen mostró valores de 0.22 a 0.24 en todos los ensayos. En las gráficas también se muestran

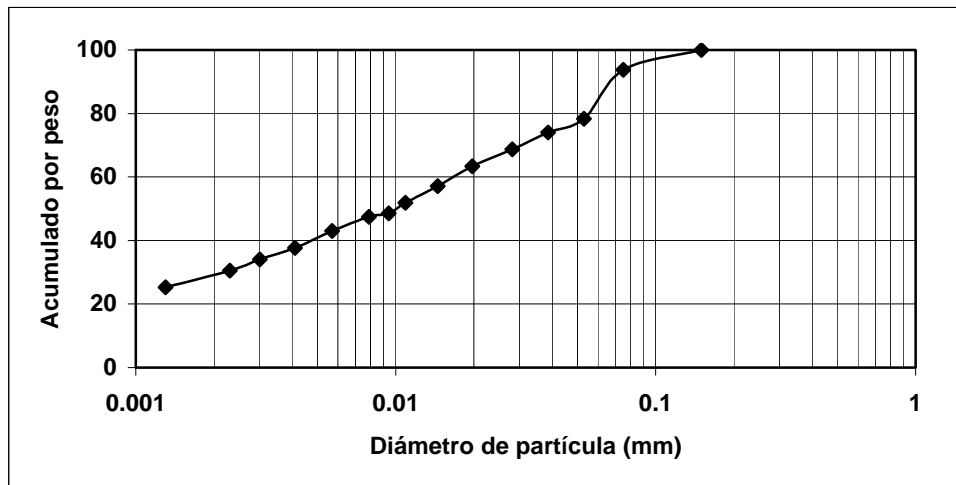


Figura 4. Curva granulométrica del material ensayado.

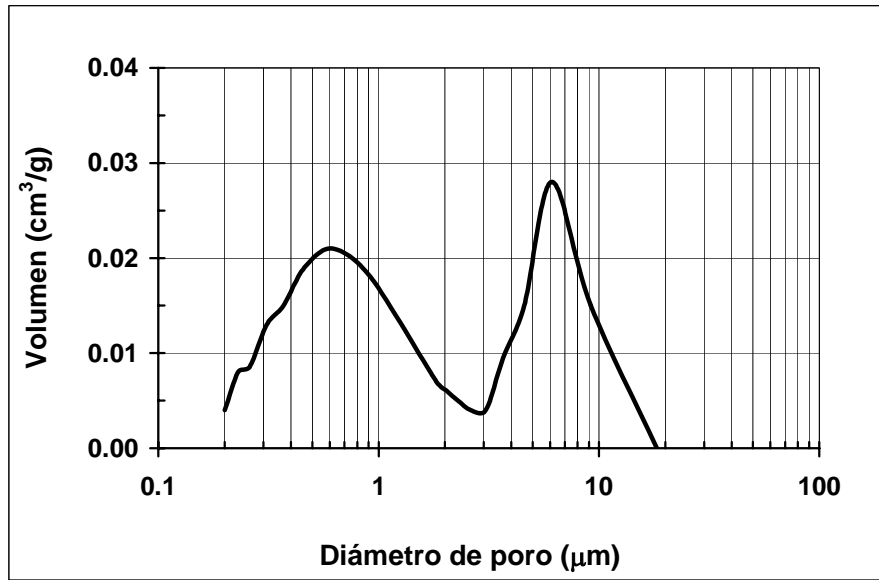


Figura 5. Porosimetría por intrusión de mercurio

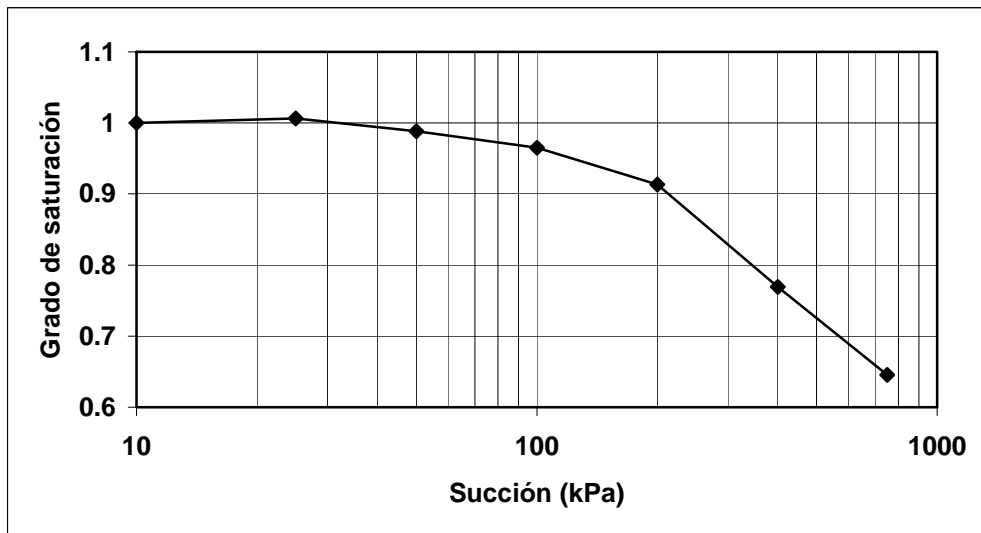


Figura 6. Curva característica de secado.

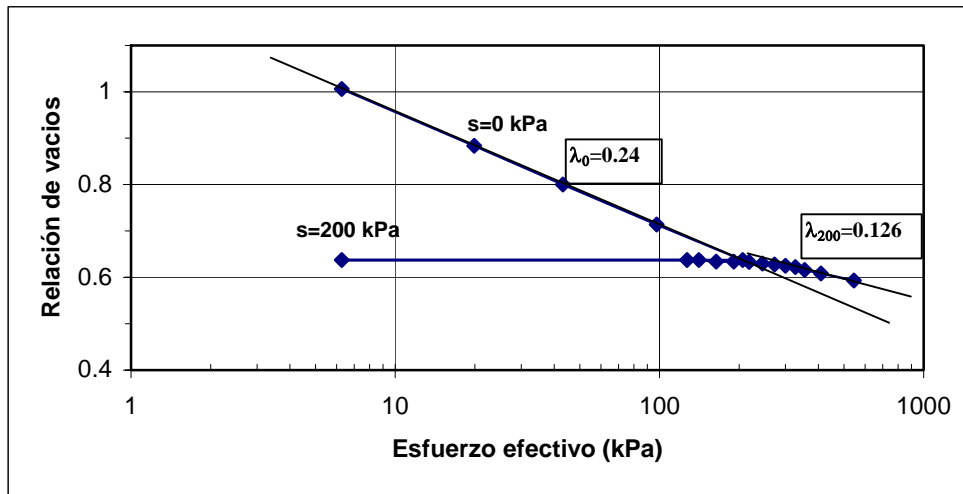


Figura 7. Ensaye odométrico con succión de 200 kPa

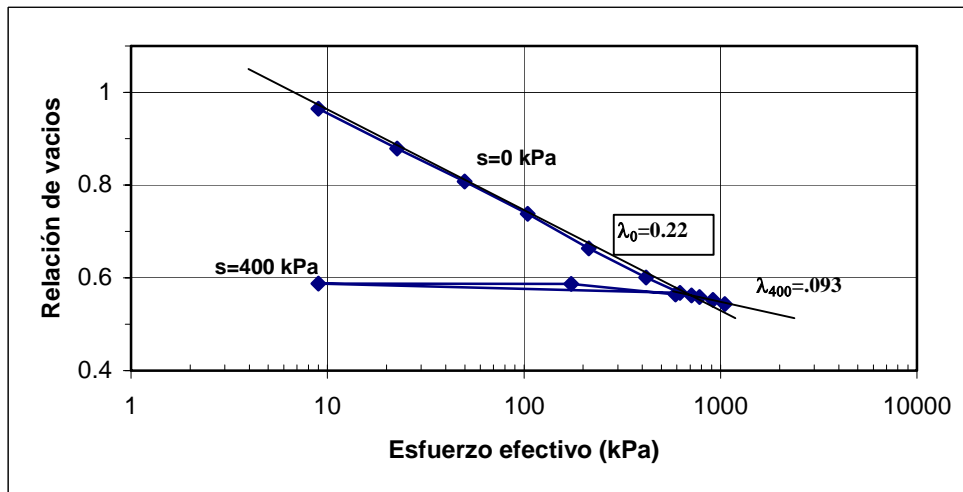


Figura 8. Ensaye odométrico con succión de 400 kPa

los valores de la pendiente de compresión para ambas succiones. En la Figura 7 se presentan las diversas pendientes de la curva de compresión en función de la succión aplicada. Lo que salta a la vista en esta figura es que la pendiente de compresión del suelo en función

de la succión toma una forma similar a la curva característica del suelo. De tal manera que no es difícil suponer que la pendiente de compresión es función del grado de saturación del material.

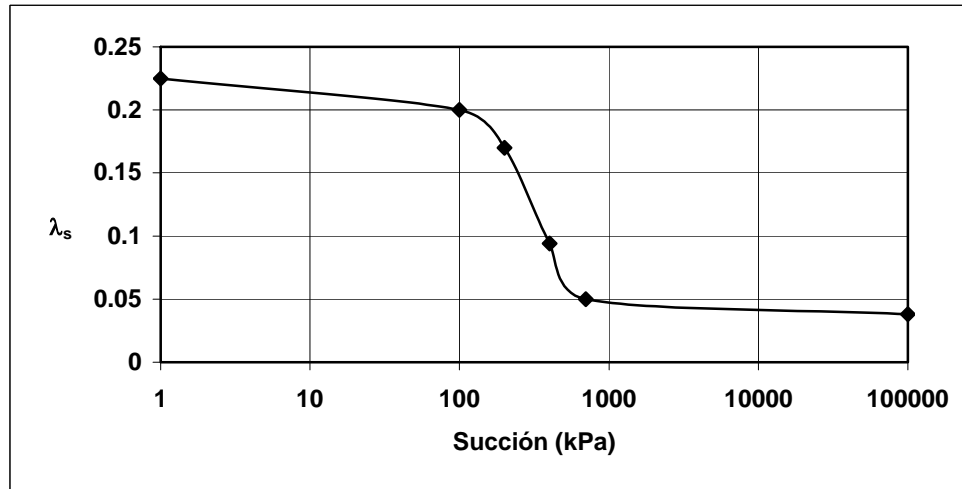


Figura 9. Pendiente de la curva de compresión en función de la succión aplicada.

4. MODELO PROPUESTO

De las ecuaciones (1) y (3) se puede obtener la siguiente relación para el parámetro χ de resistencia al cortante

$$\chi = S_w^s f_s + S_w^u (1 - f_s) \quad (4)$$

En donde se ha agregado el término S_w^s que representa el grado de saturación de la fracción saturada y que por lo tanto, siempre es igual a la unidad.

De acuerdo con la relación anterior, se propone la siguiente ecuación para determinar la pendiente de la curva de compresibilidad (λ_s) de los suelos no saturados

$$\lambda_s = C_s f_s + C_d (1 - f_s) \quad (5)$$

En donde C_s y C_d representan las pendientes de compresibilidad del suelo saturado y seco, respectivamente. De tal manera que las deformaciones volumétricas de un suelo sujeto a una succión s se pueden obtener con la relación

$$\Delta e = \lambda_s \log \frac{\sigma_f}{\sigma_i} \quad (6)$$

En donde Δe es la reducción en la relación de vacíos, σ_f / σ_i es la relación entre el esfuerzo final y el inicial.

5. COMPARACION ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES

Con los datos de granulometría y porosimetría del suelo empleado en los ensayos odométricos, se obtienen los parámetros del modelo micromecánico y de ahí es posible simular el humedecimiento y secado del material. En este caso se simuló un secado a partir de un estado saturado hasta el valor de succión considerado y de esa manera se obtuvo el parámetro f_s que representa la fracción saturada del material. También se requiere de los parámetros C_s y C_d que se obtienen al ensayar las muestras saturadas y completamente secas del suelo. Con estos valores y por medio de la ecuación 5 se obtuvieron los valores teóricos de compresibilidad λ_s del suelo. La Figura 10 muestra la comparación entre los resultados teóricos y experimentales. Como se puede observar, la comparación de resultados es bastante satisfactoria.

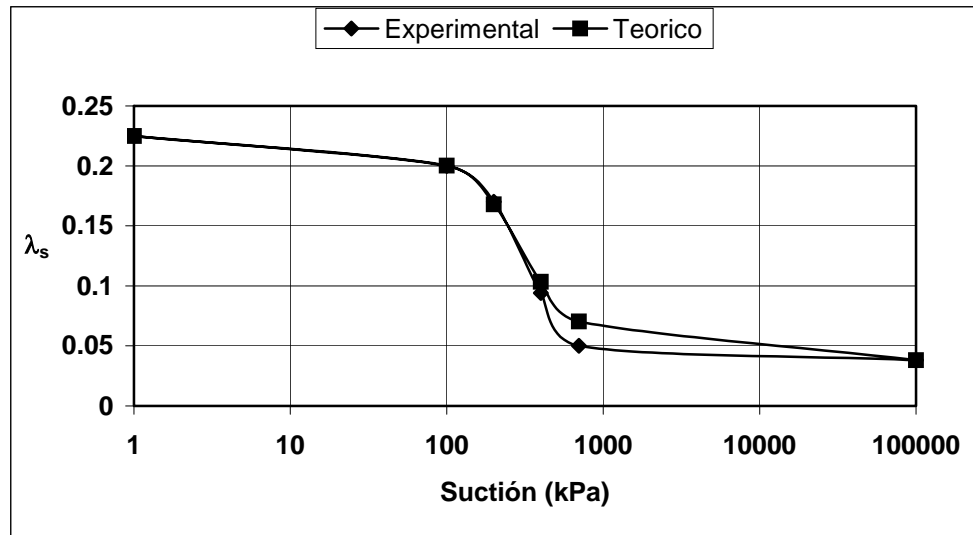


Figura 10. Comparación de resultados teóricos experimentales.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los resultados de algunos ensayos de compresión efectuados en un odómetro de succión controlada. Se obtuvieron las pendientes de compresibilidad del suelo para diversas succiones y se propuso una ecuación que permite determinar el valor de esa pendiente a partir del mismo principio que rige la resistencia de los suelos no saturados. Los parámetros del modelo se obtienen a partir de dos ensayos de compresibilidad: uno con una muestra saturada y otro con una seca. Además se requieren los parámetros del modelo micromecánico para encontrar el valor del parámetro f_s que representa la fracción saturada del suelo a diversas succiones. Para ello se requiere del análisis granulométrico del suelo por vía seca y húmeda y de su curva porosimétrica por intrusión de mercurio.

6. REFERENCIAS

Oberg A-L. y Sallfors G., 1995, A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils, 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, vol 1, 151-158.

Rojas E. y Rojas F., 2005, Modelling hysteresis of the soil-water characteristic curve, *Soil & Foundations*, 45(3), 1-11.

Rojas E., 2006, Equivalent stress for unsaturated soils, 3rd Int. Conf. On Unsaturated Soils, Arizona, USA, (aceptado para publicar).

Simms P.H. y Yanful E.K. (2001), Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests. *Can. Geotechnical J.*, 38, 741-754.

Tamagnini R., 2004, An extended Cam-Clay model for unsaturated soils with hydraulic hysteresis, *Geotechnique*, 54(3), 223-228.

Wheeler S.J., Sharma R.S. and Buisson M.S.R., 2003, Coupling hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils, *Geotechnique* 53(1), 41-54.