

DEFORMACIONES VOLUMÉTRICAS CON Y SIN COLAPSO DE ALGUNOS SUELOS NO SATURADOS

Por

Miguel Angel Alfaro Soto¹

Resumen

Alfaro Soto, M. A.: Deformaciones volumétricas con y sin colapso de algunos suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 355-362, 2007. ISSN 0370-3908.

Este artículo presenta el análisis de resultados de deformaciones producidas al utilizar dos trayectorias de tensiones con y sin la generación del colapso en algunos suelos arenosos y limosos saturados y no saturados. Para ese objetivo fue necesario el uso de un edómetro convencional y particularmente, un otro, que permite la imposición de la succión para el estudio deformacional de suelos no saturados. Los resultados mostraron la influencia del grado de saturación en la deformación de los suelos no saturados y principalmente en el comportamiento de un suelo colapsable. En la práctica, esos procesos mecánicos pueden ocasionar, efectos indeseados caso no sean llevados en consideración en los diseños.

Palabras clave: Deformaciones volumétricas, edómetro con control de succión, suelo no saturado.

Abstract

This paper presents the analysis of results of deformations produced when using two stress paths with or without the generation of the collapse in some sandy and silty saturated and unsaturated soils. For that objective, the oedometer conventional and particularly, another that allows the suction control for deformational unsaturated soils studies were necessary to use. The results showed the influence of the saturation degree in the deformation of unsaturated soils and principally, in the collapsible soil behavior. In the practice, those mechanical processes could cause, undesired effects if there were not considered in the projects.

Key words: Volumetric deformations, oedometer with suction controlled, unsaturated soil.

¹ Doctor, Laboratorio de Estudos de Bacias (LEBAC), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro – SP, Brasil, alfaro@rc.unesp.br.

Introducción

Son de gran importancia las deformaciones que pueden ocurrir en los suelos o en las estructuras apoyadas sobre ellos, cuando son causadas debido a aumentos de humedad por efectos de infiltración natural o causadas por el hombre. Aunque se tenga conocimiento de esto, difícilmente se ha observado diseños que lleven en consideración esos efectos. Un caso particular de la deformación es el colapso de suelos porosos naturales que se destacan por ser los causadores de varios problemas de la ingeniería, interfiriendo en las soluciones de diseños o afectando obras como: canales, terraplenes, cortes de talud, túneles y diferentes obras de la construcción civil.

Se define como colapso al fenómeno caracterizado por la brusca reducción de volumen ocasionado por el aumento de la humedad, con presencia o no de sobrecarga (Dudley, 1970).

Los suelos colapsables pueden constituirse en diferentes depósitos de suelos como: eólicos, aluvionales, coluvionales, residuales, flujos de lodo y terraplenes compactados. La formación de esos depósitos depende de las variaciones climáticas y el ambiente geológico (Dudley, 1970; Aragão & Melo, 1982).

Las características de los suelos colapsables dependen de la estructura que pueden presentar. Su estructura se muestra macro-porosa, donde las partículas menores se mantienen en equilibrio meta-estable por la presencia de un vínculo que es capaz de ofrecer al suelo una resistencia adicional temporal, proveniente de las tensiones capilares, fuerzas electromagnéticas de superficie y la presencia de sustancias cementantes, como óxido de hierro y carbonatos (Dudley, 1970).

El humedecimiento de estos suelos provoca la destrucción de las fuerzas estabilizadoras, con una disminución de la resistencia de ese suelo, lo que provoca, un desplazamiento relativo entre las partículas, de tal forma que, estas pasan a ocupar los espacios vacíos de la estructura del suelo lo que resulta en la reducción brusca del índice de vacíos.

Ensayos de laboratorio y campo pueden ser realizados con la finalidad de identificar y cuantificar el grado de colapsabilidad de los suelos.

Entre los ensayos de campo Ferreira & Lacerda (1993), desarrollaron el "expanso-colapsómetro", aparato destinado para medir las deformaciones volumétricas *in situ*. Los autores, afirman que, ese aparato permite medir deformaciones con control del caudal de inundación siendo

posible realizar en campo, ensayos similares a los edométricos doble y simple utilizados en laboratorio.

Los ensayos de laboratorio son destinados a identificar e evaluar la estructura del suelo y pueden ser realizados con ensayos químicos, difracción de rayo X y microscopio electrónico.

Otros ensayos de laboratorio son realizados en edómetros, que permiten una previsión de la deformación resultante del colapso estructural del suelo, así como, parámetros cualitativos del grado del colapso. Existen dos modalidades de procedimientos de ensayos. La primera, corresponde al ensayo edométrico simple realizado con una muestra de suelo inundada para una determinada tensión de interés y la segunda, es el ensayo edométrico doble, realizado con dos muestras, una con humedad natural y otra inundada en el inicio del ensayo. Detalles de estos procedimientos pueden ser encontrados en Jennings & Knight (1975).

Criterios de identificación y clasificación de suelos colapsables se encuentran disponibles en la literatura especializada y son basados en los índices físicos, límites de consistencia (Denisov, 1951; Gibbs & Bara, 1967; Reznik, 1989), así como, criterios que utilizan los resultados del ensayo de adensamiento con inundación de la muestra de suelo (Jennings & Knight, 1957). Un resumen de los diferentes criterios de identificación o clasificación pueden ser encontrados en Vilar *et al.*, (1981).

Los criterios basados en los índices físicos y límites de consistencia ofrecen una caracterización cualitativa, en cuanto los basados en ensayos de adensamiento permiten, adicionalmente, evaluar la magnitud de las deformaciones provenientes del colapso de la estructura del suelo.

Edómetro para medición de los cambios de volumen con imposición de la succión

La medición de los parámetros o variables del estado tensional de los suelos no saturados necesitan de un aparato especial que permita un control de las presiones de aire, agua y tensión total. Diversos aparatos de compresión confinada y triaxiales con imposición de la succión han sido desarrollados utilizando diferentes métodos o técnicas con la finalidad de analizar la deformabilidad de los suelos no saturados. Una de las técnicas adaptadas a los equipamientos de compresión confinada, es el edómetro basado en la técnica de translación de ejes.

Utilizado inicialmente en aparatos (cámaras o membranas de presión en laboratorio) para determinación de

la capacidad de retención de agua en el suelo Escario (1967, 1969) e posteriormente, Barden *et al.*, (1969), Moore & Millar (1971), Fredlund & Morgenstern (1976) adaptaron el método de translación de ejes (Hilf, 1956) a una célula edométrica. La Figura 1 ilustra el edómetro basado en la técnica de translación de ejes desarrollado por Escario (1967, 1969).

El aparato básicamente consiste en una célula provista de una placa porosa de alto valor de entrada de aire (junto con una membrana semipermeable para succiones mayores que 1.500 y menores que 10.000 kPa) y de un pistón vertical a través del cual es posible la aplicación de las tensiones normales, así como, la medición de los cambios de volumen de la muestra de suelo.

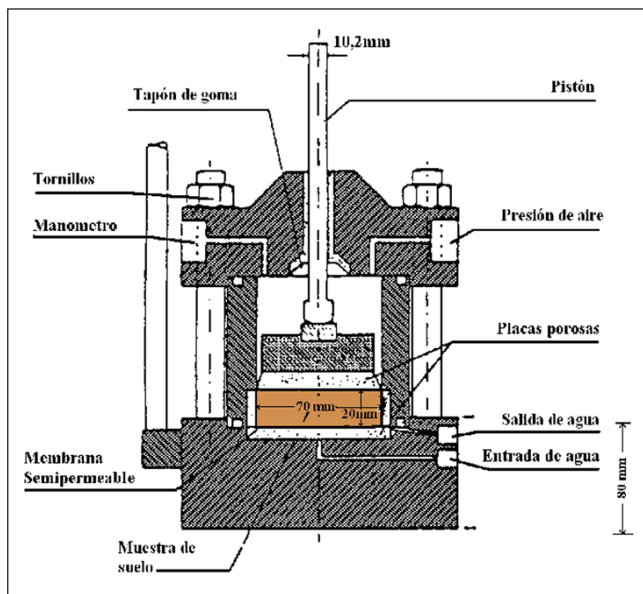


Figura 1. Edómetro con control de la succión basado en la técnica de translación de Ejes (Escario 1967, 1969).

Materiales y métodos

Suelos ensayados

Un suelo areno-arcilloso compactado, identificado por AAC, fue retirado del Campus II de la Escuela de Ingeniería de São Carlos-SP, Brasil, y está compuesto por sedimento coluvio-aluvionar de la edad Cenozoica.

Estos sedimentos se caracterizan por presentar retrabajamiento debido al transporte de materiales del Grupo Bauru y de las Formaciones Serra Geral y Botucatu. Localmente, el material presenta características lateríticas generadas por el proceso de intemperie, con estructura

porosa y colapsable frente al humedecimiento cuando sometido a determinados valores de sobrecarga. El suelo limoso compactado, consiste en una dolomita comercial y que fue denominada como DCC.

En la Tabla 1 son mostradas algunas características de los materiales estudiados.

Tabla 1. Características de los suelos ensayados

Suelo	G.C (%)	r (g.cm ³)	w (%)	e	Sr (%)	LL (%)	Lp (%)
AAC	80	1,55	11,0	1,05	31	26	19
DCC	80	1,52	16,1	0,91	32	25	16

G.C: grado de compactación en (%); r: masa específica en (g/cm³); w: humedad en (%); e: índice de vacíos; Sr: grado de saturación en (%); LL: límite líquido en (%); LP: límite plástico en (%).

Ensayos realizados

Edométricos convencionales

Fueron realizados ensayos edométricos convencionales con muestras de cada uno de los suelos utilizados. Las muestras de suelo fueron de 7cm de diámetros y 2cm de altura y fueron inicialmente saturadas antes de la aplicación de las cargas. La aplicación de las cargas fue duplicándose en magnitud después de la estabilización de las deformaciones aplicadas por la carga anterior. Las cargas aplicadas en todos los casos fueron de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800 y 1600kPa.

Edométricos con imposición de la succión

Los ensayos de compresión confinada basados en el método de translación de ejes fueron realizados utilizando el aparato desarrollado por Machado & Vilar (1995) de características similares al de Escario (1969). Las Fotos 1 y 2 muestran el edómetro desmontado y montado en una prensa de adensamiento respectivamente.

El procedimiento de ensayo para ese edómetro fue similar a los sugeridos por los mismos autores. Consistió en colocar una muestra de suelo (de 7cm de diámetro e 2cm de altura) en contacto directo con la placa de alta presión de entrada de aire, ambos previamente saturados, utilizando para ese objetivo, la propia base del edómetro conectada a una fuente de alimentación de agua.

Durante esa etapa no es aplicada a la muestra, ninguna presión de aire, permaneciendo de esa manera, durante dos días aproximadamente. Luego, es aplicada dentro de la cámara, una presión de aire equivalente a la succión deseada, así, después de la eliminación parcial del agua

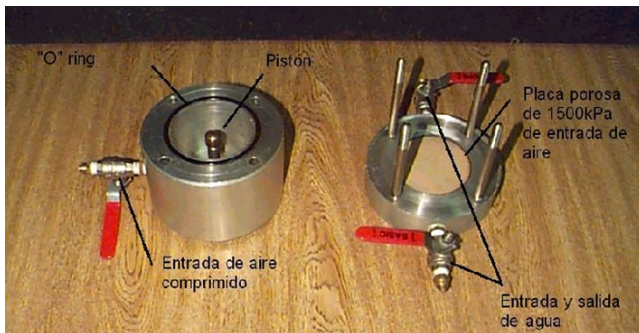


Foto 1. Componentes del edómetro basado en la técnica de translación de ejes (Machado & Vilar, 1995).

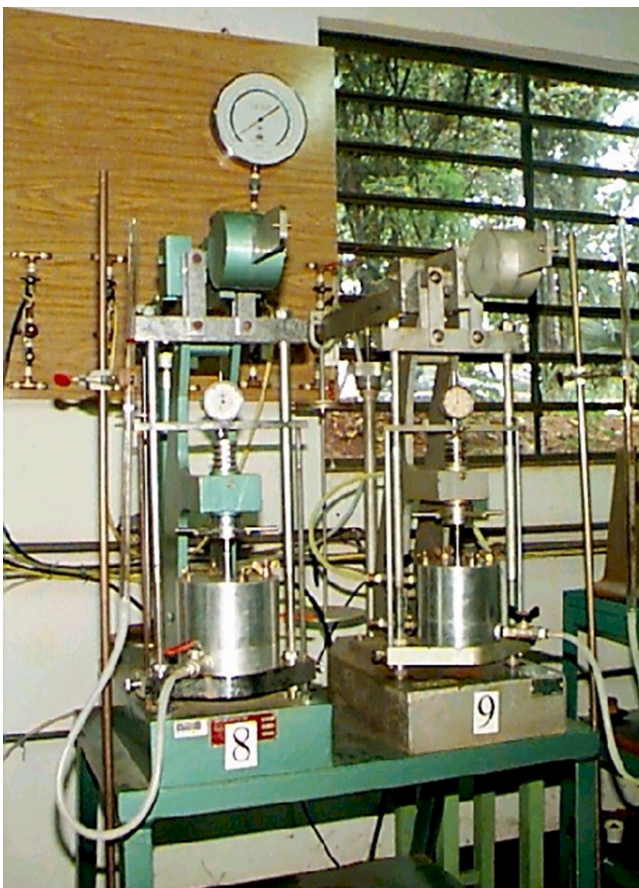


Foto 2. Edómetro montado en una prensa de adensamiento.

de la muestra a través de la placa porosa es alcanzado un equilibrio de succión en el suelo.

Las variaciones de humedad en cada valor de succión son registradas por la medida de volumen del agua expulsada en una bureta graduada. Cuanto a la aplicación de las tensiones verticales estas fueron similares a las utilizadas en un edómetro convencional.

Fueron realizados dos tipos de trayectorias T1 y T2, para estudiar el comportamiento deformacional de los suelos y que son ilustrados en la Figura 2 como succión ($u_a - u_w$) versus tensión de sobrecarga (p) aplicada. Los ensayos según la trayectoria de tensiones T1 fueron destinados a observar la variación de la deformación con los cambios de succión y consistieron en aplicar cargas al suelo (5, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800 y 1600kPa) sometidos a succión constante, desde el inicio, hasta el fin de la aplicación de la carga. Las succiones impuestas fueron de 45, 105, 215 y 410kPa.

Los ensayos con trayectorias de tensiones T2, tuvieron como objetivo, observar el comportamiento colapsable del suelo no saturado. Para ese objetivo, después de llevar la muestra de suelo a la succión inicial deseada, se aplicó una carga hasta una cierta tensión, para luego reducir la succión hasta que sea nula. Este procedimiento fue necesario para producir el colapso por humedecimiento del suelo (a través de la placa porosa). Posteriormente, el ensayo fue finalizado aplicando cargas a la muestra hasta alcanzar la tensión final deseada. La tensión de inundación (200kPa), fue establecida para producir magnitudes perceptivas del potencial de colapso para el estudio y fue determinada a partir de ensayos edométricos convencionales. El valor de succión impuesta precedente a la inundación fueron de 45, 105, 215 y 410kPa.

A partir de los valores de índice de vacíos antes y después del humedecimiento (e_i y e_f respectivamente) cuando sometidos a una misma tensión y adicionalmente, con el índice de vacíos inicial de la muestra (e_o) fueron determinados los potenciales de colapso (I) mediante la relación:

$$I = \frac{e_i - e_f}{e_o - e_f}$$

Análisis y discusión de los resultados

En las Figuras 3 y 4 se presentan las curvas de compresión confinada mostrados como la relación índice de vacíos (e/e_o , donde e_o es el índice de vacíos inicial) versus tensión total de carga para los suelos DCC y AAC.

Esas curvas fueron obtenidas según la trayectoria T1, con el edómetro convencional (EC para o solo saturado) y por la aplicación de la succión (45, 105, 215 y 410kPa) mediante el edómetro basado en la técnica de translación de ejes (TE). Las características de las muestras de suelo utilizadas para el ensayo son resumidas en la Tabla 2.

A partir de las curvas de compresión de las Figuras 3 y 4, se observa que, para los mismos valores de tensión ocu-

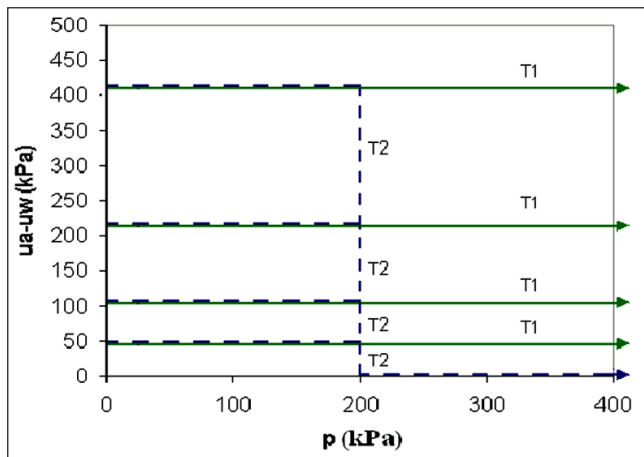


Figura 2. Trayectorias de tensiones empleadas para el estudio.

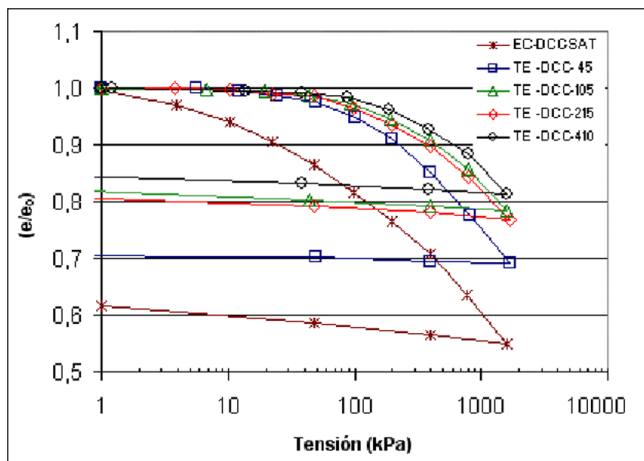


Figura 3. Ensayos edométricos convencional y con imposición de la succión, según la trayectoria T1 para la dolomita comercial compactada (DCC).

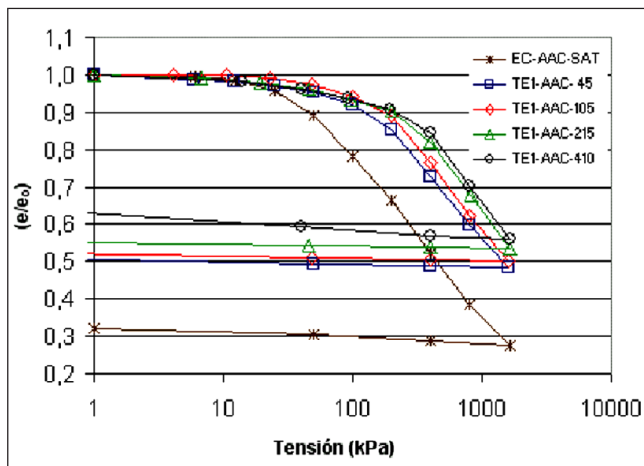


Figura 4. Ensayos edométricos convencional y con imposición de la succión, según la trayectoria T1 para el suelo arenoso arcilloso compactado (AAC).

Tabla 2. Características de las muestras de suelo empleadas en los ensayos de compresión confinada (trayectoria T1).

Succión (kPa)	Suelo			
	DCC		AAC	
	r_d	w_e	r_d	w_e
0	1,348	32,5	1,403	34,9
45	1,349	17,2	1,405	12,9
105	1,349	8,0	1,402	12,1
215	1,350	5,8	1,402	11,7
410	1,349	3,8	1,402	11,1

r_d : masa específica seca en (g/cm³); w_e : humedad de equilibrio (%) de la succión.

Se observan mayores valores de relación índice de vacíos (menor deformación), con el aumento de la succión matricial de cada suelo. Esto es esperado, debido a que, el aumento de las tensiones de succión debido a la expulsión del agua a través de la placa porosa del edómetro, propicia un aumento de la rigidez al suelo siendo más resistente a las deformaciones.

De la Figura 4, se observó también que el material AAC es más deformable (menores valores de la relación e/e_0 para un mismo valor de tensión) que el suelo DCC (Figura 3), lo que no resulta compatible con su textura, pues el primero se trata de una arena-arcillosa y el segundo de un limo, ambos compactados, con el mismo grado de compactación (80%). Al parecer, esto tiene explicación, en la naturaleza de la estructura del suelo AAC, pues como ya explicado el proceso podológico para su formación, le concedió una estructura porosa y colapsable frente al humedecimiento. Así, este suelo tiene una mayor capacidad de reducción de vacíos o poros, por su mayor facilidad de acomodación entre sus partículas minerales.

También, a partir de las curvas de compresibilidad fueron determinadas las tensiones de pré-adensamiento (s_p) determinados con el método de Pacheco Silva e índices de compresión (C_c) que son mostrados en las Figuras 5 y 6, respectivamente, en función de la succión matricial. En estos gráficos también fueron adicionados s_p e C_c , provenientes de ensayos convencionales (EC) en suelos saturados.

De la Figura 5, se observa que existe una relación entre las tensiones de pre-adensamiento de los suelos saturados y no saturados, pues ellos crecen con el aumento de la succión conforme el modelo de Alonso *et al.*, (1990), a través de la curva de plastificación LC.

La Figura 6 muestra que los índices de compresión del suelo AAC denotan un acrecento de C_c con el aumento de

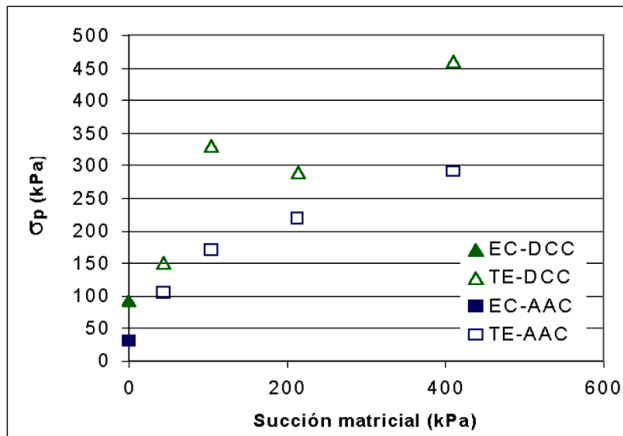


Figura 5. Tensiones de pre-adensamiento (s_p), por el método de Pacheco Silva, para los diferentes suelos, resultantes de ensayos edométricos convencionales y con imposición de la succión.

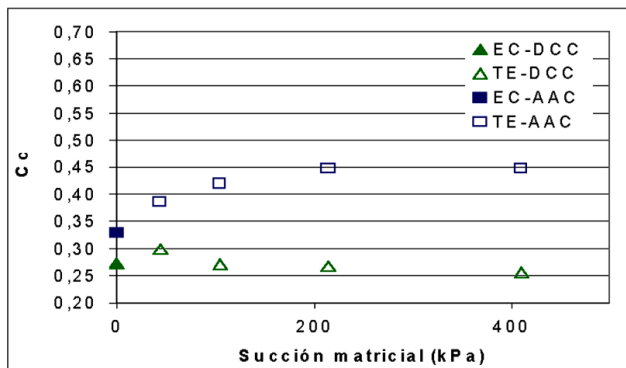


Figura 6. Índices de compresión (C_c), para los diferentes suelos, resultantes de ensayos edométricos convencionales y con imposición de la succión.

la succión, y probablemente esto ocurra hasta alcanzar un valor constante. Esto no fue observado en el suelo DCC, donde los valores fueron disminuyendo con el aumento de la succión y que siguen el comportamiento ya antes observado por Alonso *et al.*, (1990) probablemente por que las cargas utilizadas en la compresión para ese material no fueron suficientes para provocar el efecto contrario.

Las Figuras 7 e 8 se presentan las curvas de compresión confinada (representados como índice de vacíos *versus* tensión total de carga) para los suelos DCC y AAC según la trayectoria T2, obtenidas por la aplicación de la succión (45, 105, 215 y 410kPa) mediante el edómetro basado en la técnica de translación de ejes (TE). Las características de las muestras de suelo utilizadas para el ensayo son resumidas en la Tabla 3.

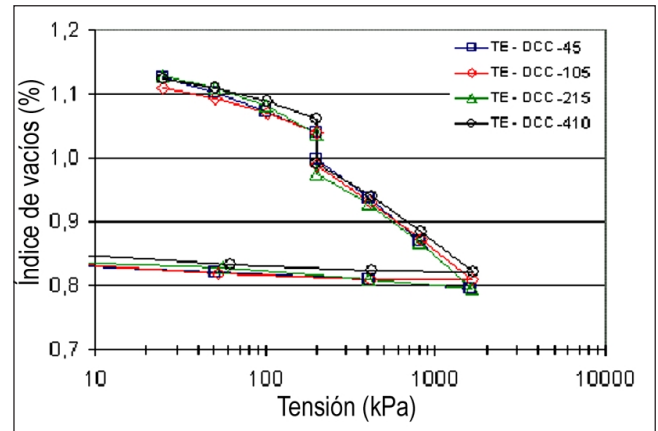


Figura 7. Ensayos edométricos con imposición de la succión, según la trayectoria T2 para (DCC).

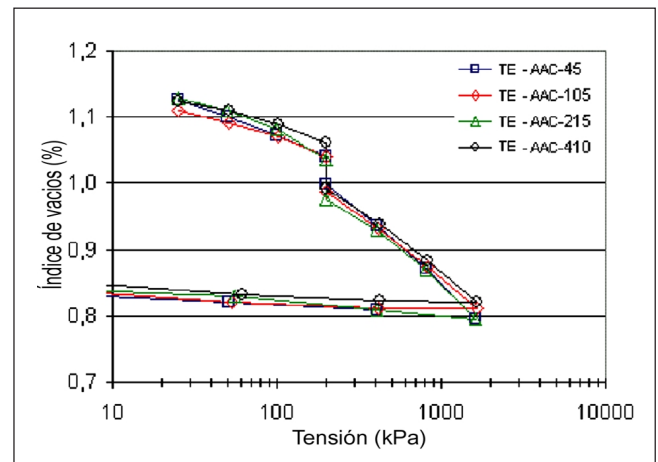


Figura 8. Ensayos edométricos con imposición de la succión, según la trayectoria T2 para (AAC).

Tabla 3. Características de las muestras de suelo empleadas en los ensayos de compresión confinada (trayectoria T2).

Succión (kPa)	Suelo			
	DCC		AAC	
	r_d	I	r_d	I
45	1,349	1,9	1,408	3,2
105	1,351	2,5	1,409	4,8
215	1,353	2,8	1,408	7,1
410	1,352	3,3	1,408	8,9

r_d : masa específica seca en (g/cm³); I: Potencial de Colapso en (%).

Al ser colocados los valores de colapso (I) en función de la succión matricial del suelo, resulta el gráfico de la Figura 7. Tanto DCC como AAC mostraron acrecimientos del potencial de colapso con el aumento de la succión. Estos

resultados corroboran el comportamiento observado en las Figuras 3 y 4 pues, valores elevados de succión rigidiza la muestra y potencializan las deformaciones por humedecimiento. No obstante, el aumento de rigidez no es necesariamente ilimitado y puede estar condicionado algún valor de succión, pues como se puede observar en la Figura 9, DCC no muestra considerables variaciones de potencial de colapso arriba de los 215kPa.

AAC presenta los mayores valores de I y siempre crecientes con el aumento de la succión, lo que muestra, la evidente capacidad de colapso de ese suelo. Sin embargo, similar a DCC se espera que I alcance un valor máximo en un determinado valor de succión.

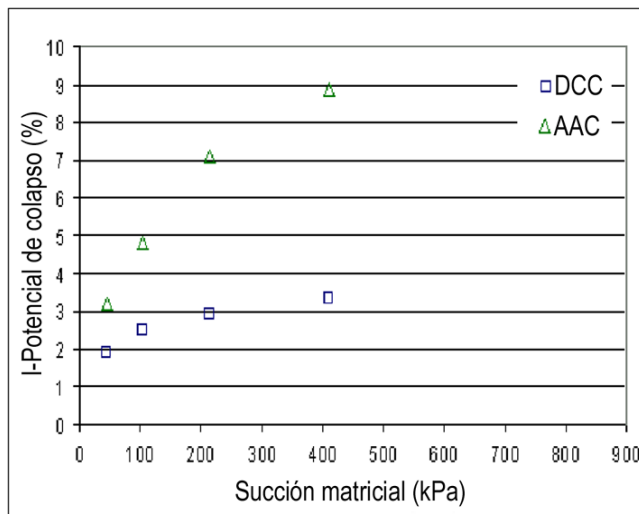


Figura 9. Potencial de colapso versus succión matricial para los suelos DCC e AAC.

Conclusión

En este artículo se mostraron aspectos del comportamiento deformacional de suelos saturados y no saturados con diferentes texturas (fina y gruesa).

Los ensayos con los edómetros convencional y con imposición de la succión permitieron evidenciar que, la magnitud de la deformación de los suelos depende principalmente (entre otros factores), de su grado de saturación. Así, se pudo observar cómo los suelos pueden ser más deformables con el aumento de la humedad debido a que esta acción desencadena la alteración del estado de tensiones por reducción de la succión existente tornando el suelo menos rígido.

Se observó también que existen suelos con características peculiares que pueden mostrar reducciones de va-

líos más drásticas en relación a otros suelos supuestamente más deformables. Esto fue evidente, cuando el suelo arenoso de características porosas resultó más deformable y con mayor potencial de colapso en relación al suelo limoso.

El colapso del suelo arenoso no solamente dependió por la variación de su estado de tensiones debido al humedecimiento. Este suelo posee una alta estructura inestable e que ocurre principalmente en sus macroporos.

A pesar de existir situaciones en que las deformaciones son producidas para la situación más crítica o de saturación (como por ejemplo, cimentaciones de presas), es evidente, que existen deformaciones debidas a los cambios de humedad sin saturación completa. Podemos mencionar deformaciones diferenciales, hundimiento de estructuras, entre otros, cuyo análisis, no deberían ser negligenciados en nuestra práctica profesional.

Bibliografía

- Alonso, E. E.; Gens, A.; Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40, 3, p. 405-430.
- Aragão, C. J. G.; Melo, A. C. (1982). *Fundações rasas em solos colapsíveis. Um caso no semi-árido de Pernambuco*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Olinda- Recife, v.2, p. 19-40.
- Barden, L.; Mador, A.O.; Sides, G.R. (1969). *Volume change characteristics of unsaturated clays*. Journal of Soil Mechanics and Foundation. Div. A.S.C.E., v.95, SM 1, p. 33-51.
- Denisov, N. M. (1951). *The engineering properties of loess and loess loams*, Gosstroizdat, Moscow, (em Russo), apud Fedá (1966), p. 136.
- Dudley, J. H. (1970). *Review of collapsing soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation. Division, ASCE, v.96, SM3, p. 925-947.
- Escario, V. (1967). *Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension*. Int. Cooperative Res. On the Predictions of Moisture Contents Under Road Paviments. O.C.D.E.
- Escario, V. (1969). *Swelling of soils in contact with water at negative pressure*. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas, A. and M. University, p. 207-217.
- Ferreira, S.R.M; Lacerda, W.A. (1993). *Variações de volume em solo colapsível medidas através de ensaios de laboratório e campo*. Solos e Rochas, São Paulo, v.16, No.4, p. 245-253.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R. (1976). *Constitutive relations for volume change in unsaturated soils*. Canadian Geot. J., 13(3), p. 261-276.
- Gibbs, H. J.; Bara, J. P. (1967). *Stability problems of collapsing soil*. Journal of the Soil Mech. And Found. Division, ASCE, v.93, m.SM4, p. 577-594.

- Hilf, J. W.** (1956). *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. Denver, 1956. 109 p. (Doutorado - Faculty of the Graduate Scholl of the University of Colorado).
- Jennings, J.E.B.; Knight, K.** (1957). *The additional settlement of foundations due to a collapse of struture of sandy sub soils on wetting*. In: Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., 4, London, v.1, p. 316-319.
- Jennings, J.E.B.; Knight, K.** (1975). *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure*. In: Regional Conf. for Africa on Soil Mech. And Found. Eng., 6, Durban, 2V.v.1, p. 99-105.
- Machado, S. L.; Vilar, O.M.** (1995). *Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro de sucção controlada*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).
- Moore, P. J.; Millar, D. V.** (1971). *The collapse of sands upon saturation*. First Australia-N.Zealand Conf. on Géomechanics, Mellbourne, p. 54-60.
- Reznic, Y. M.** (1989). *Discussion of detremination of collapse potential of soils by A.J Lotenergger and R.T., Saber*. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v.12, No.3, September, p. 248-249.
- Vilar, O. M.; Rodrigues, J .E.; Nogueira, J. B.** (1981). *Solos colapsíveis. Un problema para a engenharia de solos tropicais*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de janeiro, p. 209-224.

Recibido: enero 19 de 2007

Aceptado para su publicación: agosto 15 de 2007