

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS⁽¹⁾

A. JOSA (*)
E. E. ALONSO (*)
A. LLORET (*)
A. GENS (*)

RESUMEN. Se ha desarrollado una célula triaxial para el ensayo de suelos parcialmente saturados según determinadas trayectorias de tensiones. Con ella se han llevado a cabo cuatro series de ensayos para investigar el comportamiento tenso-deformacional de un caolín parcialmente saturado de plasticidad media. Los resultados indican que probablemente dicho comportamiento tensión-deformación puede ser interpretado mediante una ley constitutiva de tipo elastoplástico. Las principales conclusiones del trabajo presentado son: el acoplamiento de efectos entre la variación de succión y los cambios en la tensión media sobre la deformación volumétrica plástica; la existencia de una superficie de fluencia en el plano succión-tensión media, de forma convexa hacia el eje de la succión; y finalmente la relación lineal entre el volumen específico y el logaritmo de la succión o de la tensión de confinamiento, tanto para ramas de descarga como de carga noval.

ABSTRACT. A triaxial cell has been developed, for testing partially-saturated soils in accordance with specific stress paths. As well as this, four series of tests have been carried out in order to investigate the strain behaviour of a partially saturated kaolin of medium plasticity. The results indicate that this stress/strain behaviour can be interpreted using a elastoplastic constitutive law. The main conclusions drawn from the work presented are: the coupling between the variation in suction and the changes in mean stress, and the volumetric plastic deformation; the presence of a yield locus in the suction/mean stress plane with convex shape towards the suction axis; and finally the linear relationship between the specific volume and the logarithm of the suction or confining stress, both for unload branches and noval load branches.

1. INTRODUCCION

Para caracterizar el comportamiento tenso-deformacional del suelo parcialmente saturado, han sido propuestas en el pasado algunas expresiones que tienen en cuenta por separado el efecto de la tensión total aplicada y el de la succión. Coleman (1962) sugirió que el cambio de volumen, la humedad y la deformación de corte se pueden expresar como combinaciones lineales de los cambios en la presión total media (p) por encima de la presión del aire (p_a), $p - p_a$, de la variación de la succión, $p_a - p_w$ (siendo p_w la presión del agua), y de los cambios en la tensión de corte. Los coeficientes de dicha expresión pueden cambiar en función de la historia de carga y del nivel de succión y tensión alcanzado. Bajo condiciones isotrópicas Bishop y Blight (1963),

Blight (1965), Burland (1965), relacionaron los cambios de volumen con los cambios en $(p - p_a)$ y $(p_a - p_w)$. Pocos años después Matyas y Radhakrishna (1968) usaron los conceptos de *variable de estado* y de *superficie de estado* para relacionar los cambios del grado de saturación (S_r) y del índice de poros (e) con las denominadas *tensiones significativas* ($p - p_a$ y $p_a - p_w$), tanto en condiciones edométricas (p = tensión vertical aplicada) como isotrópicas (p = presión hidrostática). Estas superficies de estado parecieron adecuadas para describir el comportamiento hinchamiento-colapso de los suelos parcialmente saturados.

Bajo trayectorias de tensiones que aseguren un crecimiento monótono de volumen, las superficies de estado tienden a ser únicas para una muestra dada (Matyas y Radhakrishna, 1968; Barden *et al.*, 1969; Lloret, 1982). Expresiones analíticas para dichas superficies de estado han sido propuestas por Fredlund (1979) y Lloret y Alonso (1985).

Sin embargo los ciclos de carga y descarga (en términos de tensión aplicada o de succión) conducen a deformaciones y a cambios de saturación irreversibles

(1) Comunicación presentada al IX Congreso Europeo de Mecánica del Suelo, Dublín, 1987.

(*) Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

(Chu y Mou, 1973). Otros autores (Barden *et al.*, 1969; Karube, 1986), muestran como trayectorias de tensiones que consistan en incrementos de succión (secado) seguidas por incrementos de tensión externa (p), o, alternativamente, incrementos de tensión externa seguidos por un proceso de secado (ambos con inicio y final en los mismos puntos en el espacio de tensiones), se traducen en cambios de volumen distintos.

Así, las superficies de estado sólo pueden modelar de manera limitada el comportamiento volumétrico tensión-deformación de los suelos parcialmente saturados, debido a su inherente irreversibilidad.

Como un primer paso hacia el desarrollo de una ecuación constitutiva adecuada para suelos parcialmente saturados, se ha llevado a cabo un programa de ensayos (que se resume en este artículo), encaminado a mejorar nuestro conocimiento del efecto de la falta de saturación en el comportamiento del suelo. Los ensayos intentan básicamente proporcionar información acerca de las condiciones de fluencia y del comportamiento reversible (elástico) de suelos parcialmente saturados de plasticidad media a baja.

2. EQUIPO DE LABORATORIO Y PROPIEDADES DEL SUELO

Se ha puesto a punto una célula triaxial para el ensayo de muestras de suelo parcialmente saturado. Se basa fundamentalmente en la célula triaxial de trayectorias de tensiones de Bishop y Wesley (1975). La muestra queda envuelta por el mercurio contenido en una cámara interna de perspex adosada al pistón inferior de la célula hidráulica (ver Fig. 1).

La presión de aire se aplica a través de la piedra porosa superior. La piedra porosa inferior es de alto valor de entrada de aire y queda conectada al sistema de presión de agua. La deformación y los cambios de volumen se miden como sigue:

- La deformación vertical a través de un transductor LVDT sumergido.
- La deformación radial mediante un anillo flotador, situado sobre la superficie de mercurio y unido a otro transductor LVDT sumergido.
- El cambio de volumen de agua en la muestra se evalúa por la variación de nivel de un bote de mercurio

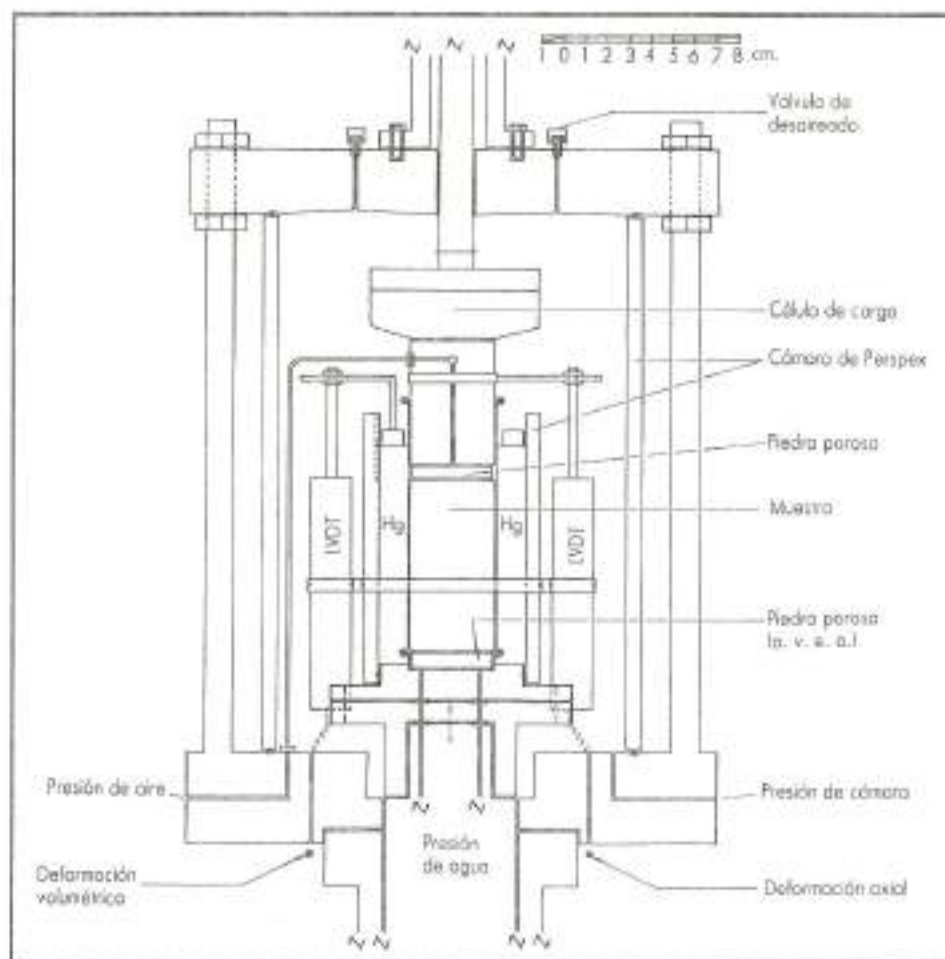


FIGURA 1. Detalle de la Célula Triaxial.

del sistema que controla la presión del agua intersticial.

La succión se consigue aplicando una presión constante de aire en la piedra porosa superior. De este modo los cambios de succión (así como los cambios de la tensión media o del desviador) pueden ser controlados modificando adecuadamente el nivel del bote de mercurio que proporciona la presión de agua a la piedra porosa inferior, a la cámara, o al pistón de carga axial. Para este fin se usaron tres motores, controlados por ordenador. El programa de ordenador también se encarga del sistema de adquisición de datos, y, a través de las medidas recogidas, actúa sobre los motores para asegurar el correcto seguimiento de la trayectoria de tensiones y succión seleccionada.

En los ensayos se usó un caolín de suministro comercial, moderadamente plástico. Sus propiedades básicas se detallan en la Tabla 1. Para obtener condiciones iniciales homogéneas (ver tabla) las muestras se compactaron con un pistón, con el contenido de agua requerido y hasta el índice de poros deseado.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

En este artículo se incluyen sólo ensayos con tensión de corte nula. Las trayectorias de tensión (en términos de incrementos de succión y de $p - p_0$) de los ensayos de las Series A, B, C y D se presentan en la figura 2 a, b, c, d. En todas ellas el estado inicial de la muestra corresponde a los valores de s ($= p_u - p_w$), $p - p_0$, S_m y e_0 indicados en la Tabla 1. Los cambios de tensión y de succión fueron monótonos, y se aplicaron de manera suficientemente lenta como para asegurar condiciones drenadas. A este respecto, se ejecutaron algunos ensayos de prueba para seleccionar la velocidad de carga adecuada.

En los ensayos de la Serie A se llevaron tres muestras al mismo estado final: inicialmente se incrementó la succión a tres valores distintos; luego se cargaron en compresión; finalmente se aumentó la succión (en dos de las muestras) al valor final pretendido (Fig. 2a). En la Figura 3 se incluyen los resultados de los ensayos, en términos de deformación volumétrica a lo largo de las tres diferentes trayectorias. Las tres muestras alcanzan valores finales del índice de poros marcadamente distintos. La succión aplicada al principio controla el comportamiento posterior del suelo. El incremento de succión

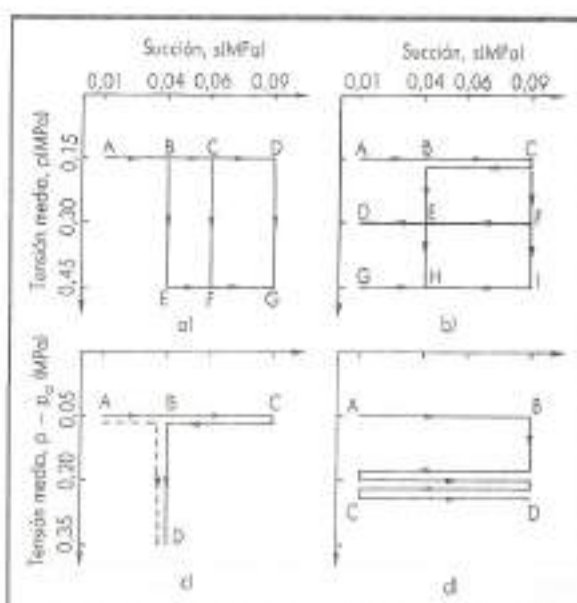


FIGURA 2. Trayectorias de tensiones para los ensayos de la Serie A(a), B(b), C(c) y D(d).

de la muestra inhibe progresivamente su ulterior fluencia frente a una aplicación adicional de tensión total. Es decir, la succión de preconsolidación controla (al menos en parte) la posición de una cierta tensión de preconsolidación (o punto de fluencia) frente a incrementos de la tensión total media. Si se expresa en términos de superficies de fluencia asociadas a cambios de succión y de tensión media, estos resultados demuestran la existencia de un acoplamiento entre ellas. Dicho acoplamiento puede describirse mediante una deformación volumétrica plástica, acumulada y común, que integre los cambios irreversibles de volumen debidos a la variación de succión y las deformaciones volumétricas plásticas asociadas con los incrementos de tensión total media.

En los ensayos de la Serie B se aumentó inicialmente

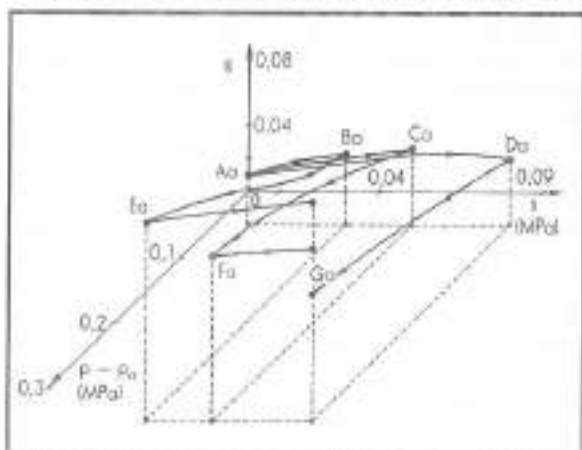


FIGURA 3. Deformación volumétrica medida en los ensayos de la Serie A.

PROPIEDADES	CONDICIONES INICIALES
w_L	41.0 %
w_p	28.9 %
γ_d/γ_w	2.65
% Partículas $\leq 2\mu m$	4 %
% Partículas $\leq 200 \mu m$ ASTM	95 %
Coefficiente Unif.	2
Clasificación Unificada	ML
	$s = p_0 - p_w = 0.01 \text{ MPa}$
	$p - p_0 = 0.05 \text{ MPa}$
	$S_m = 0.875$
	$e_0 = 0.92$

TABLA 1. Propiedades del suelo; condiciones iniciales.

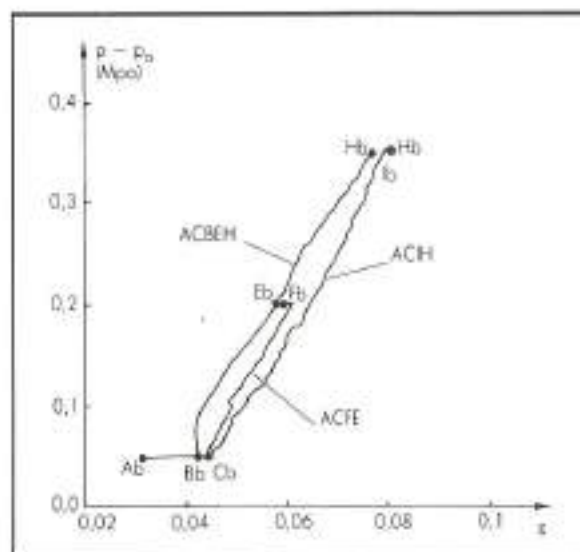


FIGURA 4. Deformación volumétrica medida en los ensayos de la Serie B.

la succión a las tres muestras por igual (Fig. 2b); luego se disminuyó la succión a lo largo de trayectorias tensionales dispares. Siguiendo con las ideas expuestas anteriormente, el aumento común de la succión deja a las muestras esencialmente en idéntica situación por lo que concierne a la posición de una superficie de fluencia asociada a la succión y a la tensión media. Trayectorias de «descarga» de succión y de aumento de tensión media como la CBE y la CFE se enmarcan probablemente dentro de una región «elástica», mientras que trayectorias como la CFG o la CBEHG intersectan una cierta envolvente común de fluencia. En ambos casos la deformación volumétrica en puntos como el E o el H, a los que se puede llegar por caminos alternativos, debe ser única. Esto parece cumplirse de forma aproximada según se aprecia en la Figura 4, que incluye la evolución de la deformación volumétrica para las tres muestras de la Serie B. Las condiciones de carga de esta Serie tienden a proporcionar una «superficie de estados» única, mientras que en la Serie A la falta de unicidad era fácilmente apreciable.

La descarga de succión en las trayectorias FED y IHG (Fig. 2b), bajo tensión media constante (aunque distinta), produce hinchamiento (trayectoria FED, con tensión de confinamiento relativamente baja), o colapso (trayectoria IHG, bajo tensión de confinamiento relativamente alta), como se puede apreciar en la Figura 5. El hinchamiento asociado a la disminución de succión puede ser una consecuencia natural del concepto de «tensión efectiva», pero el colapso observado en la trayectoria IHG conduce a considerar la existencia de nuevos mecanismos: generalmente esta disminución de volumen se concibe como un «colapso» local de la estructura del suelo. Cuando el valor de esta reorganización local es mayor que el hinchamiento «natural» asociado a

la disminución de succión, se obtiene un comportamiento macroscópico de tipo colapso. Una forma sencilla de modelar ambos comportamientos (especialmente para arcillas no expansivas) puede ser el siguiente: asociar un comportamiento elástico (o recuperable) para el hinchamiento «puro»; y para el colapso de la estructura del suelo, asignarle una deformación de compresión, plástica e irreversible (asociada a una superficie de fluencia). Con estas ideas, trayectorias como la IHG se inician probablemente en un punto de fluencia, y a medida que avanzan van desplazando la correspondiente superficie de fluencia. El valor del colapso registrado a lo largo de IHG es el resultado neto de una expansión «elástica» y una compresión plástica. Como la intensidad del colapso aumenta con la presión de confinamiento, el lugar geométrico de los puntos de fluencia asociados al colapso debe ser convexo hacia el eje de las succiones. En la Figura 5 se puede apreciar que, para valores reducidos de la succión, en la trayectoria FED se registra un hinchamiento relativamente intenso, lo que se corresponde con la disminución del valor del colapso neto que se observa en la IHG para el mismo segmento de bajas succiones impuestas.

En los ensayos de la Serie C (dos muestras, Fig. 2c) se ha pretendido investigar la existencia de un efecto de preconsolidación debido a la historia previa de succiones, que afecte a los ulteriores cambios de presión de confinamiento. Teóricamente, si se aumenta la presión de confinamiento por encima de la presión de preconsolidación aparente (o punto de fluencia), el suelo pasa a tener, súbitamente, una mayor deformabilidad. Trayectorias como la ABCBD tenderán a demostrar este efecto, en contraste con la ABD. En la Figura 6 se representa la evolución de la deformabilidad del suelo a lo

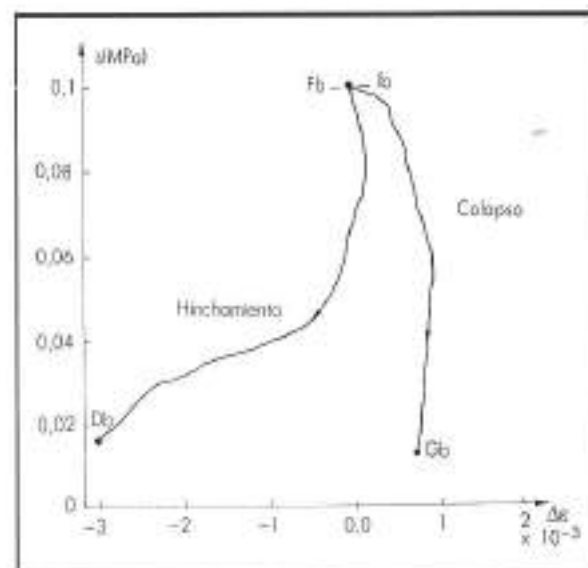


FIGURA 5. Medida del comportamiento de hinchamiento y colapso en las trayectorias FED e IHG correspondientes a los ensayos de la Serie B.

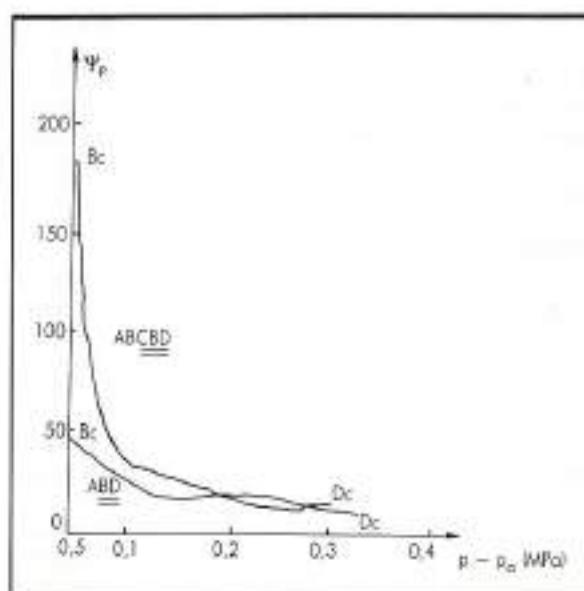


FIGURA 6. Evolución de la deformabilidad del suelo en los ensayos de la Serie C.

largo de ambas trayectorias. Para evaluar la deformabilidad del suelo se ha usado el siguiente parámetro:

$$\psi_p = (d(p - p_a)/de_s) (1/v(p - p_a)) \quad (1)$$

siendo v el volumen específico ($v = 1 + e$). Si el suelo se comportara según las predicciones de la teoría clásica de la consolidación, ψ_p debería mantenerse constante en ramas de descarga-recarga y también en carga noval. Un cambio brusco de ψ_p puede indicar que se está sobrepasando un estado de preconsolidación (es decir, se alcanza un punto de fluencia). En la Figura 6 se aprecia como la trayectoria CBD pasa rápidamente de un estado sobreconsolidado a otro normalmente consolidado, en las inmediaciones de $p - p_a = 0.1 \text{ MPa}$. Para tensiones mayores, ψ_p mantiene un valor sensiblemente constante en ambas muestras.

El interés de los ensayos de la Serie D (una muestra, Fig. 2d) reside en examinar el comportamiento presumiblemente reversible del suelo bajo ciclos sucesivos de aumento y disminución de la succión. Tras una trayectoria ABC, que resulta en una compresión notable (véase la Fig. 7), se llevaron a cabo dos ciclos de cambio de succión sobre la muestra, alcanzando la máxima amplitud permitida por la célula de ensayo. Los resultados (Fig. 7) denotan una lenta acumulación de deformación de hinchamiento. No obstante, en primera aproximación, se puede aceptar un comportamiento elástico reversible.

Es interesante ver como varía la deformabilidad del suelo en función del incremento inicial de succión en esta serie de ensayos (trayectorias como la AB en la Figura 2d). Se ha adoptado un parámetro similar a ψ_p

para medir la deformabilidad debida a los cambios de succión:

$$\psi_s = (d(p_a - p_w)/de_s) (1/v(p_s - p_w + p_{atm})) \quad (2)$$

En la Figura 8 se representa la variación de ψ_s a lo largo de la trayectoria AB (Fig. 2d). De nuevo, la notable disminución de ψ_s en las inmediaciones de $p_a - p_w = 0.025 \text{ MPa}$ denota probablemente la existencia de una succión de preconsolidación. Este punto de fluencia se asocia a las condiciones iniciales de la muestra. En el resto de la trayectoria, la muestra se mantiene en carga noval, con un valor de ψ_s sensiblemente constante.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos que se han presentado permiten concluir de manera general que un modelo constitutivo de tipo elastoplástico es probablemente una formulación adecuada para describir el comportamiento tenso-deformacional de un suelo parcialmente saturado. Sin perder de vista las limitaciones inherentes al tipo de ensayos realizados (especialmente su carácter isotrópico) se pueden plantear, de manera preliminar, las siguientes conclusiones:

- Existe acoplamiento entre la deformación volumétrica plástica debida a variaciones de succión y el comportamiento del suelo frente a cambios en la tensión media. Esta sería una razón que contribuye a la falta de unicidad de las superficies de estado.
- La existencia de una superficie de fluencia asociada a los cambios de succión y de tensión media puede explicar el comportamiento tensión-deformación ob-

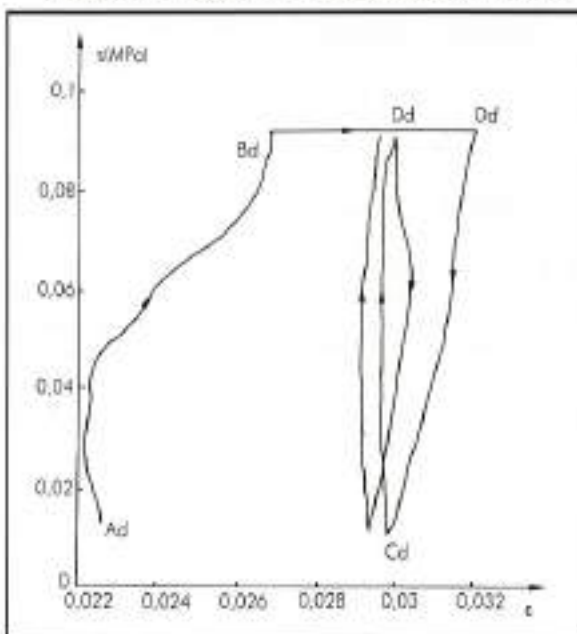


FIGURA 7. Deformaciones volumétricas medidas en los ensayos de la Serie D.

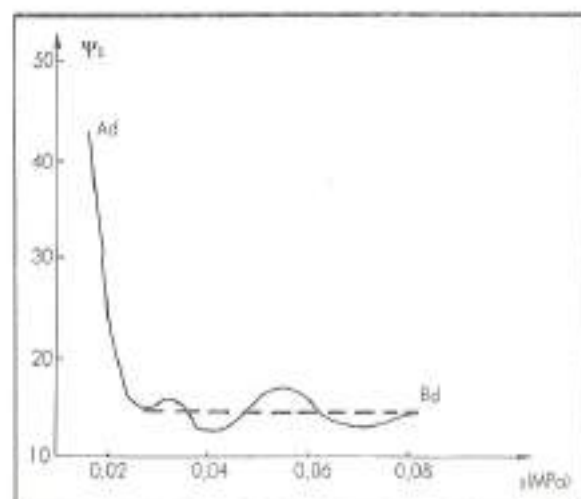


FIGURA 8. Evolución de la deformabilidad del suelo a lo largo de la trayectoria AB (ensayo de la Serie D).

servado, y, en particular, la respuesta conjunta hinchamiento-colapso de los suelos parcialmente saturados. La tendencia a obtener mayores colapsos para valores crecientes de la tensión media aplicada implica la existencia de una superficie de fluencia (asociada al comportamiento de colapso) de forma convexa hacia el eje de succiones. Adicionalmente la constatada unicidad de las superficies de estado para determinadas trayectorias de tensiones (obtenida en ensayos del presente artículo y en trabajos de otros autores), puede integrarse en el marco constitutivo presentado.

- C. El comportamiento «elástico» que se obtiene en descarga o recarga (sea en términos de succión o de tensión media) se puede describir adecuadamente con una relación lineal entre el volumen específico y el logaritmo de la succión o de la tensión media. Los cambios de volumen en «carga» noval parece que pueden ajustarse a una relación similar.
- D. Los ciclos de «descarga» y «recarga» de succión exhiben una respuesta elástica, en primera aproximación. Sin embargo en los ensayos llevados a cabo se ha detectado una tendencia a la acumulación de deformación de hinchamiento irre recuperable.

Los autores han formulado un modelo constitutivo elastoplástico para suelos parcialmente saturados, que se describe en Alonso *et al.* (1989). Se basa en las principales directrices que se han esbozado en este artículo, además de en otros resultados de los que se dispone en la actualidad. El modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento experimental que se ha descrito aquí.

REFERENCIAS

- ALONSO, E. E.; GENS, A., y JOSA, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, (Pendiente de publicación.)
- BARDEN, L.; MADEJOS, A. O., y SIDES, G. R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 95 (SM1):33-51.
- BISHOP, A. W. y BLIGHT, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Geotechnique* 13(8):177-197.
- BISHOP, A. W. y WESLEY, L. D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique* 25(4):657-670.
- BLIGHT, G. E. (1965). A study of effective stresses for volume changes. *Proc. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*: 259-269, Sydney: Butterworths.
- BURLAND, J. B. (1965). Some aspects of mechanical behaviour of partly saturated soils. *Proc. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*: 270-278, Sydney: Butterworths.
- CHU, T. Y. y MOU, C. M. (1973). Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction test. *Proc. 3th Int. Conf. on Expansive Soils*: 177-185, Haifa.
- COLEMAN, J. D. (1962). Stress strain relations for partly saturated soils. *Geotechnique* 12(4):348-350.
- FREDLUND, D. G. (1979). Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 16(1): pp. 121-129.
- KARUBE, D. (1986). New concept of effective stress in unsaturated soil and its proving test. *Proc. ASTM Symp. on Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, Louisville.
- LLORET, A. (1982). Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya.
- LLORET, A. y ALONSO, E. E. (1985). State surfaces for partially saturated soils. *Proc. 11th ICSMFE* 2:557-562, San Francisco.
- MATYAS, E. L. y RADHAKRISHNA, H. S. (1968). Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique* 18(4):432-443.