

LA PREDICCIÓN DEL HINCHAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS⁽¹⁾

E. E. ALONSO (*)
A. LLORET (*)
A. GENS (*)
F. BATLLE (*)

RESUMEN. El examen de ensayos de hinchamiento en laboratorio sugiere la existencia de dos etapas en las curvas expansión-tiempo. El primer mecanismo, de tipo «primario», se asocia con fenómenos de flujo no estacionario en la red de poros interconectados del suelo. Se piensa que el segundo mecanismo responsable del comportamiento a largo plazo, es el resultado de la hidratación de minerales arcillosos activos. Se ha desarrollado un modelo que incorpora estos dos mecanismos básicos. Las nociones actuales de microestructura de suelos han proporcionado un marco de referencia conveniente para la formulación teórica. El modelo se ha utilizado para reproducir ensayos edométricos de hinchamiento de margas expansivas. Los parámetros derivados en el proceso de ajuste ensayo-modelo se han utilizado para reproducir los hinchamientos medidos, a lo largo de diez años, en una central nuclear cimentada sobre margas expansivas.

ABSTRACT. *On examining the swelling tests under laboratory conditions it appears that there are two stages in the expansion time curve. The first mechanism is of the «primary» kind, and is associated with non-stationary flow phenomena in the interconnected porous network in the ground. The second mechanism that plays a part in the long-term behaviour, is believed to be the result of hydration of the active clayey minerals. A model has been developed which includes these two basic mechanisms. The present notions of the microstructure of the ground have provided a useful framework for theoretical formulating. The model has been used to reproduce edometric swelling tests for expansive marls. The parameters obtained from the test-model adjustment process have been used to recreate the swellings that have been measured, over a period of ten years, at a nuclear power station constructed on expansive marls.*

1. INTRODUCCION

Cuando se analizan las curvas deformación-tiempo proporcionadas por ensayos de hinchamiento sobre suelos expansivos, es generalmente posible identificar dos fases bien marcadas. A menudo, a un período inicial relativamente rápido, sigue un lento proceso de tipo «secundario». Un resultado de este tipo aparece en la figura 1 (Mazurik y Komornik, 1973). Allí se muestra el resultado de varios ensayos de hinchamiento edométrico sobre una arcilla expansiva bajo carga vertical constante. Tendencias similares se advierten en resultados publicados por Mustafayev y Chigniev (1980), Haynes y Mason (1965), Livneh, Alpan y Leonov (1973) y Chen (1984). Ensayos edométricos recientes sobre una marga expansiva (Bechtel, 1988) indican un comportamiento cualitativamente similar (Fig. 2). Este ensayo, en particular,

será comparado más adelante con las predicciones del modelo desarrollado en este artículo.

Algunas medidas de campo a largo plazo (De Bruijn, 1973; Johnson, 1980; Didier et al., 1984) también favorecen la idea de que las deformaciones de hinchamiento se desarrollan en dos etapas aunque en condiciones «in situ» los procesos de flujo no estacionario pueden durar tiempos muy dilatados, enmascarando el efecto de fenómenos propiamente secundarios.

Un modelo teórico «simple» basado exclusivamente en leyes de flujo (o difusión) no proporciona un marco satisfactorio para los efectos indicados anteriormente. Se piensa que la fase secundaria de hinchamiento puede explicarse por la progresiva hidratación de los minerales activos del suelo mientras que el período inicial, relativamente rápido, es probablemente el resultado de la relajación de las presiones (negativas) de agua dentro de los poros parcialmente saturados.

De acuerdo con esta interpretación, el primer proceso estará asociado al flujo de agua en el sentido Darcy. Por ello, serán la permeabilidad y los gradientes de altura piezométrica los que fundamentalmente controlen la fase primaria del hinchamiento. El segundo proceso su-

(1) Artículo presentado en el Congreso Internacional de ISSMFE celebrado en Río de Janeiro en agosto de 1989.

(*) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya.

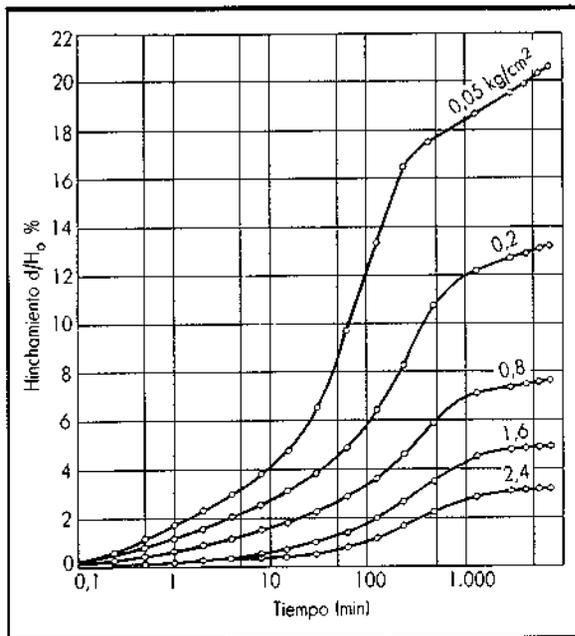


FIGURA 1. Hinchamientos en función del tiempo bajo diferentes cargas constantes (Mazurik y Komornik, 1973).

pone la hidratación de los minerales de la arcilla (e incluso sales) que absorben el agua disponible en los poros vecinos. La velocidad de hinchamiento en esta segunda fase estará pues fuertemente ligada a la velocidad de los fenómenos de hidratación. Esta descripción cualitativa del proceso de hinchamiento es forzosamente simplificada ya que ambos mecanismos tendrán ciertamente lugar al mismo tiempo y de forma interactiva.

Este artículo describe un modelo que incorpora las ideas anteriores en una formulación relativamente general en la que se plantea la solución simultánea de los procesos de flujo e hidratación conjuntamente con el problema tensión deformación, tal y como puede ser necesario en una situación tridimensional. Las bases conceptuales del modelo se han inspirado en algunas características importantes de la microestructura de suelos. El modelo se utilizará para aproximar la curva hinchamiento-tiempo medida en un ensayo de tipo edométrico (Fig. 2). De esta forma se obtendrán parámetros básicos del modelo que servirán para predecir el levantamiento de la cimentación de una central nuclear apoyada en la misma margá expansiva objeto de ensayo edométrico citado.

2. MARCO CONCEPTUAL

Observaciones visuales de la microfábrica a través del microscopio electrónico de barrido (SEM) muestran que las partículas de arcillas compactadas y naturales tienden a agregarse en glomérulos (Smart, 1973; Brackley, 1975; McGown y Collins, 1975; Collins, 1984). Estos glomérulos se comportan como partículas individualiza-

das de un tamaño equivalente a los granos de limo o arena. En la figura 3 (Alonso, Gens y Hight, 1987) se dibuja, de forma esquemática, una estructura de este tipo. En un suelo parcialmente saturado, el agua capilar rellena parcialmente los poros, relativamente grandes, limitados por estos glomérulos y, eventualmente, partículas de limo y arena. Este agua estará sometido a presiones negativas (succión) y será capaz de moverse a través de la retícula de poros y conductos asociados a la porosidad «inter-glomérulos» o inter-partículas.

Los tamaños de poros dentro de los glomérulos serán considerablemente más pequeños, como lo demuestran los resultados de estudios de porosimetría llevados a cabo con técnicas de intrusión de mercurio (Juang y Holtz, 1986).

Dado el tamaño de estos poros «intraglomérulos» y la afinidad por el agua de la superficie de las partículas de arcilla, los glomérulos estarán probablemente saturados. El agua en el interior de estas «partículas» alcanzará el equilibrio cuando la succión del agua capilar que rellena parcialmente los poros «libres» del suelo iguale al potencial de hidratación de las partículas de arcilla que integran los glomérulos. En caso de desequilibrio, el flujo entre ambos dominios (poros interconectados y agua intraglomérulos) puede tener cualquiera de los dos sentidos posibles: un flujo neto hacia los glomérulos significa el hinchamiento del suelo mientras que un flujo hacia los poros es propio de fenómenos de retracción. Además, el agua puede moverse entre poros como consecuencia de los gradientes de succión existentes. Todos estos flujos cambian la distribución de potenciales de agua en el suelo y se traducen en cambios de volumen.

Con objeto de trasladar esta descripción a un modelo, se han definido dos niveles de estructura de suelo, mutuamente interactivos: la «macroestructura» o nivel

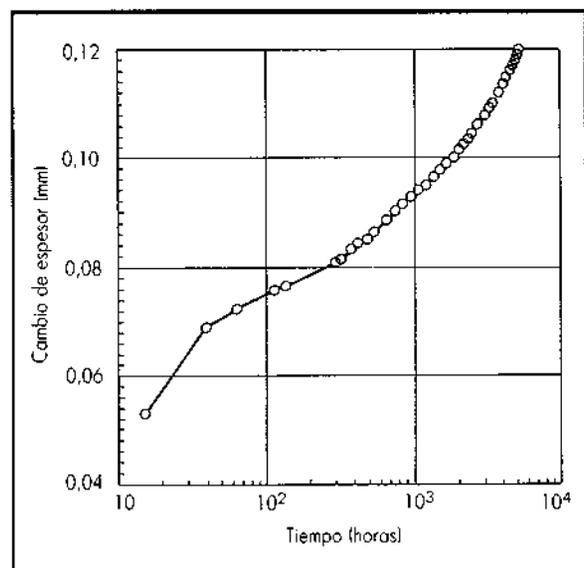


FIGURA 2. Hinchamiento de una muestra de margá expansiva.

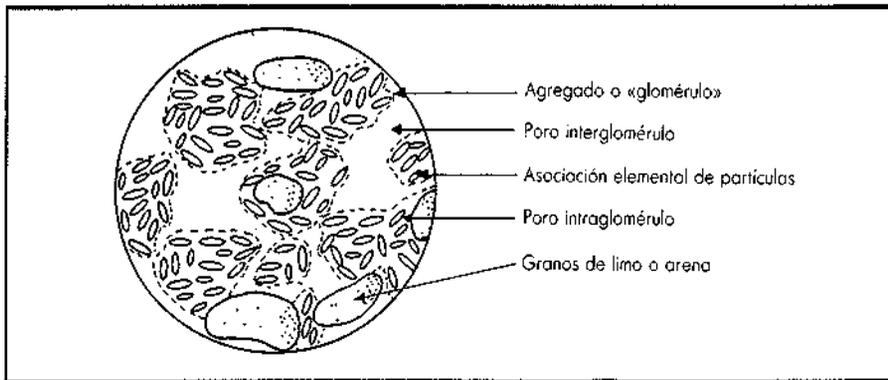


FIGURA 3. Representación esquemática de la microestructura (Alonso et al., 1987).

macroestructural y la «microestructura» o nivel microestructural. Ambos se describen a continuación con más precisión.

2.1. NIVEL MACROESTRUCTURAL

Se refiere a los poros abiertos e interconectados en los cuales el agua fluye debido a gradientes de succión (o altura piezométrica positiva si llegara el caso). En el resto de este artículo, la succión asociada a los poros interconectados ($p_a - p_w$) se denominará succión macroestructural. Estos poros están limitados por los glomérulos integrados por partículas de arcilla así como por granos de limo y arena. Los cambios de succión macroestructural, modificarán localmente el equilibrio mecánico y ello puede traducirse en deformaciones. Es importante darse cuenta de que este nivel macroestructural reacciona de forma instantánea a los cambios de succión. Los efectos diferidos son únicamente consecuencia del flujo no estacionario y de las condiciones de contorno variables.

El flujo de agua líquida y aire dentro de los poros de la macroestructura estará gobernado por una ley de tipo Darcy,

$$v_w = -K_w \nabla (z + p_w/\gamma_w) \quad (1)$$

$$v_a = -K_a (1/\gamma_a \nabla p_a + \nabla z) \quad (2)$$

donde v_w y v_a son las velocidades de agua y aire en sentido Darcy. Los coeficientes K_w y K_a varían fuertemente con el grado de saturación, S_r . Las expresiones siguientes, proporcionadas por Irmay (1954) y Yoshimi y Osterberg (1963) se han utilizado para cuantificar esta variación:

$$K_w(S_r) = K_w(S_r = 1) \left(\frac{S_r - S_{rm}}{1 - S_{rm}} \right)^3 \quad (3)$$

$$K_a(e, S_r) = A \frac{\gamma_a}{\mu_a} [e(1 - S_r)]^b \quad (4)$$

donde S_{rm} , A y b son constantes, e es el índice de poros y γ_a y μ_a el peso específico unitario del aire y su viscosidad respectivamente.

Para describir las deformaciones volumétricas, son necesarias dos «variables de estado» del nivel macroestructural: la porosidad, n (definida como la relación entre el volumen de poros abiertos y el volumen total) y el grado de saturación «macroestructural» (definido como el cociente entre el volumen de agua que rellena parcialmente los poros abiertos y su volumen total). Esta definición implica que el agua que hidrata los minerales activos, dentro de los glomérulos, no contribuye a S_r .

Las variables de estado S_r y n están relacionadas, en general, con el nivel de tensión y con la succión macroestructural. Se ha adoptado en este trabajo la siguiente expresión propuesta por Lloret y Alonso (1985) para describir el comportamiento de suelos parcialmente saturados que variaban entre arenas arcillosas y arcillas de alta plasticidad:

$$S_r = 1 - [b' + d'(\sigma - p_a)](1 - e^{-a'(p_a - p_w)}) \quad (5)$$

donde a' , b' , c' son constantes y σ la tensión total media. La función de estado para n (o, con más propiedad, la deformación volumétrica macroestructural) se presentará más adelante.

2.2. NIVEL MICROESTRUCTURAL

Está constituido por minerales activos de la arcilla, a menudo agregados en unidades mayores. Se define un contenido de agua, w , a nivel microestructural para expresar la cantidad de agua transferida a los minerales activos en el proceso de hidratación. La variable de estado w se define como el cociente entre el volumen de agua existente en el nivel microestructural y el peso total del suelo. El agua emigra desde el nivel macroestructural para hidratar la microestructura en un proceso que conduce a hinchamiento. w será una función del potencial de hidratación de la microestructura. A este potencial se le ha denominado succión microestructural, s_m . La velocidad de transferencia de agua desde los poros a la microestructura estará gobernada por los valores relativos de $(p_a - p_w)$ y s_m . Como primera aproximación, la variación lineal,

$$Q = a [s_m - (p_a - p_w)] \quad (6)$$

donde α es una constante, se ha utilizado en este trabajo. Q es el incremento de volumen del agua microestructural por unidad de tiempo y unidad de volumen del suelo. Por tanto,

$$Q = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (7)$$

Se propone una relación logarítmica entre w y s_m para describir la función de estado para w , de la forma siguiente:

$$w = w_0 - B_w \log(\sigma - p_a) - D_w \log(p_{at} + s_m) \quad (8)$$

donde, w_0 , B_w y D_w son parámetros del suelo y p_a la presión atmosférica. Es razonable suponer que D_w varíe con la tensión total en el sentido de que un aumento de σ impedirá progresivamente la hidratación de los minerales de la arcilla y de las sales. En la formulación desarrollada se ha utilizado, para D_w , la siguiente expresión:

$$D_w = D_{w0} - C_w \log(\sigma - p_a) \quad (9)$$

donde $(\sigma - p_a)$ es el exceso de tensión total media sobre la presión de aire y D_{w0} y C_w son constantes.

Las deformaciones volumétricas generadas a nivel microestructural se tratarán más adelante.

La formulación desarrollada se apoya en una determinada concepción de la estructura del suelo para proporcionar una base física al esquema conceptual. Se cree, sin embargo, que el modelo puede llegar a constituir una herramienta general para describir la respuesta diferida de suelos y rocas expansivas con independencia del tipo de microestructura.

3. FORMULACION DEL PROBLEMA

La discusión anterior implica que la deformación volumétrica del suelo, $d\varepsilon_0$, puede dividirse en dos componentes:

$$d\varepsilon_0 = d\varepsilon_{macro} + d\varepsilon_{micro} \quad (10)$$

Otros estudios previos sobre la caracterización de la deformación volumétrica de suelos no saturados (Lloret et al., 1987; Alonso et al., 1988) permiten relacionar la deformación volumétrica de la macroestructura del suelo con los cambios en succión de la forma siguiente:

$$\varepsilon_{v,macro} = -b_c \log[(p_a - p_w) + p_{at}] \quad (11)$$

donde b_c depende de la tensión de confinamiento. También en este caso pareció conveniente utilizar una ecuación similar a (9),

$$b_c = b_0 - c_c \log(\sigma - p_a) \quad (12)$$

La deformación volumétrica microestructural, $d\varepsilon_{micro}$, estará ligada al cambio de contenido de agua microes-

tructural. Una expresión simple para esta relación es,

$$d\varepsilon_{micro} = \alpha_r d\omega_m \quad (13)$$

donde $m^i = \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}$ y α_r es un parámetro no menor que 1, pues el proceso de hidratación puede provocar el desarrollo de nuevos poros cuyo volumen no está necesariamente contabilizado por el volumen de agua necesario para hidratar las partículas de arcilla. A este respecto, es significativa la observación experimental de Mustafayev y Chigniev (1980) en el sentido de que el volumen de hinchamiento de los suelos excede el volumen de agua absorbido.

En un problema general tridimensional las deformaciones volumétricas dadas por las ecuaciones (11) - (13) juegan el papel de una deformación interna, «autógena», provocada por cambios en succión. Estas deformaciones volumétricas deben añadirse a las deformaciones inducidas por los cambios tensionales para obtener la deformación total del suelo:

$$d\varepsilon = D^{-1} d\sigma^* + d\varepsilon_0 \quad (14)$$

donde $d\sigma^*$ es el vector de tensión total en exceso de la presión de aire y D la matriz de deformación global que caracteriza la respuesta mecánica del suelo.

El proceso de deformación puede concebirse de la manera siguiente: Un cambio local en la presión de agua (como consecuencia del régimen de flujo existente) modificará la succión macroestructural y modificará también la velocidad de hidratación de los minerales expansivos. Ambos fenómenos inducen expansiones (o contracciones) volumétricas locales que serán impedidas, en parte, por la rigidez del suelo y las condiciones de contorno. Por consiguiente, todo el suelo experimentará deformaciones y cambios tensionales, que modificarán el régimen de flujo, lo que desencadena un nuevo cambio volumétrico.

En resumen, los fenómenos de flujo de aire y agua a nivel macroestructural, los cambios de contenido de humedad de la microestructura y la respuesta tensión-deformación del suelo están acopladas. Incógnitas en este problema son: las presiones de aire y agua, la succión microestructural y los desplazamientos del suelo. Para resolverlo es necesario imponer la condición de continuidad de masa de aire y agua a nivel macroestructural, la continuidad de la masa de agua que hidrata la microestructura y el equilibrio tensional. Estas ecuaciones son:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_a n(1 - S_r + HS_r)] + \text{div } \rho_a (v_a + HV_w) = 0 \quad (15a)$$

$$\frac{\partial(\rho_w n S_r)}{\partial t} + \text{div}(\rho_w v_w) + Q\rho_w = 0 \quad (15b)$$

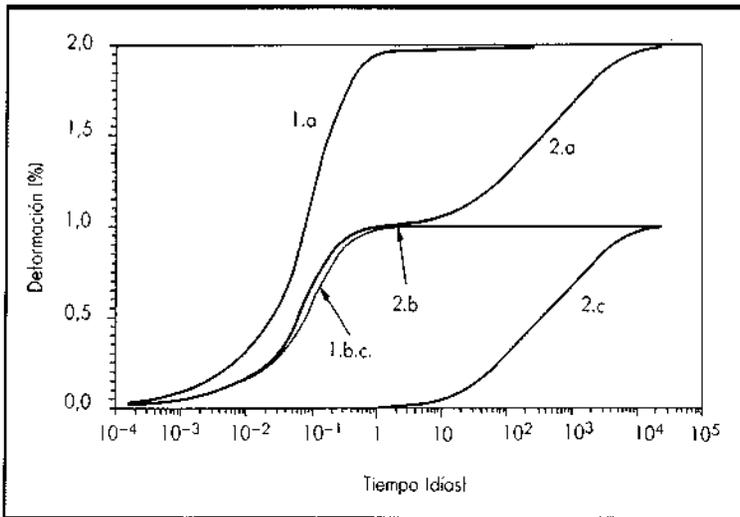


FIGURA 4. Resultados del modelo para diferentes valores de $aH^2\gamma_w/K$ (=100 (1); 0,0001 (2)). Se indican también los componentes de la deformación (a: deformación total; b: deformación macroestructural; c: deformación microestructural).

$$Q = \frac{\partial w}{\partial t} = a [s_m - (p_m - p_w)] \quad (15c)$$

$$\frac{\partial(\sigma_{ij} - \delta_{ij}p_m)}{\partial x_j} + \frac{\partial p_w}{\partial x_i} + b_i = 0 \quad (15d)$$

donde b_i son fuerzas de masa y H la constante de Henry. Desde el punto de vista macroestructural Q es un sumidero local cuya intensidad es proporcional a una medida del desequilibrio entre las dos succiones definidas.

4. PREDICCIONES DEL MODELO

Con el fin de ilustrar las características más significativas de la teoría desarrollada, se ha utilizado el modelo para reproducir un ensayo edométrico en el cual una muestra de 10 mm de espesor, que tiene una succión inicial (macro y micro) de 15 MPa, es sometida a una reducción a cero de la succión una de sus caras mientras que la opuesta se considera impermeable a las transferencias de agua y aire.

Se ha encontrado que el parámetro adimensional $aH^2\gamma_w/K$ donde K es la permeabilidad en condiciones de saturación, controla la velocidad de hinchamiento. Este hecho puede observarse en la figura 4 donde se ha representado, en función del tiempo, la deformación total de la muestra así como sus dos componentes (macro y micro). Puede observarse que, para un valor de $aH^2\gamma_w/K$ igual a 100, la velocidad de transferencia de agua para hidratar la microestructura es suficientemente grande como para que todo el proceso de hinchamiento esté controlado por la permeabilidad del suelo. Por el contrario, un valor de 10^{-1} del mismo parámetro implica un proceso lento de hidratación. Ello conduce a dos etapas bien marcadas en las curvas de hinchamiento-tiempo: En la primera etapa (que dura unos pocos días) la succión microestructural no cambia (y por consi-

guiente se impide el proceso de hidratación) mientras que la succión macroestructural tiende a cero. La segunda etapa comienza una vez que la primera prácticamente ha terminado y muestra una disminución progresiva y lenta de la succión microestructural.

Para valores de $aH^2\gamma_w/K$ intermedios entre los valores citados ambos procesos de hinchamiento ocurren simultáneamente. Se puede observar que cuanto mayor es α , más rápido es el flujo macroestructural (y por ende, la deformación). Ello demuestra como el efecto «sumidero» asociado a los fenómenos de hidratación puede afectar al flujo macroestructural. Ambos fenómenos están por consiguiente acoplados.

En la figura 5 se ha representado la evolución de la succión, macro y micro, en dos puntos de una muestra sometida a un ensayo de hinchamiento en un típico edómetro de succión controlada. En la piedra porosa superior se mantiene una presión de aire constante (y se

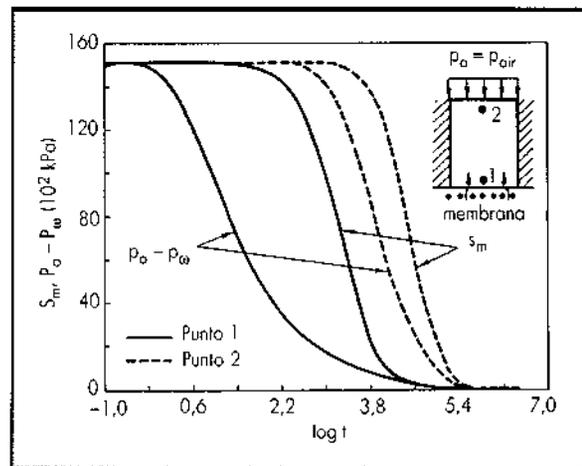


FIGURA 5. Disipación de la succión en dos puntos dentro de la muestra.

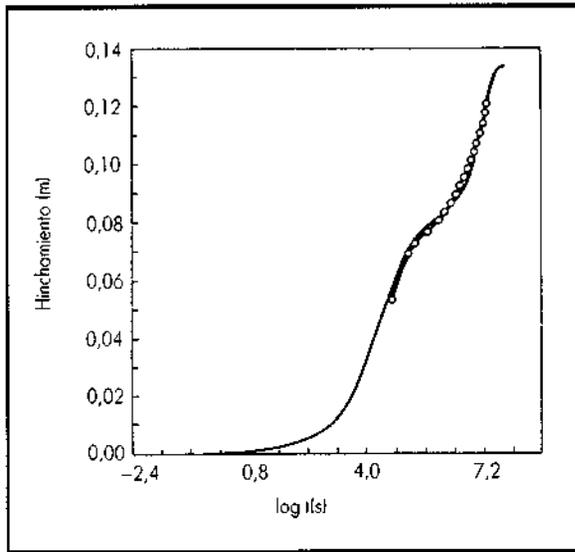


FIGURA 6. Hinchamiento medido y calculado en un ensayo edométrico.

impide el intercambio de agua) mientras que en la cara inferior existe una membrana saturada de alto valor de entrada de aire. Para simular esta membrana, generalmente de baja permeabilidad, se ha impuesto que el flujo de agua que la atraviesa es proporcional al valor de la presión de agua existente en la cara inferior de la muestra.

La figura 5 indica que la reducción de succión macroestructural en un punto próximo al borde inferior es mucho más rápida que la calculada en el contorno superior. Sin embargo, los resultados indican que, debido al pequeño valor de α adoptado en este ejemplo, la succión microestructural en las dos caras, superior e inferior, experimenta una velocidad de reducción similar en ambos casos. (El valor del parámetro $\alpha H^2 \gamma_w / K$ adoptado

en este caso, 5.5, no es comparable al valor utilizado en la figura 4 debido al efecto de retardo introducido en este último caso por la membrana.)

En la figura 6 se compara la evolución del hinchamiento medido en una muestra de margas expansiva sometida a una reducción de succión en sus dos caras (libre acceso del agua a ambas) con los resultados del modelo. Los resultados experimentales son los que ya se representaron en la figura 2. El ajuste modelo-experimento se logró variando los parámetros α , K y los valores relativos de los dos componentes (macro y micro) de la deformación a largo plazo.

Una aplicación paralela del modelo consistió en la predicción del hinchamiento de una central nuclear cimentada sobre margas expansivas. Se cree que la gran excavación que precedió a la construcción de esta central, condujo al desarrollo de fisuras en los 10-15 m superficiales de margas directamente por debajo de la cimentación. La forma de la excavación (una gran artesa sin drenaje natural) permite la existencia de un nivel freático permanente que proporciona agua al sistema de fisuras aludido. De esta forma, el agua hidrata la margas desde la superficie y desde la red de fisuras saturadas de agua, provocando el hinchamiento. Detalles adicionales sobre las propiedades de la margas y la historia de los hinchamientos pueden consultarse en Serrano et al. (1985).

Los parámetros del modelo se derivaron de los ensayos de laboratorio, interpretados mediante el modelo propuesto. Las dimensiones de la cimentación de la central y el régimen hidrológico permiten una modelización unidimensional del problema. En consecuencia, la simulación numérica se ha aplicado a una columna de roca, fisurada en la parte superior de forma que las fisuras están llenas de agua, sometida esta última a presión hidrostática. En la figura 7 aparece una discretización de la columna mediante elementos finitos.

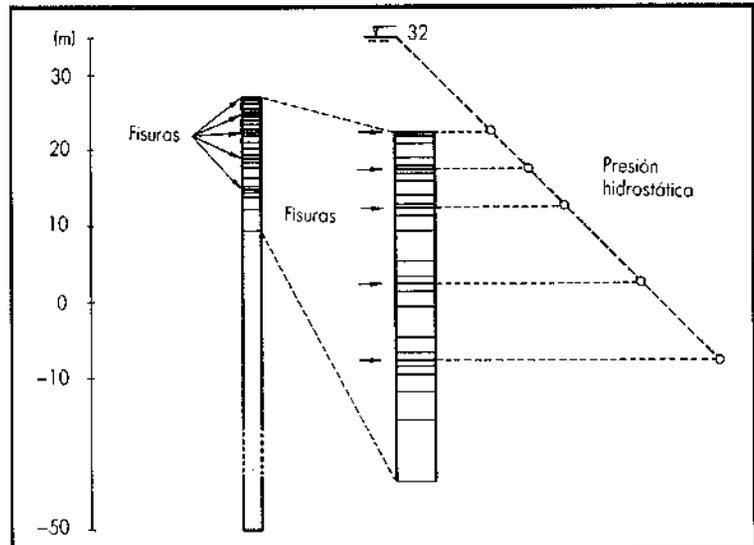


FIGURA 7. Discretización mediante elementos finitos de una columna de margas fisurada.

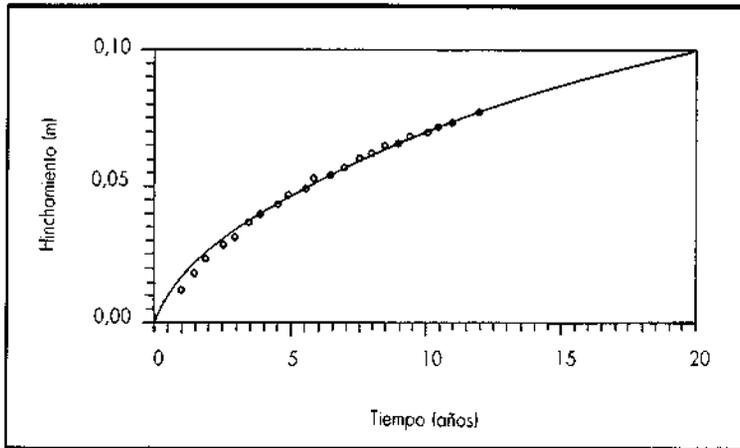


FIGURA 8. Comparación del hinchamiento medido en la cimentación y el resultado del modelo.

El modelo se ha utilizado para reproducir la historia de hinchamiento en los últimos 10 años, en un determinado lugar de la cimentación de la central (Fig. 8). La buena concordancia obtenida sugiere que los mecanismos principales de hinchamiento están adecuadamente representados en el modelo desarrollado.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo para describir los mecanismos de hinchamiento de suelos expansivos a partir de la consideración de la estructura del suelo en dos niveles. La evidencia proporcionada por estudios de la microestructura mediante microscopio electrónico ha sido útil para establecer las bases conceptuales del modelo. Una característica clave del modelo es la transferencia de agua desde el conjunto de poros conectados (macroestructura) para hidratar los minerales activos (microestructura). Las deformaciones volumétricas locales que se originan en ambos niveles (macro y micro) se suman y se consideran como deformaciones iniciales en un procedimiento general de cálculo tensión-deformación. De esta forma se modelan los fenómenos acoplados flujo-deformación que tienen lugar en suelos expansivos.

Una vez discretizadas, se han utilizado las ecuaciones del modelo para interpretar ensayos de hinchamiento bajo condiciones edométricas. Se ha comprobado que el modelo reproduce las dos etapas de hinchamiento observadas en los ensayos: una etapa «primaria» relativamente rápida, asociada a la permeabilidad del suelo, y una segunda etapa asociada a la hidratación de los minerales activos. El modelo puede ser útil para mejorar la comprensión de los fenómenos de hinchamiento y de los mecanismos que lo originan.

El modelo se aplicó, por último, a la predicción de la historia de hinchamientos observados en una central nuclear cimentada sobre margas expansivas, utilizando parámetros obtenidos en el ajuste de ensayos edométricos sobre muestras del terreno de cimentación. El acuerdo es satisfactorio y muestra la capacidad del mo-

delo para predecir el comportamiento de hinchamiento a largo plazo de cimentaciones en condiciones reales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Asociación Nuclear ASCO II. Se agradece el apoyo prestado para la realización del mismo.

REFERENCIAS

- ALONSO, E. E.; BATLLE, F.; GENS, A., y LLORET, A. (1988): «Consolidation analysis of partially saturated soils. Application to earthdam construction». *Proc. 6th. Int. Conf. Num. Methods Geomech.* Vol. 2: 1.303-1.308. Innsbruck.
- ALONSO, E. E.; GENS, A., y HIGHT, D. W. (1987): «Special problem soils». *General Report. Proc. IX ECSMFE*, Dublín.
- BRACKELY, I. J. A. (1975): «A model of unsaturated clay structure and its application to wall behaviour». *Proc. 6th. Reg. Conf. for Africa on SMFE*, 1:71-79. Durban.
- BRUIJN, C. M. A. de (1973): «Moisture redistribution and soil movements at Vereeniging (Transvaal)». *Proc. 3rd Int. Conf. Exp. Soils*: 73: 279-288. Haifa.
- BECHTEL (1988): *Internal Report*. San Francisco.
- CHEN, T. H. (1984): «The distribution and characteristics of expansive soils in China». *Proc. 5th Int. Conf. Exp. Soils*: 334-339. Adelaide.
- CHEN, T. H. (1965): «The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils». *Proc. Int. Conf. Exp. Clay Soil. Texas A. & M.*: 152-171.
- COLLINS, K. (1984): «Characterization of expansive soil microfabric». *Proc. 5th Int. Conf. Exp. Soils*: 37-41. Adelaide.
- DIDIER, G.; ROBERT, A., y AZZOUZ, R. (1984): «A survey method for swelling marls applied to an exploration gallery». *Proc. 5th Int. Conf. Exp. Soils*: 327-333. Adelaide.
- HAYNES, J. H., y MASON, R. G. (1965): «Subgrade soil treatment at the Apparel Mart», Dallas, Texas. *Proc. Int. Conf. Exp. Clay Soil. Texas A & M*: 172-182.
- IRMAI, S. (1954): «On the hydraulic conductivity of unsaturated soils». *Trans. Amer. Geophys. Union* 35:463-468.
- JENNINGS, J. E. (1965): «The theory and practice of construction on partly saturated soils as applied to South African conditions». *Proc. Int. Conf. Exp. Clay Soil. Texas A & M*: 345-303.

JOHNSON, L. D. (1980): «Field test sections on expansive soils». *Proc. 4th Int. Conf. Exp. Soils*: 262-283. Denver.

JUANG, C. H., y HOLTZ, R. D. (1986): «Fabric, pore size distribution and permeability of sandy soils». *Jnl. of Geot. Engng. ASCE*, 112(9): 855-868.

LIVNEH, M.; ALPAN, I. y LEONOV, M. (1973): «Preliminary investigation of creep and resilience properties of clay at the swelling process». *Proc. 3rd Int. Conf. Exp. Soils*: 249-256. Haifa.

LLORET, A., y ALONSO, E. E. (1985): «State surfaces for partially saturated soils» *Proc. 11th. ICSMFE*, 2:557-562, S. Francisco.

LLORET, A. A., GENS, A.; BATLLE, F., y ALONSO, E. E. (1987): «Flow and deformation analysis of partially saturated soils». *Proc. ECSMFE*. Vol. 2: 565-568. Dublín.

MAZURIK, A., y KOMORNIK, A. (1973): «Interaction of superstructural and swelling clays». *Proc. 3rd Int. Conf. Exp. Soils*: 309-317. Haifa.

McGOWN, A., y COLLINS, K. (1975): «The microfibrils of some expansive and collapsing soils». *Proc. 5th Pan. Am Conf. SMFE* 1:323-332. Buenos Aires.

MUSTAFAYEV, A. A. O., y CHIGNIEV G. D. (1980): «Rheology of swelling soils and deformation forecast». *Proc. 4th Int. Conf. Exp. Soils*: 769-780. Denver.

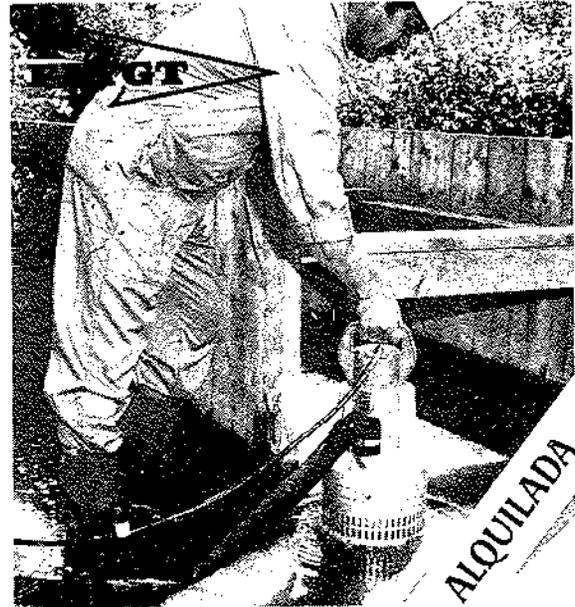
POPESCU, M. (1980): «Behaviour of expansive soils with a crumb structure». *Proc. 4th Int. Conf. Exp. Soils*, 1:158-171, Denver.

SERRANO, A. A.; DAPENA, J. E., y GARCIA-PAREDES, I. (1985): «The behaviour of foundations on expansive gypsum-bearing marls». *Proc. 11th. ICSMFE*, 4:2.247-2.252. S. Francisco.

SMART, P. (1973): «Structure of a red clay soil from Nyeri, Kenya». *Quarterly Jnl. of Eng. Geology* 6(2): 129-139.

YOSHIMI, V., y OSTERBERG, J. O. (1963): «Compression of partially saturated cohesive soils». *Jnl. Soil Mech. Foun. Eng. Div. ASCE* 89 (SM4): 1-24.

¡Póngala donde la necesite!



Alquile una bomba sumergible Flygt.

Economía:

Comprar una bomba para un trabajo eventual o transitorio puede ser una inversión poco rentable. Simplemente alquilela, y pague sólo el tiempo que la utilice.

Disponibilidad:

Usted puede conseguir, **cerca y con toda rapidez**, el equipo de bombeo que necesite.

Servicio:

Detrás del equipo de bombeo que Ud. alquila, está la Organización Técnica TFB, que atiende más de 25.000 instalaciones en España y que le asegura su permanente funcionamiento.

Garantía:

FLYGT tiene la gama de bombas sumergibles más extensa del mundo, y la Red de Servicio TFB es la más completa y eficaz en todo el territorio nacional.

FLYGT es, en España

TFB

TECNICAS DE FILTRACION Y BOMBEO, S.A.

• VENTA • ALQUILER • SERVICIO

Alquiler con opción a compra

MADRID 28040 - Aravaca, 24 - Tel. (91) 533 35 08*
 BARCELONA 08013 - Lepanto, 149 - Tel. (93) 232 47 61
 BILBAO 48016 (Asua) - Carretera Erieches, 5 - Tel. (94) 453 01 94
 VALENCIA (Cuart de Poblet) - Ernesto García Raga, s/n. - Tel. (96) 154 63 15
 SEVILLA 41007 - J. M.ª de Ybarra y Gómez Rull, 28
 Polígono Industrial "Ctra. Amarilla" - Tel. (95) 467 30 00

Almería	951 - 26 15 11	Oviédo	985 - 24 39 43
Ciudad Real	926 - 22, 25 26	Las Palmas de	
Córdoba	957 - 26 44 58	Gran Canaria	928 - 31 36 17
La Coruña	981 - 23 78 49	Salamanca	923 - 21 58 54
Granada	958 - 20 77 27	San Sebastián	943 - 37 07 06
Huelva	955 - 24 20 18	Santander	942 - 34 76 49
Huesca	974 - 22 59 16	Valladolid	983 - 29 48 38
León	987 - 25 23 75	Vigo	986 - 27 15 07
Málaga	952 - 29 76 96	Zaragoza	976 - 27 33 32
Palma de			
Mallorca	971 - 25 27 81		



Ponga a su constructor de cara a la pared.

Y que le enseñe. Que le demuestre si de verdad lleva ISOVER.

Al comprar una casa la gente se fija cada vez más en los detalles. Como en lo que hay detrás de las paredes. Ya saben que, si su casa no está bien aislada, además de soportar los gritos del vecino, tendrán que pagarlo en calefacción. Por eso piden un aislamiento como exige la ley.

ISOVER es lana de vidrio. Por eso consigue absorber hasta el 70% del ruido incidente.

Y como aislamiento térmico, con ISOVER podrá reducir hasta en un 40% los recibos de calefacción. Así contribuimos a proteger el medio ambiente: menos calefacción, menos contaminación. No se nos escapa nada. ISOVER es confort. Y también seguridad. Porque ISOVER es incombustible y no desprende gases tóxicos.

Recuérdelo. Exija a su constructor que mire por usted. Que mire a la pared.



Con ISOVER es otra casa.



Solicite información a ISOVER. Apartado 61.021. 28080 Madrid.

Nombre _____

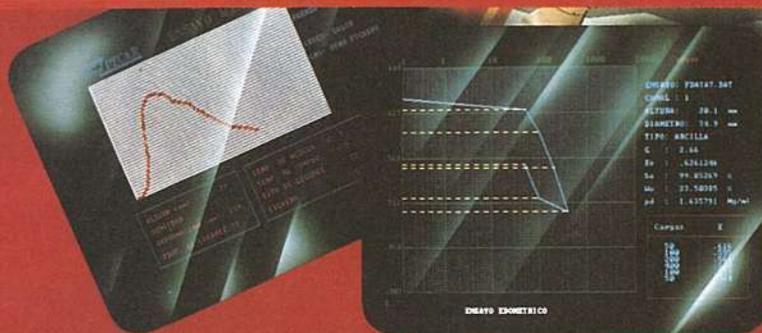
Profesión _____

Dirección _____

Población _____

C.P. _____

LABORATORIOS de CARRETERAS



CONSULTENOS:

Apartado de Correos: 7042.
28080 MADRID
Teléfs. (91) 690 60 13
690 60 63
Fax: 615 89 14

Telex: 43.773 DZMA.E
Att. SUZPECAR
Bembibre, 37-39
Polg. Ind. Cobo Calleja
FUENLABRADA (MADRID) SPAIN

DIVISION SUDAMERICA
Oficina: Avda. Libertador, 75
(Junto a Torre Maracaibo)
P.H.B.
CARACAS

Fábrica: Puerto Ordaz
VENEZUELA

