

Hidratación de un relleno compactado que contiene agregados de alta densidad

E. E. ALONSO (*)
A. LLORET (*)
A. GENS (*)
C. H. DELAHAYE (**)
J. A. FACIO (*)

RESUMEN Se han investigado, mediante ensayos de laboratorio, las características de hidratación de mezclas expansivas constituidas por una matriz de polvo arcilloso y agregados (pastillas de pequeño tamaño) de arcilla de alta densidad. Estas mezclas se han propuesto como material de relleno para aislar residuos potencialmente contaminantes del medio geológico que los rodea. Se ha simulado el comportamiento de este material de relleno bajo las condiciones existentes "in situ" mediante un análisis hidro-mecánico acoplado. En el análisis, el relleno se caracterizó de acuerdo con los resultados del programa de ensayos de laboratorio.

HYDRATION OF A COMPACTED BACKFILL WHICH CONTAINS HIGH-DENSITY AGGREGATES

ABSTRACT *Hydration characteristics of an expansive mixture of compacted clay matrix and high density pellets have been investigated by means of laboratory tests. These mixtures are proposed as a suitable barrier material to isolate hazardous wastes from the surrounding geological environment. The behaviour of this material under conditions prevailing "in situ" has been simulated by means of a coupled flow-deformation analysis. The backfill was characterized according to the results of the laboratory tests program.*

Palabras clave: Relleno compactado; Hidratación; Mezclas expansivas; Ensayos de laboratorio; Agregados de alta densidad; Arcillas expansivas.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los propósitos de las barreras de arcilla compactada instaladas alrededor de contenedores de residuos de alta actividad es crear una barrera altamente impermeable que impida la migración de los contaminantes hacia el medio geológico externo. Como material adecuado para este tipo de barreras se ha propuesto el uso de arcillas expansivas de un amplio rango de actividad. Un posible procedimiento de sellado consiste en la preparación de bloques de arcilla fuertemente compactada, y por tanto expansiva, que se colocan más tarde "in situ" rellenando el espacio situado entre el contenedor y la galería o pozo del almacenamiento. El agua necesaria para la hidratación de la arcilla procede de la roca circundante, típicamente un macizo saturado, de granito, arcilla u otro material geológico adecuado.

Una dificultad de este procedimiento es la necesidad de fabricar los bloques de arcilla con una geometría suficientemente precisa para rellenar, con un mínimo de huecos, el es-

pacio anular alrededor del contenedor. En cualquier caso, las juntas entre bloques, o entre bloque y roca, son de difícil sellado. Por otra parte, el proceso de instalación de los contenedores y los bloques hace necesaria una compleja labor de puesta en obra. Una alternativa que se ha considerado es la preparación de un relleno expansivo con dos componentes: una matriz de polvo arcilloso y unos agregados de arcilla altamente compactada en forma de pequeñas pastillas de un tamaño del orden del centímetro. La mezcla puede ser manejada e instalada como un relleno homogéneo y por tanto, se minimizan los problemas asociados a la existencia de huecos abiertos. El carácter expansivo de este relleno se asegura mediante la presencia de los agregados de arcilla con alta densidad.

La estructura de un material artificial de este tipo tiene ciertas similitudes con la microestructura de arcillas expansivas tanto naturales como compactadas. En el primer caso, las unidades de capas superpuestas de arcilla juegan el papel de los agregados expansivos en el relleno manufacturado, [Gens et al. (1993)].

En la primera parte de este artículo se presentan los resultados de la investigación de tipo experimental que se ha realizado sobre el comportamiento de agregados altamente compactados embebidos en el seno de una matriz de polvo arcilloso. En la segunda parte, se describe la simulación numérica del proceso de hidratación en un esquema de barrera

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S. de Ing. Caminos de Barcelona, UPC.

(**) Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

propuesto para el aislamiento de residuos. Finalmente, se discuten algunos de los resultados más relevantes que se han obtenido.

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se prepararon muestras para ensayos de hidratación compactando polvo seco de arcilla de Boom, un depósito de arcilla natural del Mioceno situado en Bélgica. El polvo presentaba una humedad pequeña (3%) que correspondía a las condiciones de equilibrio con la humedad del laboratorio. Este suelo puede clasificarse como una arcilla de alta plasticidad ($w_p = 56\%$; $w_L = 29.2\%$). Su fracción arcillosa es del 50% y por tanto, su actividad es moderada ($A = 0.53$).

2.1. RELACIÓN SUCCIÓN-HUMEDAD

A fin de conocer la curva de retención de la arcilla de Boom se compactaron probetas cilíndricas ($\phi = 15$ mm; $h = 12$ mm) con densidades secas iniciales variando en el rango entre 12 y 20 kN/m³. Las probetas se colocaron en recipientes herméticos, donde se imponía la humedad relativa del aire mediante soluciones de CNa con diferentes concentraciones, hasta alcanzar una humedad constante. La Figura 1 muestra la variación de la succión con el grado de saturación y la densidad seca para una temperatura de 22° C. En la figura se indican también los dos puntos asociados a las condiciones del polvo "seco" ($w = 3\%$) compactado a un peso específico seco de 10 kN/m³ (matriz) y de 20 kN/m³ (agregados). La succión inicial en ambos casos es parecida y es relativamente alta [próxima a 70 MPa, ($pF = 5.8$)].

2.2. ENSAYOS DE INUDACIÓN BAJO DIFERENTES CARGAS DE CONFINAMIENTO

Se ensayaron muestras homogéneas de polvo "seco" compactado a diferentes densidades ($\gamma_d = 12, 17$ y 20 kN/m³) a fin de caracterizar el comportamiento de hinchamiento/colapso, al saturar el suelo bajo diferentes tensiones de confinamiento. En todos los ensayos, realizados en edómetros convencionales, las muestras se cargaron manteniendo su humedad constante hasta alcanzar la carga vertical deseada

(en un rango que cubría desde 10 kPa hasta 1 MPa). Posteriormente se inundaban y se medían sus deformaciones hasta alcanzar las condiciones estacionarias.

Con el objeto de investigar el comportamiento de la mezcla polvo-agregados, se prepararon agregados de arcilla de Boom con un peso específico seco de 20 kN/m³ y tamaños comprendidos entre 2 y 2.2 mm. Este tamaño se eligió teniendo en cuenta las dimensiones del anillo del edómetro (50 x 10 mm). Los agregados se obtuvieron mediante machaqueo manual de discos de polvo arcilloso compactado estáticamente y sometiendo a las "partículas" resultantes a un proceso de tamizado a fin de descartar los tamaños de agregado no deseados. Posteriormente, se prepararon probetas mezclando los agregados con polvo en una proporción volumétrica del 50/50%. La mezcla se compactaba estáticamente hasta alcanzar un peso específico seco global de 15 kN/m³ ($\gamma_d = 10$ kN/m³ en el polvo que forma la matriz). Las probetas resultantes se sometieron a inudación bajo carga de forma similar a la empleada en los ensayos sobre muestras homogéneas. Dado que los agregados y la matriz que los rodea parecen tener una succión inicial similar (ver los puntos representativos en la Figura 1) puede argumentarse que la mezcla está inicialmente cerca de las condiciones de equilibrio en lo que respecta a la redistribución interna de humedad por efecto de gradientes de succión entre los agregados y la matriz.

La Figura 2 muestra la evolución de los desplazamientos medidos en las probetas de mezcla (M) y homogéneas (G) mencionadas anteriormente, cuando se saturan bajo una carga vertical de 10 kPa. Hay que tener en cuenta que a fin de comparar los resultados, la escala de deformación se ha normalizado con respecto a la máxima deformación (ya sea de colapso o de hinchamiento) medida al final del ensayo.

Estas curvas son útiles para comparar la velocidad de entrada de agua en el suelo en las muestras homogéneas y en las muestras de mezcla con la misma densidad seca global. Se puede observar que la velocidad de deformación en la muestra con agregados está controlada en mayor medida por la densidad de la matriz que por la densidad global del conjunto.

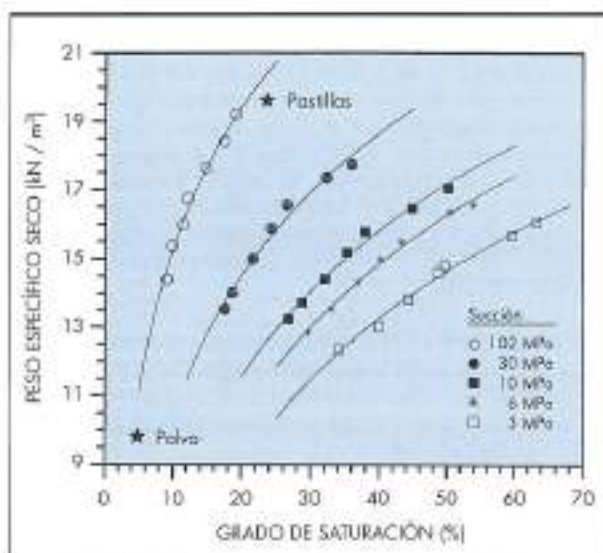


FIGURA 1. Relación entre peso específico seco, grado de saturación y succión en muestras compactadas de la arcilla de Boom.

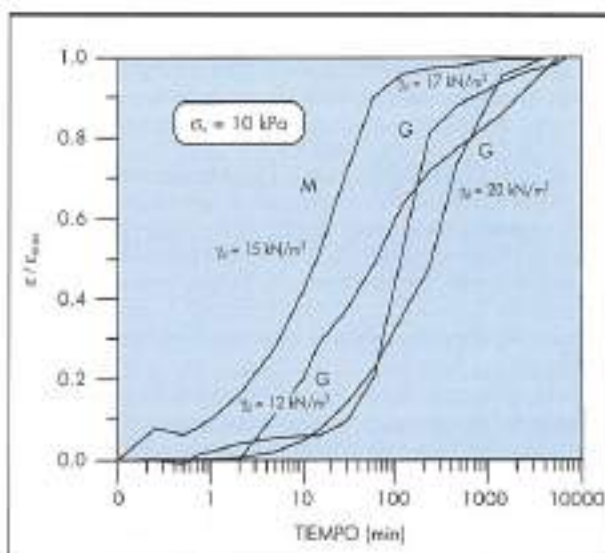


FIGURA 2. Evolución de desplazamientos medidos en muestras homogéneas (G) y de mezcla (M), bajo una carga vertical de 10 kPa.

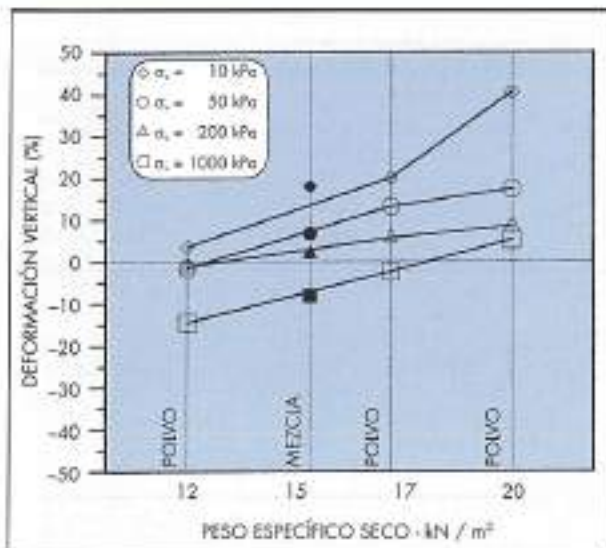


FIGURA 3. Deformaciones de hinchamiento medidas en muestras homogéneas y de mezcla, compactadas a diferentes densidades.

En la Figura 3 se han representado la deformaciones de colapso o de hinchamiento medidas tras el proceso de saturación, tanto en probetas homogéneas como en probetas de mezcla, para diferentes niveles de tensión de confinamiento. En este caso, el comportamiento observado en las muestras de mezcla parecer estar controlado por la densidad global de la mezcla y puede considerarse como muy similar al comportamiento de una muestra homogénea con el mismo peso específico seco ($\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$).

El conjunto completo de las curvas deformación-tensión vertical obtenidas en los ensayos sobre probetas de mezcla se ha recogido en la Figura 4. Para la densidad seca correspondiente al caso particular de las probetas de mezcla, la transición de un comportamiento de hinchamiento a uno de colapso al saturar el suelo se produce para una tensión vertical de unos 300 kPa aproximadamente. La influencia de la historia de tensiones y cambios de succión en el valor de las deformaciones que puede observarse en los gráficos de la Figura 4 es similar al comportamiento observado en suelos expansivos parcialmente saturados y ha sido analizado en detalle en numerosas ocasiones (Gens y Alonso, 1992).

3. MODELIZACIÓN DE UN ESQUEMA DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS

3.1. DEFINICIÓN

La simulación corresponde a la realización de un ensayo de hidratación "in situ", asociado a un esquema de almacenamiento de residuos constituido por contenedores cilíndricos alojados en pozos verticales (de un diámetro de 50 cm) excavados desde galerías subterráneas en una formación de arcilla natural saturada. La Figura 5d muestra una sección horizontal representativa del experimento "in situ". Un cilindro metálico rígido ($\phi = 8 \text{ cm}$), que actúa como dren o como rejilla de inyección de agua para acelerar la completa saturación del relleno, ocupa el eje del ensayo. El procedimiento de instalación del ensayo puede seguirse en los esquemas mostrados en las Figuras 5a-d.

Anteriormente a la excavación del pozo vertical, se ha asumido una tensión efectiva isotrópica de 3 MPa en la arcilla

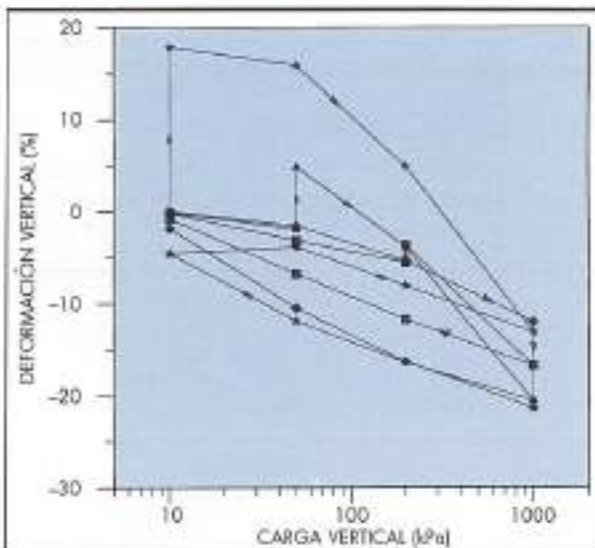


FIGURA 4. Resultados de los ensayos de inundación bajo carga sobre muestras de mezcla.

natural inalterada. Posteriormente se simula la excavación del pozo (se elimina el área sombreada de la Figura 5b) y el efecto de la compactación (ligera) del relleno se introduce como una tensión radial en el contorno interior (σ_r) que se tomó igual a 50 kPa (Fig. 5c). Por otra parte, como estado inicial, se asumió un valor nulo de la presión de agua en el contacto entre el relleno y la arcilla natural y un incremento lineal de la presión de agua hasta alcanzar un valor de 0.8 MPa a una distancia de 120 cm del centro. Para distancias mayores, se consideró como valor inicial de la presión del

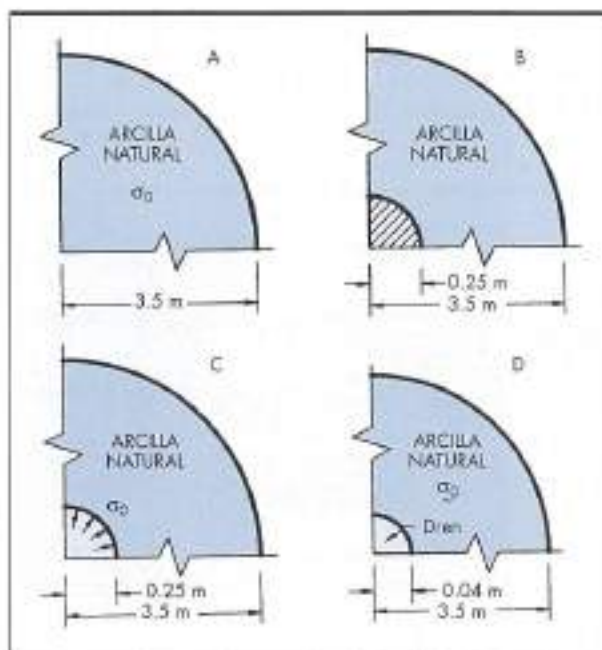


FIGURA 5. Simulación del proceso de instalación del ensayo "in situ": a) Estado inicial; b) excavación del pozo; c) compactación del relleno; d) estado final.

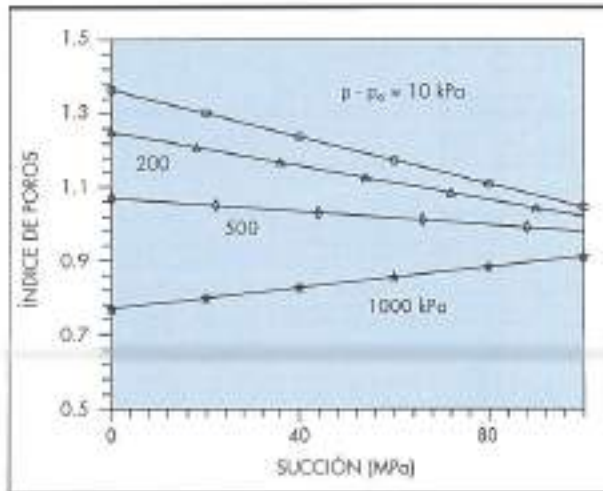


FIGURA 6. Superficie de estado para el índice de poros del relleno.

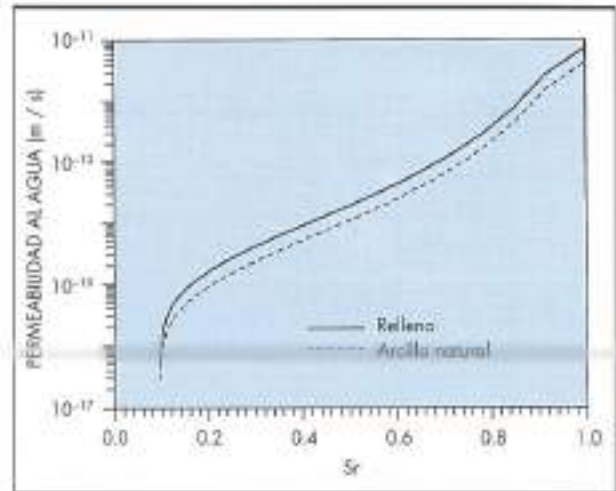


FIGURA 7. Relación entre la permeabilidad al agua y el grado de saturación.

agua un valor constante de $u_0 = 0.8$ MPa. La succión inicial del relleno, en base a los resultados presentados en la Figura 1, se tomó cercana a 100 MPa. En el contacto entre el relleno y el cilindro metálico se impuso una condición de contorno de superficie de resque (el cilindro actúa como dren y permite salir al agua del relleno cuando esta alcanza presiones positivas). En el contorno más alejado del centro ($r = 3.5$ m) se impuso que la presión del agua se mantiene inalterada (0.8 MPa).

3.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El análisis que se presenta en la próxima sección está basado en el marco teórico para el comportamiento acoplado de flujo y deformación de suelos parcialmente saturados descrito en Alonso et al (1988).

El comportamiento expansivo del suelo se describe por medio de "superficies de estado" que proporcionan una relación entre las deformaciones volumétricas y los cambios de tensiones netas y de succión. El modelo también requiere una relación tensión-deformación de tipo general (por ejem-

plo elasticidad), la definición de la curva de retención y la variación de la permeabilidad al agua con el grado de saturación.

Para el análisis, en base a los resultados experimentales mostrados en la Figura 3 para una mezcla de polvo y agregados con un peso específico seco global de 15 kN/m^3 , se adoptó la "superficie de estado" mostrada en la Figura 6. El proceso transitorio de desecación experimentado por la arcilla natural se modeló con una superficie de estado similar derivada de los resultados experimentales obtenidos en muestras con un peso específico seco de 17 kN/m^3 .

Las curvas de retención se definieron de acuerdo con los datos experimentales mostrados en la Figura 1. La permeabilidad saturada del relleno se tomó igual a la medida en laboratorio ($K_{sat} = 7 \times 10^{-12} \text{ m/s}$). En la arcilla natural se adoptó un valor de la permeabilidad de $4 \times 10^{-12} \text{ m/s}$. La reducción de la permeabilidad con la succión se modeló de acuerdo con la ley empírica propuesta por Jacquard (1988). En la Figura 7 se muestra un gráfico con la ley adoptada.

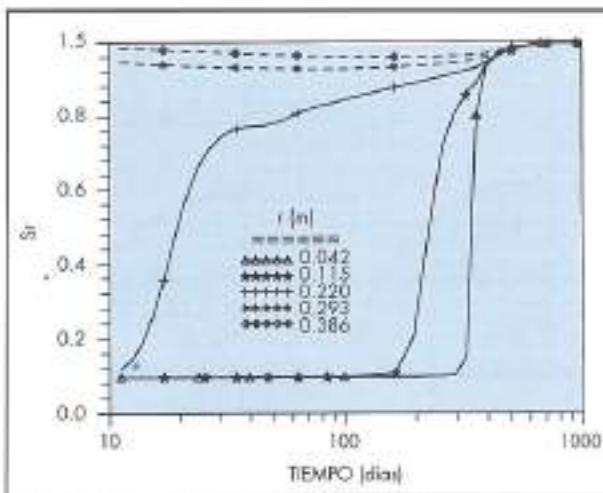


FIGURA 8. Evolución del grado de saturación en algunos puntos seleccionados.

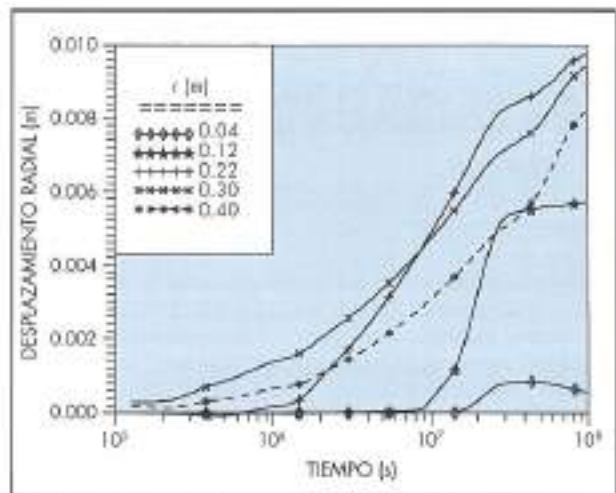


FIGURA 9. Evolución del desplazamiento radial en algunos puntos del relleno y de la arcilla natural.

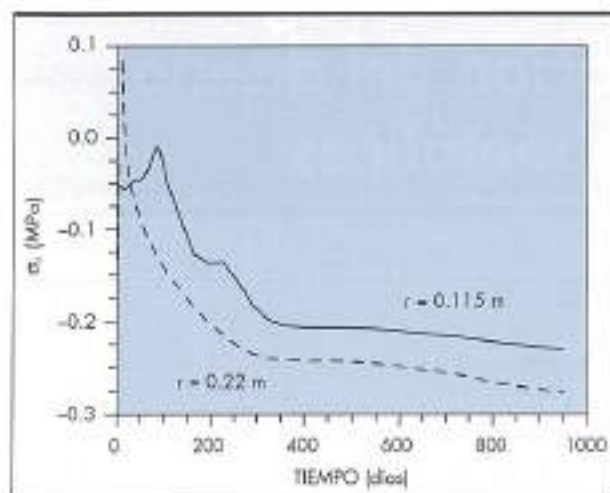


FIGURA 10. Evolución de la tensión radial en dos puntos del relleno. (las compresiones son negativas).

3.3. RESULTADOS

Los cálculos se realizaron con un programa de elementos finitos cuyas bases teóricas y formulación matemática están descritas en Alonso et al. (1988). El programa resuelve de forma acoplada los fenómenos simultáneos de flujo y deformación que tienen lugar en la arcilla natural y en el relleno expansivo.

Los resultados de los cálculos se presentan como variaciones en el tiempo de un parámetro seleccionado o de una variable de estado en ciertas posiciones identificadas por su distancia al eje central. El régimen de flujo está convenientemente representado por la evolución del grado de saturación (Figura 8). El relleno inicialmente no saturado se humedece progresivamente a medida que el frente de saturación progresa hacia el centro. En la arcilla natural se observa también localmente un proceso de secado transitorio.

La Figura 9 muestra la evolución de los desplazamientos radiales en los mismos puntos. Los máximos desplazamientos hacia el exterior en condiciones estacionarias tienen lugar en el contacto entre el relleno y la arcilla natural.

Las tensiones radiales en los mismos puntos seleccionados se muestran en la Figura 10. Los puntos situados en el relleno experimentan un incremento continuo de la tensión radial (en compresión) hasta alcanzar las condiciones estacionarias.

Las trayectorias de tensiones seguidas en los mismos puntos proporcionan un mejor conocimiento de los fenómenos mecánicos que se desarrollan durante la hidratación del relleno. La figura 11 muestra la variación de la tensión media neta en relación a los cambios de succión. Típicamente el relleno sigue una trayectoria propia de un ensayo de presión de hinchamiento (la presión media neta de confinamiento aumenta a medida que disminuye la succión). En los puntos cercanos al contacto con el terreno natural se observa un ciclo de variación de la tensión de confinamiento cuando el frente de saturación atraviesa la posición del punto.

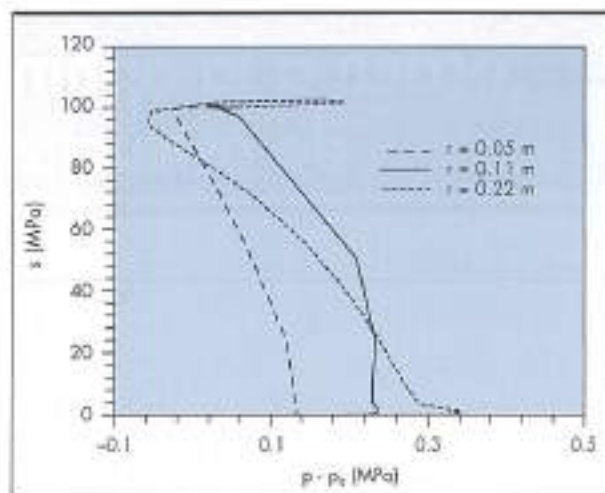


FIGURA 11. Trayectoria de tensiones en el espacio tensión media neta ($p - p_a$), succión (s).

4. CONCLUSIONES

En el contexto del almacenamiento de residuos, las mezclas de agregados de arcilla con alta densidad y una matriz arcillosa moderadamente compactada se han propuesto como barreras para aislar los contenedores de residuos del medio geológico que los rodea. Las velocidades del flujo de agua en la mezcla de relleno están controladas por la densidad de la matriz mientras que las deformaciones de hinchamiento tras la saturación parecen depender de las densidades secas globales. La simulación numérica del proceso de hidratación progresiva de un sistema de almacenamiento que hace uso de este tipo de material de relleno, ha puesto de manifiesto la naturaleza compleja de este proceso. A medida que el frente de saturación progresa hacia el interior, anillos de arcilla que ya han expandido se desplazan hacia el exterior. Las tensiones radiales experimentan un incremento continuo (en compresión) a medida que la succión se reduce y el relleno se satura. La tensión media de confinamiento en cada punto también aumenta pero exhibe un ciclo de disminución - incremento cuando el frente de saturación atraviesa la posición del punto.

REFERENCIAS

- ALONSO, E.; BATLLE, F.; GENS, A. and LLORET, A. (1988). Consolidation analysis of partially saturated soils. Application to earthdam construction. *Num. Meth. in Geomech.*, Innsbruck, 1303-1308.
- GENS, A. and E. E. ALONSO (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 1013-1032.
- GENS, A.; ALONSO, E. E.; LLORET, A. and BATLLE, F. (1993). Prediction of long term swelling of expansive soft rocks: A double structure approach. *Geotechnical Eng. of Hard Soils-Soft Rocks* Anagnostopoulos et al. eds. Balkema, 495-500.
- JACQUARD, C. (1988). Etude expérimentale d'une barrière capillaire avec un modèle de laboratoire. C.G.I. Thesis.