

CARACTERÍSTICAS DEL HINCHAMIENTO DE CIERTAS MARGAS YESIFERAS DE LA CUENCA DEL EBRO

(TARRAGONA-ESPAÑA)

F. ESTEBAN (*)
A. OKAN (**)
C. SAGASETA (***)

RESUMEN. El material estudiado pertenece a una formación margo-yesífera procedente del Terciario con una composición mineralógica media basada en la presencia de calcita, dolomita, yeso, anhidrita, cuarzo y filosilicatos. La expansión de esta roca ha sido estudiada en laboratorio para tratar de identificar los mecanismos que la hacen susceptible de aumentar su volumen cuando varían las condiciones de tensión y humedad. El resultado de la investigación muestra que la existencia de arcillas expansivas y la recristalización de los sulfatos son responsables del hinchamiento de este material.

ABSTRACT. The studied material forms part of a Tertiary gypsiferous-mare formation, composed of calcite, dolomite, and anhydrite, quartz and filosilicates. The rock expansion has been studied under laboratory conditions to try to find out the processes that make it increase in volumen when there are changes in stress and humidity. The results of the research clearly show the presence of expansive clays and recrystallisation, and the sulphates are responsible for the swelling of this material.

INTRODUCCION

El material estudiado es una roca de tipo margoso donde se haya cimentada una central nuclear. El terreno está formado por una serie de diferentes tipos de margas y lutitas con intercalaciones de tramos más arenosos. Todo este conjunto se encuentra bandeado por numerosas vetas de yeso de espesores variables entre las décimas de milímetro y varios centímetros.

Estos materiales son rápidamente alterables en presencia de agua, llegando, incluso, a desintegrarse a causa de un aumento de volumen importante y al desarrollo de presiones de hinchamiento notables.

La descompresión subsiguiente a la gran excavación realizada para la construcción de la central dio lugar a un levantamiento viscoelástico, que muy probablemente provocó la apertura de fisuras en los primeros metros del subsuelo, aumentando la permeabilidad secundaria del macizo rocoso y facilitando de este modo el acceso del agua a las zonas vírgenes del material.

El desarrollo en profundidad del hinchamiento de los materiales activos ha provocado el levantamiento de la superficie de excavación. Este levantamiento, que tiene una expresión irregular en el área afectada, ha alcanzado un valor máximo de 120 mm con una velocidad de 0,2 mm/año después de 15 años de iniciarse el control del fenómeno.

A la vista de esta situación se inició un estudio encaminado a obtener el mayor conocimiento posible sobre los fenómenos de expansión del subsuelo de la central.

La investigación se ha realizado de forma compartida entre los laboratorios de Geotecnia y Geofísica de EE. UU. y el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en Madrid y tiene como objetivos determinar cuáles son las causas por las que dichos fenómenos se están desarrollando en tan dilatado período de tiempo e identificar los agentes causantes del hinchamiento.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Los materiales estudiados proceden de los depósitos endorreicos de la Depresión del Ebro, correspondientes al Oligoceno Superior (Cabrera, 1984). Las margas, que componen la mayor serie estratigráfica de las zonas, responden a un tipo de sedimentación intermedia entre depósitos de prodelta, lacustre y llanura aluvial.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

(**) Civil Engineer, Bechtel España, S. A.

(***) Catedrático de la Universidad Politécnica de Cantabria.

Fenómenos de diagénesis temprana (retracción combinada con bombeo de aguas salobres) son los responsables de la presencia de sulfatos en el seno de la roca.

Para determinar la estructura y composición mineralógica de este material se han realizado numerosos ensayos petrográficos y mineralógicos de los que cabe destacar los resultados obtenidos en los ensayos de D.R.X. apoyados por microscopía electrónica de transmisión y barrido.

De forma generalizada, la roca está compuesta por calcita, dolomita, yeso, anhidrita, cuarzo, filossilicatos y otros componentes en pequeña proporción. De los filossilicatos un porcentaje significativo lo componen las arcillas de características expansivas de diverso potencial (smectitas, cloritas expansibles, interestratificados, etc.). Estos componentes, que en mayor o menor medida, aparecen de modo sistemático en todas las muestras, indican una cierta homogeneidad de las fuentes materiales que dieron origen a esta roca, pero el estudio detallado de la variación de dicho componente en la profundidad muestra una heterogeneidad importante.

El aspecto más significativo lo ofrece la variación del porcentaje de sulfatos con la profundidad, pues mientras la anhidrita es prácticamente inexistente en la superficie, aumentando la profundidad, el yeso presenta un perfil contrario. En este sentido, Ordóñez *et al.* (1990), al hablar sobre este material, presentan una aproximación al perfil del porcentaje de yeso presente en la roca mediante una expresión de tipo exponencial, con tendencia a desaparecer a los 140 metros de profundidad. En la tabla I se resumen esta variación de los componentes mineralógicos con la profundidad.

La humedad de la roca en estado natural es, por lo general, muy baja, no superando en ningún caso el valor de 6 %. A pesar de tan baja humedad, la escasa porosidad del material, del orden del 10 %, produce un grado de saturación próximo al 100 %.

COTA	CUARZO	CALCITA	DOLOMITA	YESO	ANHIDRITA	FILOSIL.
39,0	2	46	23	9	2	9
37,5	10	34	30	17	1	8
27,8	8	31	17	14	11	17
26,0	7	31	22	11	12	9
21,1	10	32	18	11	14	15
17,2	9	35	19	5	15	15
8,5	12	32	21	4	22	9

TABLA I. Composición mineralógica media en %.

La permeabilidad de la roca intacta es del orden de 10^{-10} cm/seg, mientras que la permeabilidad secundaria del macizo es muy alta debido a la existencia de fracturas y zonas de alteración asociadas a las vetas de yeso.

Los ensayos destinados a determinar la relación succión-humedad en las margas se han efectuado mediante dos sistemas: en la célula la membrana de presión y en el desecador de vacío. El resultado de estos ensayos ha permitido configurar la relación media de la figura 1.

La succión, en estado natural, varía entre 15 y 45 Mpa con una ligera tendencia a aumentar con la profundidad.

TECNICAS EXPERIMENTALES

Para determinar la susceptibilidad al hinchamiento de este material ha sido necesario tener en cuenta diversos factores a la hora de diseñar los ensayos, en una fase

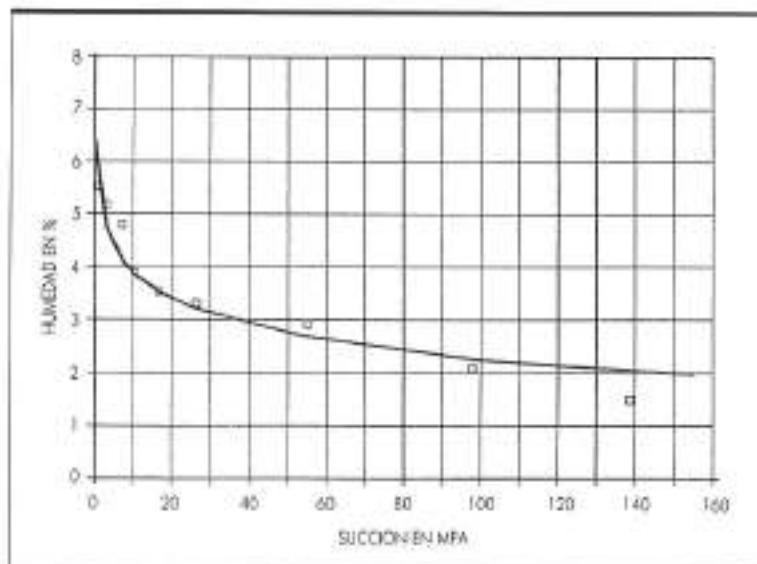


FIGURA 1. Relación succión-humedad.

inicial e interpretarlos adecuadamente, en las fases posteriores de análisis. Estos factores han sido:

- Las características mineralógicas de las muestras.
- El estado de humedad inicial.
- El estado inicial de tensiones.
- La variación de los estados de humedad.
- La variación de los estados de tensiones.

De acuerdo con estos factores, se han diseñado diversas categorías de ensayos que recogen las combinaciones más racionales de los factores indicados. Estos ensayos se han agrupado en los tipos siguientes:

A) Ensayos que se inician en condiciones de humedad y sobrecarga naturales. Estas condiciones permiten comprobar si las muestras son capaces de experimentar hinchamientos. Este ensayo admite cuatro modalidades:

A-1) Continuar el proceso como un ensayo edométrico de consolidación sin variar las condiciones de humedad.

A-2) Inundar las muestras tras el primer escalón y observar las deformaciones y, posteriormente, continuar como un ensayo normal de consolidación.

A-3) Inundar las muestras e impedir el hinchamiento aplicando cargas verticales.

A-4) Aplicar una sobrecarga de preconsolidación, reducir la carga hasta la sobrecarga natural, inundar con agua a presión atmosférica, aumentar la presión del agua hasta 0,2 Mpa. y terminar el ensayo con el agua a presión atmosférica. En todos estos pasos, la carga aplicada permanecerá constante e igual a la sobrecarga natural.

B) Ensayos que se inician en condiciones de humedad y sobrecarga naturales. Durante el ensayo se disminuye la succión de forma escalonada y controlada.

B-1) Ensayos realizados modificando la succión mediante presión de nitrógeno en el edómetro de succión de membrana semipermeable (Escario, 1969).

B-2) Ensayos realizados en el edómetro de succión vacío (Esteban, 1990).

C) Ensayos que se inician con la probeta inundada desde el inicio y una sobrecarga inferior a la de su estado natural.

C-1) Ensayos de hinchamiento libre (sobrecarga 0,01 Mpa.).

C-2) Ensayos de presión de hinchamiento (deformación impedida).

C-3) Ensayos de hinchamiento bajo presión vertical de 0,1 Mpa.

D) Ensayos de hinchamiento libre (sobrecarga 0,001 Mpa.) sobre muestras remodeladas e inalteradas.

D-1) Sobre probetas de material inalterado y con espesores de 5, 12 y 20 mm.

D-2) Sobre probetas de material remodelado y completo en todos sus componentes mineralógicos y con espesores de 5, 12 y 20 mm.

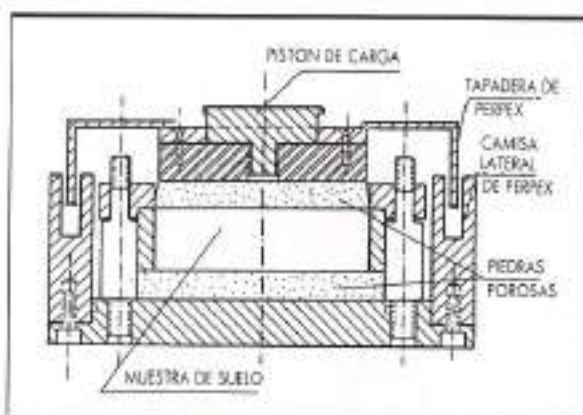


FIGURA 2. Esquema del edómetro convencional.

D-3) Sobre probetas de material remodelado del que se han eliminado los sulfatos y carbonatos y con espesores de 5, 12 y 20 mm.

Las técnicas utilizadas para estudiar los hinchamientos de este material se han basado en los equipos edométricos en los que, simulando una determinada carga vertical, se comprueba el comportamiento deformacional de las muestras del suelo.

Los equipos utilizados para los ensayos de los tipos A y C son similares a los edométricos convencionales con las variantes que se pueden apreciar en la figura 2.

La variación más significativa consiste en el sistema de cierre estanco que impide la transmisión de agua del interior al exterior del aparato, lo que favorece unas condiciones de humedad estables durante todo el ensayo. Una modificación de este equipo es el que se ha diseñado para los ensayos del tipo D (figura 3).

En los ensayos que requieren control de la succión se han utilizado dos equipos: el edómetro de succión de membrana semipermeable (figura 4) (Escario, 1969) y

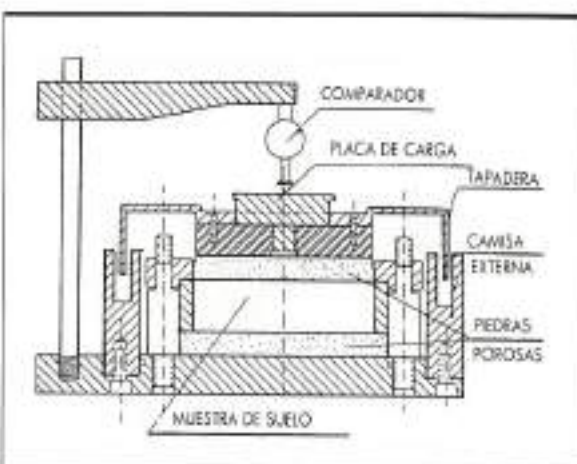


FIGURA 3. Esquema del edómetro utilizado en los ensayos del tipo C.

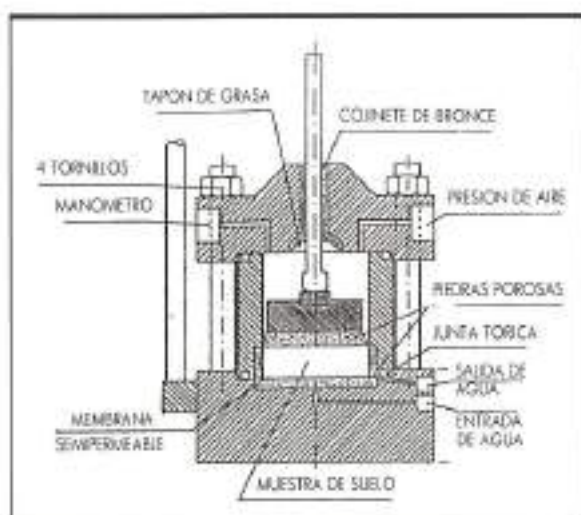


FIGURA 4. Sección del edómetro de succión de membrana semipermeable (Escario 1969L).

el edómetro con control de la humedad relativa interna (figura 5) (Esteban, 1990).

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

El objetivo de estos ensayos es determinar las características de la deformabilidad de estos materiales en función de los diferentes estados de carga y de humedad de las muestras. Siguiendo con la misma clasificación indicada anteriormente se puede destacar los resultados siguientes.

La evolución de la expansión con el tiempo de los ensayos que se inician en condiciones de humedad y sobrecarga naturales, muestra que el hinchamiento final se produce a muy largo plazo cuando no se modifican las condiciones de humedad tipo A-1 (figura 6). En el caso de que se inunda la muestra el hinchamiento se produce mucho más rápidamente tipo A-2 (figura 7).

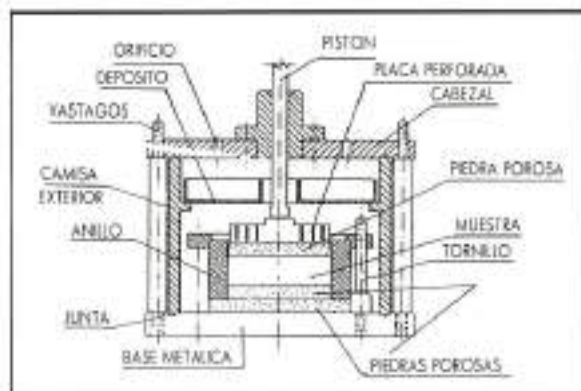


FIGURA 5. Sección del edómetro de control de la humedad relativa interna (Esteban, 1990L).

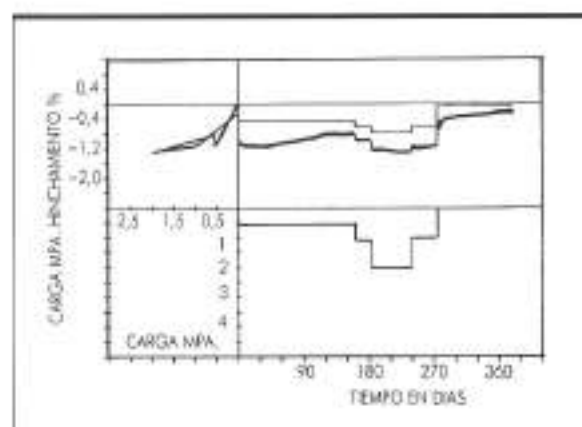


FIGURA 6. Curva tensión-deformación de un ensayo con humedad constante.

Cuando se impide el hinchamiento mediante la aplicación de cargas verticales (tipo A-3), se llega a la conclusión de que es necesario aplicar presiones superiores a los 3 Mpa para que no se produzcan expansiones de la muestra. Este valor no impide totalmente la tendencia a expandir de este material puesto que en algunos casos, a pesar de la carga aplicada, la deformación es elevada (figura 8).

Por otro lado, cuando se aplica una presión positiva de agua a las muestras en los ensayos de tipo A-3, no se aprecia un cambio sustancial en el comportamiento del material.

Los ensayos efectuados con el aparato de membrana semipermeable han mostrado ciertas dispersiones inherentes al tarado del equipo, que enmascaran, parcialmente, la deformación real de las muestras. Este problema ha desaparecido con los ensayos con el edómetro de vacío pero, por el contrario, las incoherencias, en este caso, se producen en los valores bajos de la succión. Ambos tipos de resultados quedan recogidos en la figura 9.

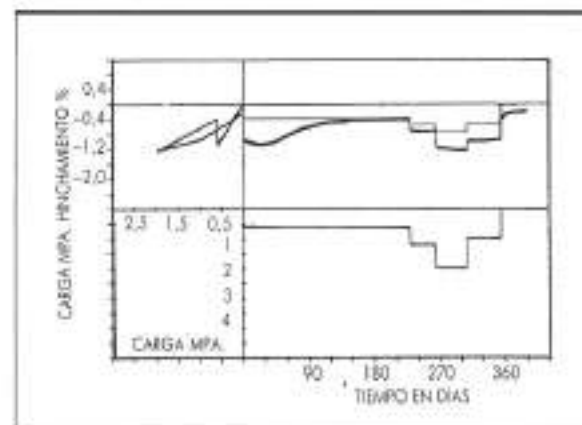


FIGURA 7. Curva tensión-deformación de un ensayo con inundación.

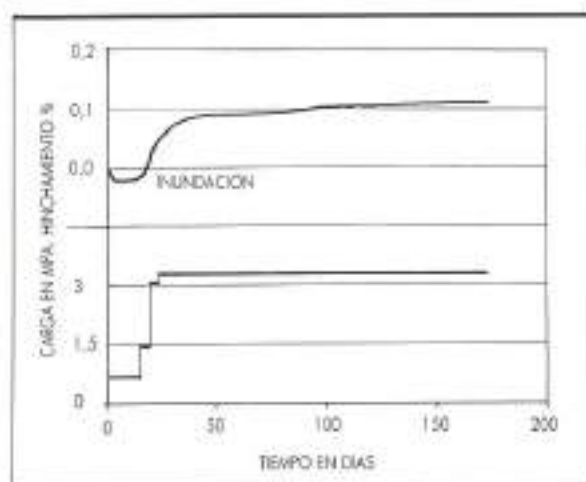


FIGURA 8. Curvas de carga y expansión en un ensayo de presión de hinchamiento.

Los hinchamientos por inundación son los procesos analizados en mayor número de ensayos, tanto con sobrecargas bajas (tipos C-1, C-2, D-1) como con sobrecargas altas o variables con función de la deformación (tipos C-2). Sus deformaciones finales se han recopilado en la figura 10.

Por lo que se refiere a los ensayos sobre muestras remodeladas, las expansiones obtenidas son, como cabría esperar, mucho mayores. La evolución de las deformaciones con el tiempo de las muestras remodeladas están incluidas en la figura 11.

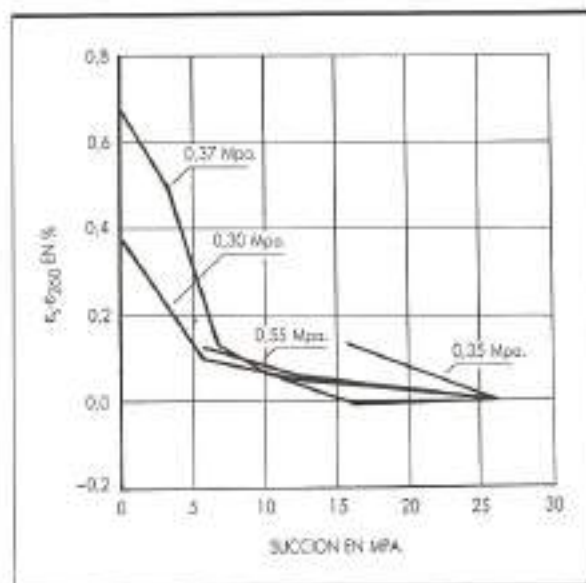


FIGURA 9. Deformación en función de la succión y la sobrecarga.

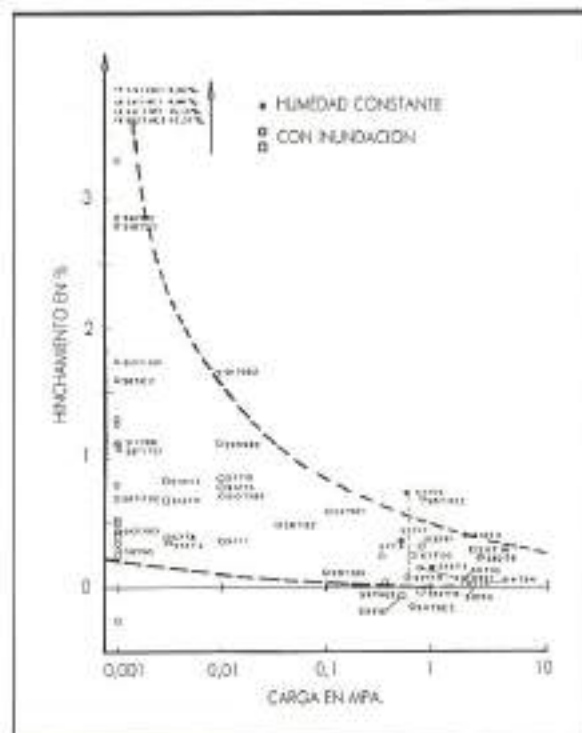


FIGURA 10. Relación entre la deformación y la presión de confinamiento.

DISCUSION DE RESULTADOS

Como es habitual en los estudios geotécnicos con carácter de investigación, han surgido dificultades para la puesta en práctica de los ensayos, en parte derivados de los objetivos a cumplir y en parte ocasionadas porque el

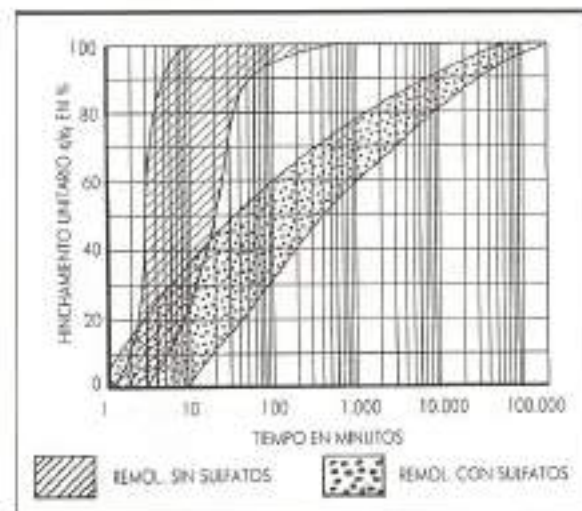


FIGURA 11. Evolución de la expansión normalizada en muestras remodeladas con y sin sulfatos.

estado actual de los conocimientos ni siquiera goza de una sistematización metodológica para la realización de los ensayos requeridos en esta investigación.

El rasgo más significativo del comportamiento de esta roca se refiere a la larga duración del hinchamiento en las muestras ensayadas. Por lo general, la expansión se desarrolla a lo largo de cientos de días, pudiendo, en algunos casos, permanecer activa más de tres años. Este fenómeno es similar al presentado por Nuesch *et al.* (1989). Estos autores muestran los resultados de ensayos endométricos sobre un material parecido, resaltando el largo período de actividad (superior a 6 años) y los altos valores tanto de la deformación (por encima del 120 % como de la presión de hinchamiento (alrededor de 4 Mpa).

En nuestro caso, es difícil determinar cuál es la presión de hinchamiento del material inalterado, aunque de la figura 10 se puede desprender que se encuentra entre 2 y 4 Mpa. En cuanto a la deformación máxima, cabe destacar el valor del 17 % obtenido en un ensayo de hinchamiento libre también sobre material inalterado. En el caso de material remodelado, el hinchamiento libre se acerca al 100 % de espesor de la muestra.

La larga duración de los hinchamientos durante los ensayos puede ser debida, en algunos casos, a la expansión diferida de cierto tipo de arcillas (Mazurik, 1973, y Mustafayev, 1980). En nuestro caso, existe la evidencia física del crecimiento de cristales de yeso en las grietas, formando vetas en estado natural, y en las caras y fisuras de las pastillas en los ensayos endométricos. Todo lo cual sugiere que los fenómenos que rigen el hinchamiento están asociados a la presencia de los sulfatos. Estos fenómenos pueden ser o la transformación de la anhidrita en yeso o la recristalización de los sulfatos.

Diversos investigadores (Einfalt, M. C., 1976, y Martín Viñas, J., 1973, entre otros) han llegado a la conclusión de que realmente la transformación de la anhidrita en yeso ocurre con frecuencia, pero esta transformación se favorece cuando la anhidrita está pulverizada en el seno de otros materiales, mientras que cuando se encuentra cristalizada en bloque en estado natural, el cambio se produce muy lentamente debido al difícil acceso del agua a las moléculas de anhidrita en el interior de los cristales del bloque natural. En nuestro caso, resulta complejo responsabilizar a la transformación de anhidrita en yeso como el factor determinante de las características del hinchamiento observado. No obstante, la presencia de anhidrita en la roca es fundamental ya que se disuelve con gran facilidad en el agua del subsuelo y produce una elevada concentración de iones SO_4^{2-} y Ca^{++} (Ordóñez *et al.*, 1990), lo que favorece la recristalización de estos iones en forma de yeso en aquellas zonas o espacios interparticulares de menos tensión externa.

Asimismo, unos valores de presión de hinchamiento, tan elevados como los indicados anteriormente, sólo pueden ser debidos a las fuerzas de recristalización de los yesos. Dichos cristales de yeso se originan por la

precipitación de los iones SO_4^{2-} y Ca^{++} , disueltos en el agua del subsuelo, en las fisuras y grietas de la roca (Esteban, 1990). En este sentido, Winkler y Singer (1972) consideran que las presiones de cristalización de los sulfatos puede alcanzar valores próximos a 40 Mpa.

Teniendo en cuenta las expresiones desarrolladas para la determinación teórica de la presión de cristalización por Winkler and Wilhelm (1970) y Winkler and Singer (1972), y de acuerdo con la concentración potencial de las aguas del subsuelo de este emplazamiento, Ordóñez *et al.* (1990) consideran que la máxima presión de cristalización de los yesos puede estar en torno a los 3 Mpa.

CONCLUSIONES

Las variaciones del volumen de este material son debidas a la presencia de minerales arcillosos expansivos, a la existencia de sales solubles en la roca (sulfatos) y a los fenómenos asociados a la interacción entre ambos componentes.

La evolución de la expansión de las muestras presenta dos fases, una primera bastante rápida, del orden de 2 horas, asociada a la hidratación de las arcillas expansivas, y otra segunda, mucho más lenta, en algunos casos superior a 3 años, asociada a la transformación de la anhidrita en yeso y a la cristalización del yeso en fisuras y grietas.

En las dimensiones del macizo rocoso, la fase rápida del hinchamiento se ve enmascarada por los procesos diferidos y de mayor magnitud que supone la formación de vetas de yeso a partir de las recristalizaciones de los sulfatos. Estas vetas de yeso son tanto más frecuentes cuanto más cerca se hallan de la superficie.

La formación de los cristales de yeso se origina a partir de los iones disueltos en el agua del subsuelo. Estos iones proceden de la disolución de los sulfatos (yeso y anhidrita) de la propia roca matriz. La saturación del agua en los sulfatos, probablemente, se realiza en zonas relativamente próximas al lugar de su posterior precipitación, aunque no se puede descartar una procedencia más lejana.

La disolución de los sulfatos, unida a más que probables procesos de dedolomitización, ocasiona una variación de la porosidad en zonas superficial, lo que ayuda a la circulación de las aguas subterráneas hacia zonas vírgenes del interior del macizo rocoso favoreciendo el desarrollo de los hinchamientos futuros.

REFERENCIAS

- CABRERA, L. (1984). Procesos de sedimentación y diagénesis temprana en un sistema lacustre endorreico somero: características de los depósitos lacustres del Oligoceno Superior del SE de la Cuenca del Ebro. Congreso de Sedimentología de Palma de Mallorca (España).
- EINFALT, H. C., y GOTZ, H. P. (1976). Chemical transformation from anhydrite to gypsum. Int. Ass. of Engineering Geology, bull 13, pp. 69-70.
- ESCARIO, V. (1969). Swelling of soils in contact with water

at negative pressure. 2th International Conference on Expansive Clay Soils. Texas A & M, pp. 207-217.
 ESTEBAN, F. (1990). Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento. Tesis doctoral, pp. 360-361.
 MARTIN VIÑAS, J. (1973). Hinchamiento de los suelos por la presencia de sulfato sódico y otras sales solubles en general. Bol. Inf. Lab. Geotecnia 100, pp. 59-69.
 NEUSCH, R.; MADSEN, F. T., y FONYO, J. (1984). Influence of shale interlayers in ahydrite on swelling behaviour. 9th Int. Clay Conference. Stranburg, pp. 281-283.

ORDOÑEZ, S.; SORIANO, A.; GARCIA DEL CURA, M. A., y ESTEBAN, F. (1990). Swelling mechanics of Tertiary anhydritic-dolomitic shales. 6th Int. Conf. Eng. Geology. Amsterdam, vol. 3, pp. 1963-1971.
 WINKLER, E. M., y SINGER, Ph. C. (1972). Crystallization pressure of salts in stone and concrete. Geol. Soc. Am. Bull. 83, pp. 3509-3514.
 WINKLER, E. M., y WILHEM, E. J. (1970). Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. Geol. Soc. Am. Bull. 81, pp. 567-572.

**Nuestro mejor aval
es ser
la primera compañía
de avales
de España.**



CREDITO Y CAUCION
Líder en avales y fianzas.

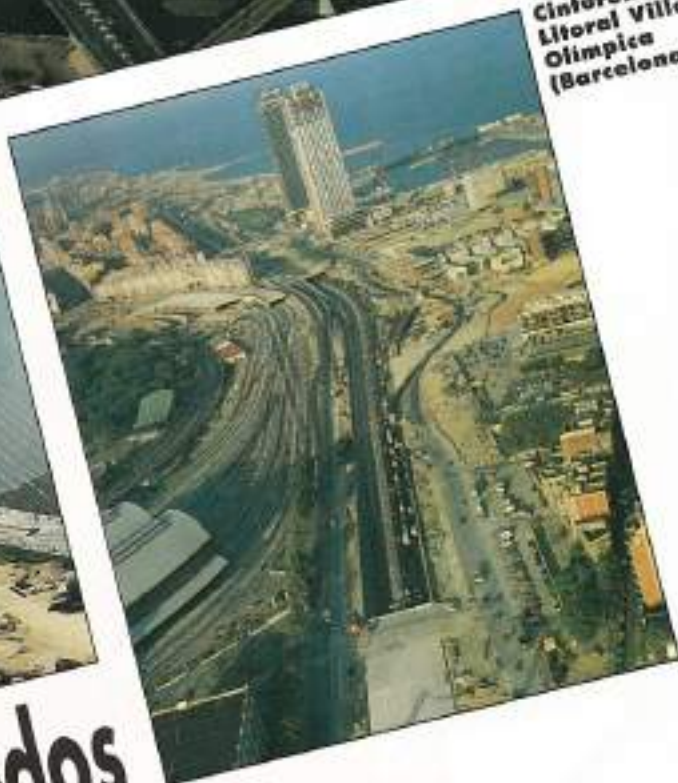


Ferrocarril
de alta velocidad
Madrid-Sevilla

M-40 (Madrid)



Cinturón
Litoral Villa
Olimpica
(Barcelona)



Puente del
Centenario
(Sevilla)

**Estamos presentes en todos
los acontecimientos**

1916 - 1991
75
CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES
ANIVERSARIO

TODO EN SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL

• Equipos reflectantes para Policía Municipal.



• Señales de Tráfico pintadas y reflexivas.



• Nueva señalización urbana.



• Barreras de Seguridad.

• Señalización para obras.



señalizaciones **VILLAR**

Avda. Valladolid, 58 apdo. 61 42004 **SORIA**

Telf. (975) 22 05 04

Fax (975) 22 06 45