

# FENOMENOS DE HINCHAMIENTO DE FORMACIONES MARGO-YESIFERAS DE LA CUENCA DEL EBRO

FERNANDO ESTEBAN MORATILLA (\*)

**RESUMEN.** En la cuenca baja del río Ebro existen unos terrenos margo-yesíferos, someramente cubiertos por areniscas de espesor variable, en las que se ha efectuado una excavación de aproximadamente 70 m de profundidad. La exhumación brusca de estos materiales, unido a la susceptibilidad de varios de sus componentes mineralógicos a experimentar cambios de volumen, ha generado el levantamiento de la superficie excavada. En este artículo se resume la campaña de investigación que se ha diseñado para tratar de entender el fenómeno y se indican cuáles han sido las conclusiones sobre las características y las causas de los hinchamientos.

**ABSTRACT.** *Gypsiferous marl soils slightly covered by sand stones of varying thickness, lie in the lower Ebro basin, and excavations have been carried out to a depth of about 70 m. The sudden uncovering of this material, together with the fact that various mineralogical components are susceptible to volume change, has caused the swelling of the excavated surface. This article summarizes the research work that has been carried out with a view to understanding the phenomenon and conclusions regarding the characteristics and causes of the swelling are indicated.*

## INTRODUCCION

El panorama geológico español ofrece diversas zonas donde existen afloramientos de margas yesíferas del Terciario. En uno de ellos, la correspondiente a la cuenca del Ebro, está construido un complejo industrial cuya cimentación se ha realizado directamente sobre este material.

Por necesidades de construcción, la excavación de la roca alcanzó 70 m de profundidad. Inmediatamente terminada ésta, se comenzó a apreciar movimientos en la superficie que no podían ser imputados a los procesos normales de esponjamiento tras la excavación.

Estos movimientos, que 17 años después aún continúan, han propiciado la realización de numerosos trabajos en el objetivo de identificar las causas de este fenómeno.

En el año 1985 se formó un grupo internacional multidisciplinario para llevar a cabo una campaña de investigación con el objeto de intentar ahondar en las causas del fenómeno y esclarecer los factores que intervenían en el desarrollo de los levantamientos.

Lo que aquí se expone es un resumen sucinto de las conclusiones más significativas del trabajo realizado hasta el año 1989.

## GEOLOGIA DEL EMPLAZAMIENTO Y CARACTERISTICAS DEL TERRENO

La cuenca del río Ebro está formada, en gran parte, por materiales carbonatados de origen Terciario. En el emplazamiento estudiado, los materiales proceden de una área de transición entre una zona de sedimentación de tipo lacustre y otra de tipo aluvial (Cabrera, 1984).

Las unidades atravesadas por los sondeos se caracterizan, litológicamente, por la presencia de margas de tonos marrones, con elevado contenido de sulfatos (margas-yesíferas) (figura 1).

Los sulfatos aparecen como material cementante en el seno de la roca matriz y como vetas o venillas de macrocristales de yeso. Estas vetas proceden del relleno o sellado de las diaclasas que se han producido por los efectos de la exhumación de la roca, asociados a los procesos tectónicos que dan origen a tensiones horizontales. Dicho relleno se produce por la precipitación de las aguas subterráneas sobresaturadas en sulfatos.

El proceso de formación de las vetas de cristales de yeso, con restos de material detrítico en la zona media (figura 2) indica el carácter extensional de las vetas (Machel, 1985, y Ramsey, 1980). La forma sigmoidal de los cristales de yeso está motivada por la composición de movimientos que sufre el macizo rocoso, producida por el vertical de exhumación y el horizontal de erosión lateral del río, a los que se une la lenta formación del yeso fibroso, cuya tendencia de crecimiento es fundamentalmente vertical.

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



FIGURA 1. Aspecto del material estudiado.



FIGURA 2. Vetos de yeso con material detrítico intermedio y cristales con forma sigmoidal.

### DISEÑO DE LA CAMPAÑA DE INVESTIGACIÓN

El área donde se encuentra emplazada esta Planta Industrial está afectada por los levantamientos de manera no uniforme. Existen zonas próximas al punto de mayor excavación, donde los levantamientos son máximos, y otros puntos sin excavación o con excavación somera, donde los levantamientos son despreciables o nulos.

En la figura 3 se muestra las líneas de isolevntamiento en estos últimos años. Para determinar la posible influencia de las características de los materiales en los movimientos de la superficie se perforaron seis sondeos, dos (10 y 12) en las zonas de máximo levantamiento, dos (9 y 10) en las zonas de levantamiento medio y los otros dos (7 y 8) en zonas de levantamiento mínimo.

Los sondeos se han diseñado divididos en 20 testigos de un metro de longitud aproximada, de los que los 10 primeros testigos representan la zona más superficial y, que según las medidas de los extensómetros, son responsables del levantamiento en superficie (figura 4). Los 10 testigos más profundos se han ensayado para poder comparar los resultados con los obtenidos en los testigos superficiales, pues hasta el momento no han mostrado la menor actividad en base a las medidas de campo.

La campaña de ensayos, necesariamente, está limitada por la capacidad física del laboratorio y por el tiempo requerido para ejecutar los ensayos de mayor duración. Se han diseñado tres categorías de ensayos: ensayos de caracterización mineralógica, ensayos de caracterización geotécnica y ensayos de hinchamiento.

Los ensayos de caracterización mineralógica tienen como objetivo determinar los componentes mineralógicos y la estructura del material (D.R.X., petrología, microscopía electrónica de barrido y de transmisión de alta resolución y análisis químicos).

Los ensayos de caracterización geotécnica incluyen aquellos cuyo objetivo es determinar los parámetros geotécnicos habituales (humedad, densidad, peso específico, índice de huecos, porosidad, grado de saturación, límites de Atterberg, permeabilidad y relación succión-humedad).

Los ensayos para determinar la capacidad de hinchamiento del material se han realizado con la ayuda de equipos edométricos, para lo cual se han hecho varias hipótesis de partida teniendo en cuenta las posibles historias de tensiones y las modificaciones de la humedad que las muestras podían sufrir a partir de su estado natural (ensayos con la sobrecarga natural con y sin inundación, ensayos de hinchamiento libre, ensayos de hin-

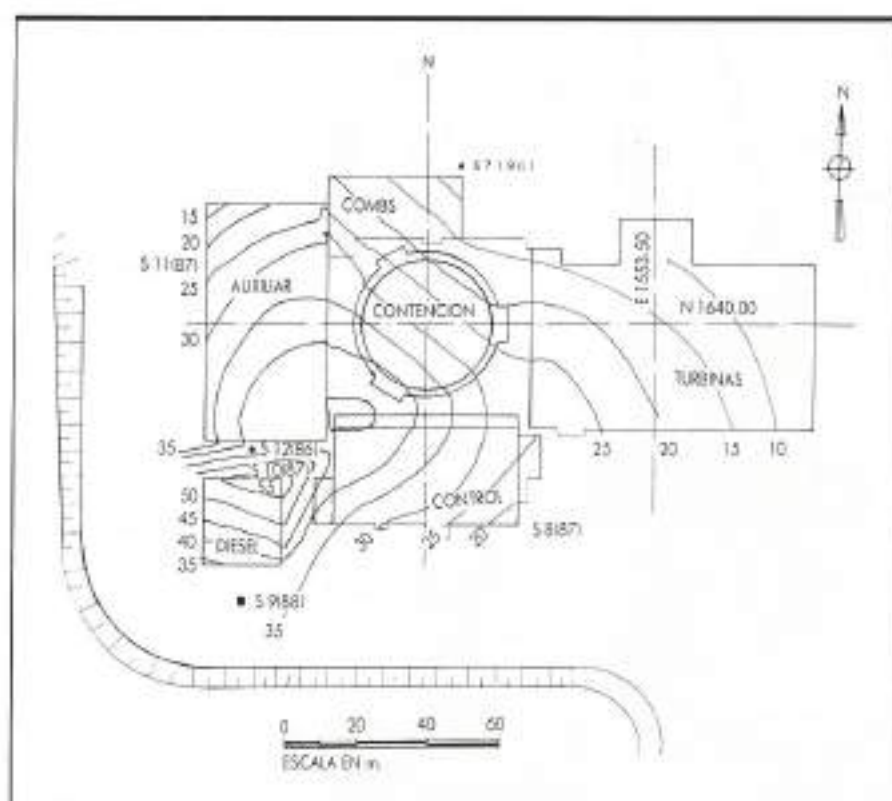


FIGURA 3. Representación de los levantamientos en planta con la ubicación de las sondas.

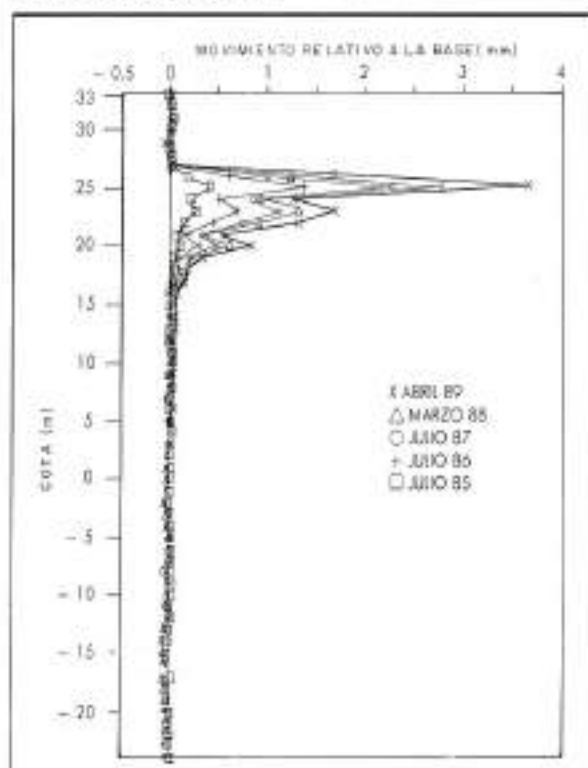


FIGURA 4. Zona donde se producen los movimientos, observada con un extensómetro de medida continua.

chamiento con succión controlada y ensayos para determinar la presión de hinchamiento).

El material ensayado procede de los seis sondeos perforados en los emplazamientos indicados en la figura 3. Su profundidad es variable, pues cada uno de ellos ha debido atravesar un espesor diferente de rellenos seleccionados hasta llegar al terreno natural.

Esta primera parte de la perforación se ha realizado con ayuda de un trépano de 220 mm de diámetro. La evacuación de los detritus se ha realizado en base a una gran cantidad de agua. En la zona de marga, la perforación se ha realizado por rotación con una batería de triple tubo refrigerada por agua y con una corona de 130 mm de diámetro (figura 5).

Con el fin de que el material extraído estuviera almacenado el menor tiempo posible antes de ser ensayado, se ha procedido a perforar los sondeos en orden secuencial. Los números 7 y 12 se perforaron en el año 1986 y los sondeos 8, 9, 10 y 11, en los años 1987 y 1988. Este sistema ha permitido obtener datos parciales de los ensayos que, a su vez, han servido para mejorar, en unos casos, y completar, en otros, el programa inicial de ensayos.

Para que el operador, en última instancia, no fuese el que escogiera las zonas de testigos utilizables para obtener las muestras inalteradas, se optó por hacer un sorteo aleatorio sobre: primero, cuáles iban a ser los tubos a ensayar y, segundo, dentro de cada tubo, qué zona iba a ser asignada a cada tipo de ensayo, con la particularidad de dejar las zonas extremas, superior e inferior,



FIGURA 5. Equipo utilizado en la perforación de los sondeos.

para la realización de los ensayos que no requieren la inalterabilidad del material.

### TECNICAS EXPERIMENTALES

Los ensayos incluidos en la campaña de trabajo han sido realizados apoyándose en técnicas experimentales convencionales y algunas otras de nuevo diseño, que han sido desarrollados y puestos a punto para este trabajo.

Las características especiales del material a ensayar, la exactitud de las medidas que es necesario realizar y el tiempo requerido para efectuar los ensayos de hinchamiento han sido los factores más importantes que han obligado a adecuar las técnicas convencionales de ensayo a las peculiaridades del material estudiado y a esta específica investigación.

Las técnicas utilizadas para determinar el comportamiento deformacional de las muestras en función de la carga y del estado de humedad, se ha basado en los equipos de tipo edométrico.

En aquellos ensayos en los que la humedad del material permanece constante o en aquellos otros en los que se inundaba la pastilla, los edómetros utilizados (figura 6) son similares a los convencionales, con las siguientes diferencias:

1. El edómetro es estanco a los intercambios de humedad con el ambiente de la sala de ensayos.

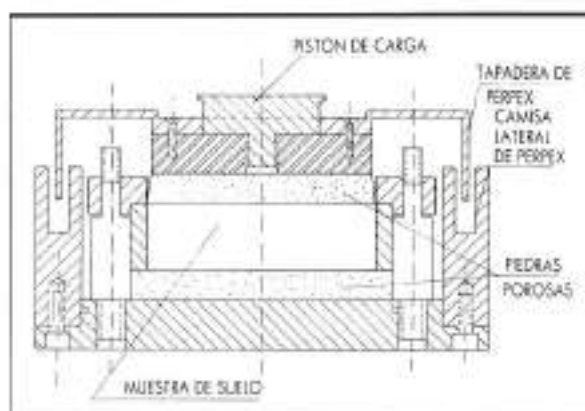


FIGURA 6. Sección esquemática del edómetro convencional modificado.

2. Están fabricados en acero inoxidable y perpex que evitan la corrosión de los diferentes elementos.

Estos equipos permiten, además, la aplicación de cargas en la medida y secuencia deseada, hasta un valor máximo de  $28 \text{ kg/cm}^2$ .

En otro equipo, en el que no es posible la aplicación de cargas exteriores, se han realizado los ensayos de hinchamiento libre sobre muestras inalteradas y remoldeadas con y sin sulfatos y en pastillas de diferentes espesores.

Las relaciones succión-humedad se han determinado utilizando, en un principio, los aparatos de membrana semipermeable y, posteriormente, los desecadores de vacío. El cambio de uno a otro sistema se debió a que con el equipo de membrana semipermeable sólo es posible controlar succiones por debajo de  $120 \text{ kg/cm}^2$ , valor que es muy bajo para la succión natural de este material y, además, el desconocimiento de la permeabilidad de la membrana a los iones disueltos en el agua, no permite asegurar que la succión controlada por el equipo sea la matricial, la total o una intermedia entre ambas.

Por desgracia, han surgido los mismos problemas al tratar de medir las variaciones de volumen en función de la succión empleando el edómetro de succión de membrana semipermeable (Escario, 1969; Escario y Sáez, 1973) (figura 7). Este equipo, que tan buenos resultados ha dado en muchas ocasiones, no ha permitido determinar los parámetros deseados en este caso. Simplemente, unos comentarios para identificar cuáles han sido los problemas encontrados y mostrar la experiencia adquirida en este trabajo, pues pudiera servir a otros a la hora de plantear futuras investigaciones.

1. En ensayos de larga duración ( $> 8$  ó  $10$  meses) la membrana semipermeable y, en su caso, el papel de filtro que se introduce entre la membrana y la piedra porosa, se degradan y pueden llegar a encubrir las posibles deformaciones de la pastilla.
2. Si el agua utilizada está saturada en sales puede transmitir a la muestra o captar de ella iones en proporción desconocida, que impida el control adecuado de la succión. Asimismo, el depósito de las sales pue-

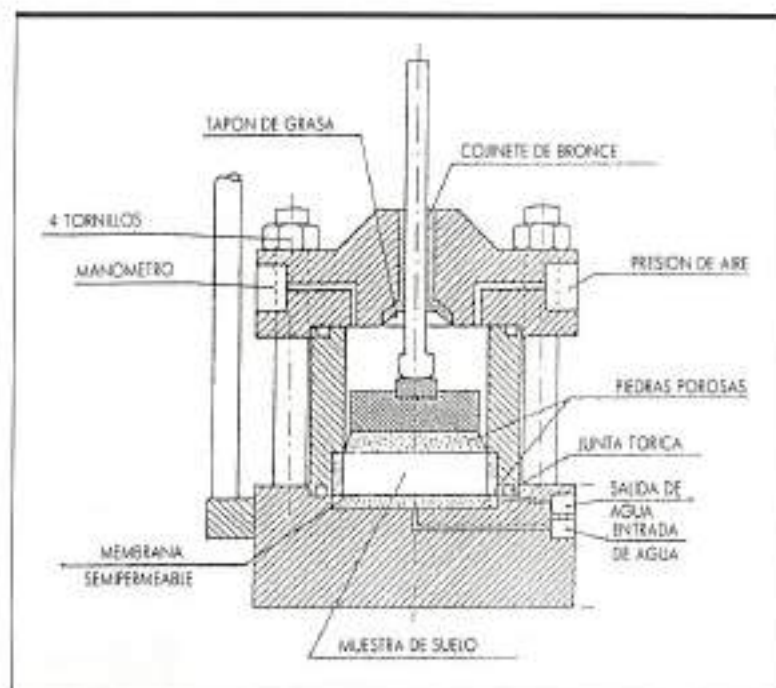


FIGURA 7. Sección esquemática del edómetro de succión controlada de membrana semipermeable.

de obstruir los conductos de entrada y salida del agua e, incluso, impedir el desarrollo normal de las deformaciones por crecimiento de cristales entre los diferentes elementos.

3. Los tarados de estos equipos son extraordinariamente sensibles al montaje. De hecho, los valores de la deformación del material pueden quedar enmascara-

dos por la deformación propia del equipo, sobre todo a altos niveles de succión y cuando el material no experimenta deformaciones importantes.

Para intentar aproximarse a los valores de succión natural de la muestra, se ha diseñado un nuevo equipo que se basa en la capacidad para mantener controlada y estable la humedad relativa en el interior de una cáma-

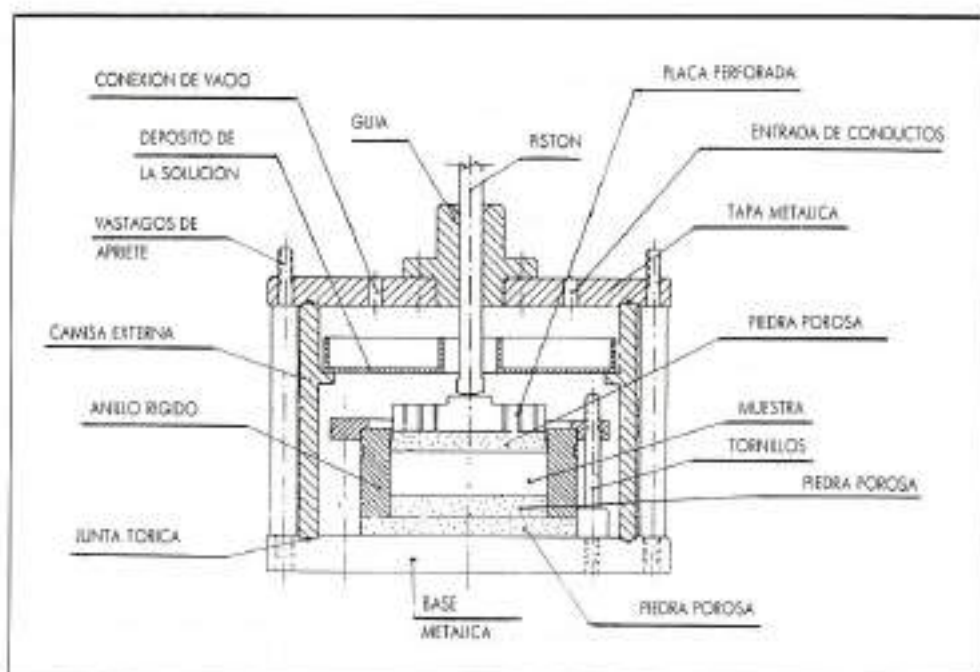


FIGURA 8. Sección esquemática del edómetro de succión de humedad relativa interna controlada.

ra estanca. Este aparato permite controlar succiones en un rango entre 30 y 5.000 kg/cm<sup>2</sup>, permitiendo, al mismo tiempo, las funciones típicas de un edómetro convencional. En la figura 8 se muestra una sección esquemática de este equipo.

La humedad relativa interna se controla mediante diferentes densidades de ciertas soluciones. En el caso estudiado, las disoluciones empleadas se recogen en la tabla 1.

| DISOLUCION | DENSIDAD<br>gr/cc | HUMEDAD<br>RELATIVA<br>% | SUCCION |                    |
|------------|-------------------|--------------------------|---------|--------------------|
|            |                   |                          | pF      | kg/cm <sup>2</sup> |
| ACIDO      | 1,170             | 82,9                     | 5,41    | 260                |
|            | 1,125             | 89,3                     | 5,19    | 160                |
| SULFURICO  | 1,085             | 92,3                     | 5,04    | 160                |
|            |                   |                          |         |                    |
| CLORURO    | 1,036             | 95,0                     | 4,85    | 70                 |
|            | 1,016             | 97,8                     | 4,49    | 31                 |
| SODICO     | 1,002             | 99,7                     | 3,60    | 4                  |

TABLA 1. Disoluciones empleados en el edómetro de vacío.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### ENSAYOS DE CARACTERIZACION MINERALOGICA

Los componentes mineralógicos de estos materiales están indicados en la tabla 2.

De esta tabla se deduce que los carbonatos (Calcita-Dolomita) son prácticamente constantes en toda la profundidad; si acaso, se aprecia una mayor cantidad en la zona superficial.

Los sulfatos, en cambio, presentan variaciones significativas asociados a la cota. Estas variaciones son debidas, principalmente, a la presencia de mayor número de vetas de yeso cerca de la superficie.

El porcentaje de anhidrita aumenta con la profundidad y el yeso disminuye con la profundidad. Sólo en las zonas más superficiales se aprecia una disminución de la cantidad de yeso. Esto puede ser debido a los procesos de disolución de los yesos en las zonas superficiales. La disminución del contenido de sulfatos, manteniendo constante el resto de componentes mineralógicos, puede provocar el aumento relativo de los carbonatos comentado en el párrafo anterior. En la figura 9 se incluye una representación de la media de los componentes mineralógicos.

| COTA<br>m | CUAR. | CAL. | DOL. | YES. | ANH. | ARC. |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|
| 37        | 10    | 34   | 30   | 17   | 1    | 8    |
| 27        | 9     | 29   | 22   | 21   | 10   | 9    |
| 1         | 9     | 26   | 23   | 16   | 17   | 9    |
| 8         | 12    | 32   | 21   | 4    | 22   | 9    |

TABLA 2. Composición mineralógica. Porcentajes medios por elevación.



FIGURA 9. Composición mineralógica media.

### ENSAYOS DE CARACTERIZACION GEOTECNICA

Los parámetros geotécnicos medios se resumen en la tabla 3.

Los ensayos de permeabilidad se han realizado en células triaxiales con una presión de saturación de 6 kg/cm<sup>2</sup>, con agua procedente del emplazamiento y agua desmineralizada. Para determinar la influencia del confinamiento lateral de la muestra se han aplicado unas presiones externas entre 3 y 7 kg/cm<sup>2</sup>. El coeficiente de permeabilidad oscila entre 1.54 E-10 y 7.61 E-10 cm/segundo.

El método utilizado para determinar la relación succión-humedad mediante el aparato de membrana de presión ha mostrado que para succiones de 120 kg/cm<sup>2</sup>, máxima que admiten los aparatos disponibles, las muestras inalteradas aumentan la humedad. Con el método del desecador de vacío se ha conseguido determinar la curva succión-humedad en un rango entre 100 y

| COTA<br>m | DENSIDAD | PESO<br>ESP.<br>gr/cc | HUMEDAD<br>% | INDICE<br>HUECOS | POROSIDAD<br>% | GRADO DE<br>SATURACION<br>% |
|-----------|----------|-----------------------|--------------|------------------|----------------|-----------------------------|
| 38        | 2,4      | 2,68                  | 3,3          | 0,12             | 11             | 72                          |
| 36        | 2,4      | 2,71                  | 2,9          | 0,11             | 10             | 73                          |
| 28        | 2,4      | 2,66                  | 2,6          | 0,10             | 9              | 70                          |
| 26        | 2,4      | 2,71                  | 4,3          | 0,12             | 11             | 97                          |
| 22        | 2,6      | 2,80                  | 2,4          | 0,08             | 7              | 84                          |
| 20        | 2,5      | 2,74                  | 2,7          | 0,08             | 7              | 95                          |
| 13        | 2,5      | 2,78                  | 2,9          | 0,11             | 10             | 72                          |
| 4         | 2,5      | 2,79                  | 4,0          | 0,13             | 12             | 84                          |

TABLA 3. Parámetros geotécnicos medios asociados a la elevación.

2.000 kg/cm<sup>2</sup>. La figura 10 muestra las ocho curvas obtenidas.

Con estas curvas y las humedades naturales de la tabla 3 se determina que la succión de este material en estado natural varía entre 150 y 450 kg/cm<sup>2</sup>.

# ENSAYO PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE HINCHAMIENTO

De los ensayos cuyo objetivo es determinar la capacidad de hinchamiento del material inalterado en condiciones de humedad constante, merece destacar los observados en las muestras S12T3E2 y S7T17E1 (figura 11). En el primero de ellos la pastilla experimentó un hinchamiento del 0,3 % bajo una carga de 22 kg/cm<sup>2</sup> (la sobrecarga natural es de 5,5 kg/cm<sup>2</sup>). En el caso de S7T17E1, el hinchamiento ha sido de 0,25 % bajo la sobrecarga natural (5,5 kg/cm<sup>2</sup>), desarrollándose el hinchamiento durante cuatro meses.

En los ensayos sobre material inalterado bajo la sobrecarga natural y con inundación, el desarrollo del hinchamiento tiene el aspecto indicado en la figura 12 correspondiente a la muestra S12T11E2. Como se puede apreciar el hinchamiento comienza a desarrollarse en el momento de la inundación, al principio muy rápidamente y continúa durante cuatro meses, interrumpiéndose el ensayo sin haber terminado los hinchamientos bajo una carga de 8 kg/cm<sup>2</sup>.

Se han realizado ensayos edométricos con control de la succión con el equipo de nuevo diseño sobre muestras inalteradas y remoldeadas. En el caso del material remoldeado, la evolución de los hinchamientos para cada nivel de succión bajo con una sobrecarga mínima de 0,1 kg/cm<sup>2</sup> e indicado en la figura 13, muestra que el hinchamiento no se produce cuando la succión es superior a 630 kg/cm<sup>2</sup>, pero cuando se supera este umbral, la deformación se desarrollará en gran magnitud. De este ensayo merece destacarse el hinchamiento del 3 %

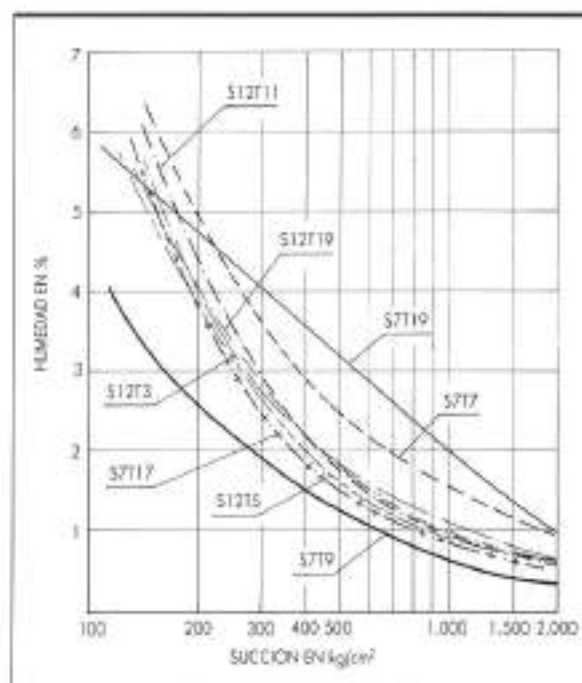


FIGURA 10. Relación succión-humedad de diferentes muestras.

que se produce en el escalón entre 630 y 260 kg/cm<sup>2</sup> de succión.

Los ensayos realizados sobre muestras inalteradas en condiciones de sobrecarga natural, han mostrado diversas evoluciones. En la figura 14 se recoge la evolución de la deformación relativa para cada nivel de succión con respecto a la deformación inicial en unas condiciones de succión de 260 kg/cm<sup>2</sup>.

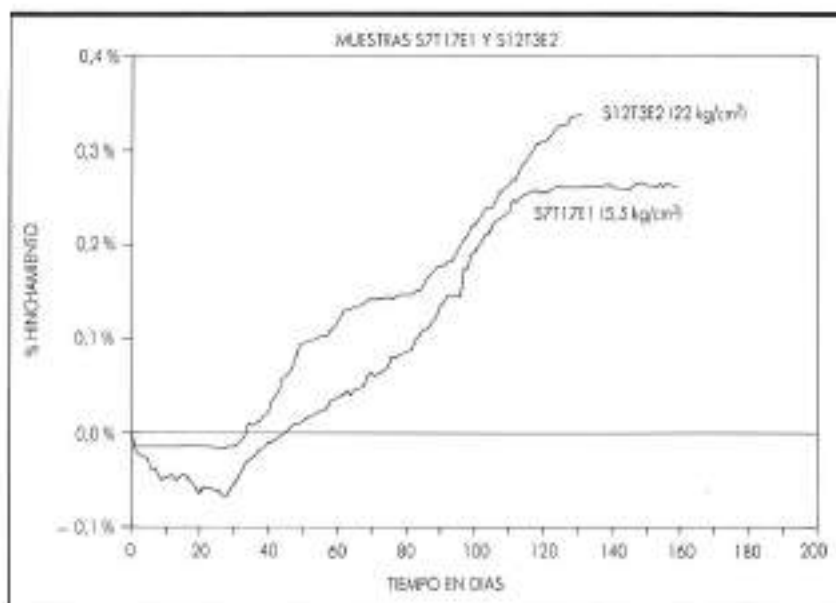


FIGURA 11. Evolución de los hinchamientos en las muestras S7T17E1 y S12T3E2 sin variación de la humedad y bajo sobrecarga.

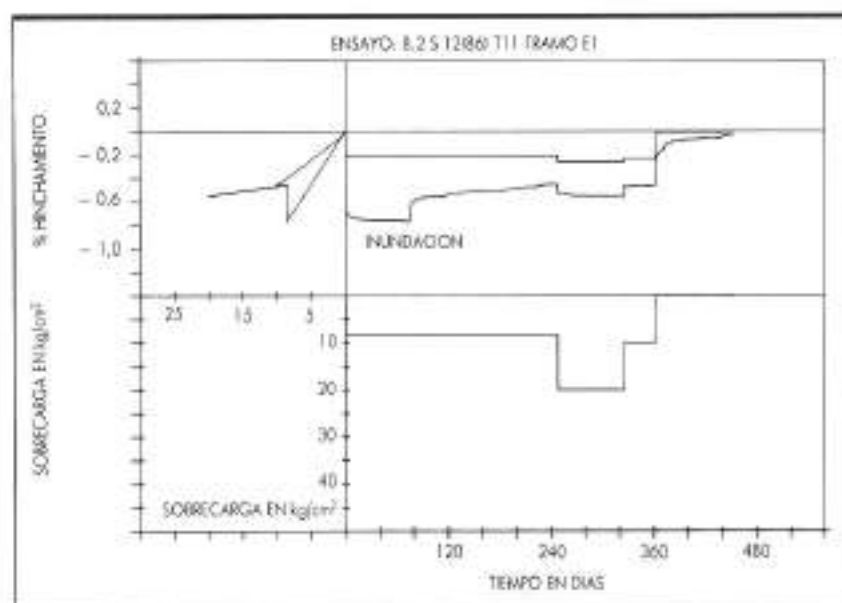


FIGURA 12. Evolución del hinchamiento en la muestra S12T11E1 en condiciones de inundación.

El método utilizado para determinar la presión de hinchamiento consiste en ir aumentando la sobrecarga que se aplica a las muestras en estado de inundación para corregir la tendencia de los hinchamientos hasta que las deformaciones permanezcan constantemente nulas. Las dificultades de la realización de estos ensayos estriba en la necesidad de ir corrigiendo el nivel correspondiente a la deformación nula del equipo con las curvas de tarado del aparato para cada nivel de carga impuesta. Esta dificultad, provocada en gran medida por la escasa deformabilidad del material en las condiciones de ensayo, impide obtener exactamente el parámetro de laboratorio denominado presión de hinchamiento.

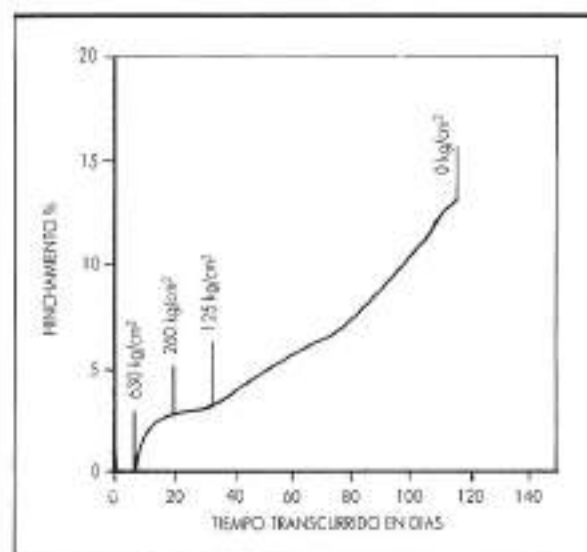


FIGURA 13. Hinchamiento de una muestra remoldeada bajo diferentes condiciones de succión.

Los resultados de estos ensayos indican una gran disparidad de comportamientos entre las diferentes muestras (tabla 4).

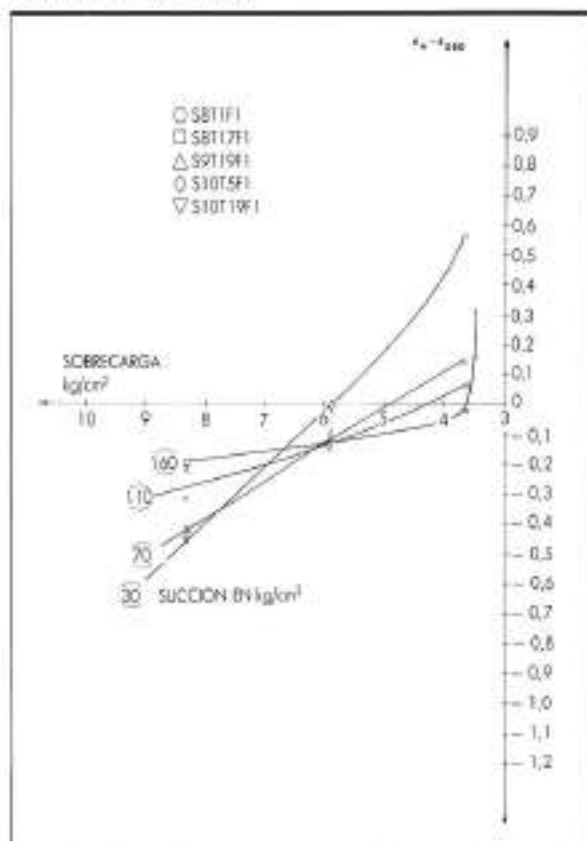


FIGURA 14. Relación entre el hinchamiento y la sobrecarga en material remoldeado para diferentes estados de succión.

| MUESTRA  | HINCHAMIENTO % | PRESION kg/cm <sup>2</sup> |
|----------|----------------|----------------------------|
| S7T9B1   | 0,11           | 1,6                        |
| S7T17B2  | 1,0            | 6,1                        |
| S8T17B1  | 0,12           | 21,5                       |
| S9T9B1   | 0,01           | 4,2                        |
| S10T19B2 | 0,20           | 22,0                       |
| S11T10B1 | 0,03           | 14,1                       |
| S12T11B2 | 0,21           | 4,6                        |
| S12T12B1 | 0,0            | 7,2                        |
| S12T20C1 | 0,44           | 7,4                        |

**TABLA 4.** Relación entre la deformación y la presión de confinamiento en muestras inundadas.

Los ensayos edométricos de hinchamiento libre sobre muestras inalteradas y remoldeadas con diferentes espesores, han sido los que mejor han permitido caracterizar el fenómeno de la expansividad de este material.

Los ensayos sobre material inalterado han revelado dos tipos de comportamiento: uno, como el indicado en la figura 15, resulta similar a los fenómenos de hinchamiento en suelos arcillosos expansivos con un comportamiento reológico de la deformación (Mustafayev, 1980, y Mazurik, 1973) motivado por la baja permeabilidad del material.

El otro tipo de comportamiento es el mostrado en la figura 16. La deformación en este caso presenta una se-

gunda componente, que se ve reflejada en la figura por el tramo de la curva, con pendiente casi constante, que perdura un tiempo superior a los seis meses.

Aparte de la propia evolución de los hinchamientos en uno y otro caso, existe una diferencia muy acusada en el valor de la deformación máxima, 0,38 % en el primero y 3,5 % el otro, lo que parece indicar la existencia de diferentes factores en el desarrollo de los hinchamientos.

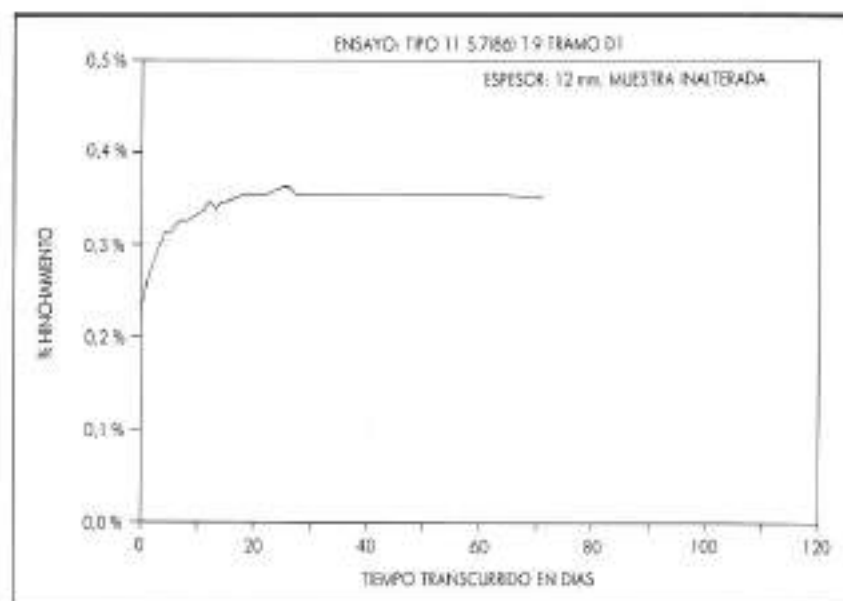
Este mismo hecho se constata en los ensayos realizados con material remoldeado con y sin sulfatos sobre muestras de idéntica procedencia. En la figura 17 se pueden observar los diferentes comportamientos del material cuando incluye los sulfatos y cuando no.

En el caso de las muestras con sulfatos el 90 % de la deformación total se alcanza a los 10 días de comenzar el ensayo, mientras que cuando se eliminan los sulfatos, el 90 % de la deformación total se alcanza a los 10 minutos de iniciar el ensayo.

## DISCUSION

El material estudiado es una roca sedimentaria cuyos componentes fundamentales son calcita, dolomita, yeso, anhidrita y arcillas, algunas de las cuales tienen un marcado carácter expansivo. De todos estos componentes, las arcillas expansivas son, potencialmente, uno de los agentes más activos en los fenómenos de hinchamiento.

No obstante, parece que existen otros factores capaces de originar modificaciones volumétricas e influir en el desarrollo de la expansión. En sentido, Lippmann (1976) resalta el efecto desecante y retardador del hinchamiento de la anhidrita cuando aparece asociada con la corrensita. En el caso estudiado no se ha detectado la existencia de corrensita pero no resulta aventurado pensar que el mismo efecto indicado por Lippmann puede de-



**FIGURA 15.** Aspecto típico de hinchamiento reológico en muestras inalteradas.

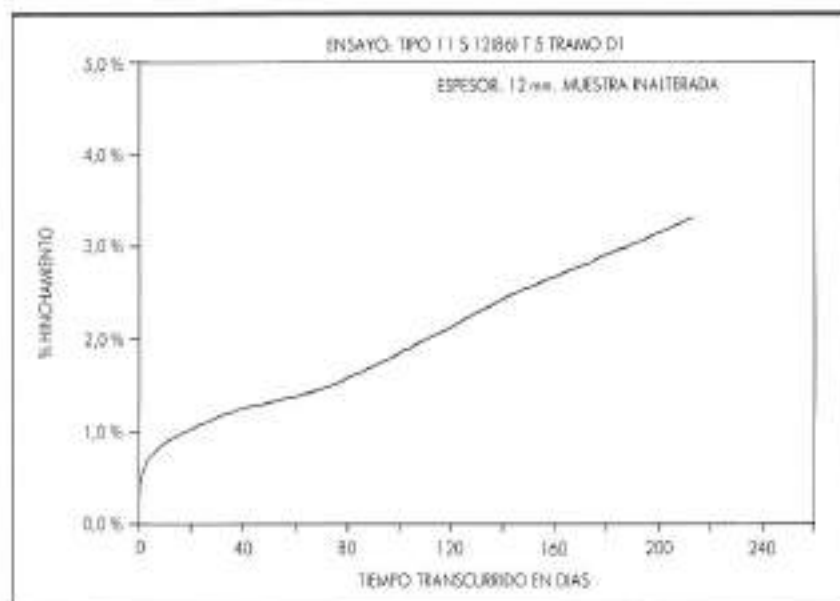


FIGURA 16. Aspecto típico de hinchamiento constante en muestras inalteradas.

sarrollarse cuando la combinación de componentes es anhidrita por un lado y arcillas expansivas del tipo montmorillonita, interestratificadas clorita-clorita hinchable e illitas degradadas, por otro.

El efecto retardador de los hinchamientos que ejerce la anhidrita sobre el resto de minerales puede intuirse en el estudio de las láminas delgadas del material. En ellas se observa que los cristales de anhidrita se encuentran total o parcialmente rodeados de yeso, lo que indica la lenta transformación de la anhidrita en yeso e, incluso, la detención de los fenómenos ante la falta de espacio material para el crecimiento de los cristales.

Teniendo en cuenta la baja permeabilidad de la roca, la escasa porosidad y su elevada resistencia, ¿es posible que la anhidrita se transforme en yeso, a pesar del confinamiento de la matriz de la roca? Grob (1976) publica que la presión máxima que se crea en un poro por el paso de anhidrita a yeso es del orden de 15 kg/cm<sup>2</sup>; mientras que Lutenegeger (1979) opina que la presión que puede ocasionar la transformación de anhidrita en yeso no parece suficiente para romper la estructura de esta roca sana.

Martín Viñas (1973) sugiere que el fenómeno de la formación de cristales de sales hidratadas induce hinchamiento.

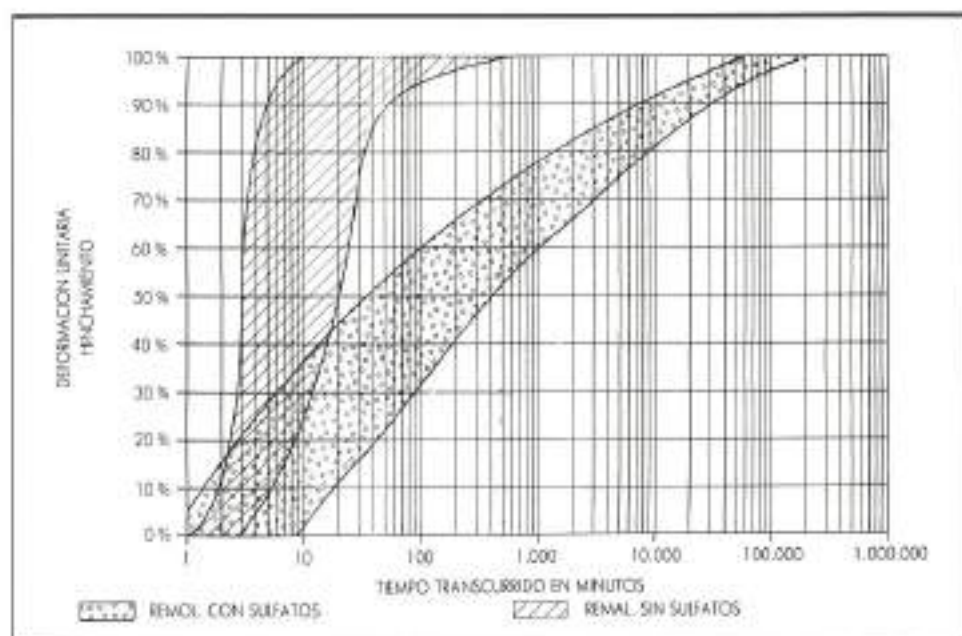


FIGURA 17. Ensayos de hinchamiento libre sobre muestras remoldeadas con y sin sulfatos.

mientos. En el mismo sentido Serrano et al. (1981) aportan una serie de ensayos sobre muestras con y sin sulfatos, en los que el desarrollo de los hinchamientos es más rápido cuando no existen sulfatos, y más lento, incluso con crecimiento de tipo logarítmico, cuando las muestras contienen sulfatos, y concluye que la anhidrita participa activamente en el hinchamiento de los suelos que estudia.

En el caso planteado en este trabajo existe además la evidencia física de que uno de los agentes causantes de los hinchamientos es la formación de cristales de yeso en fisuras y grietas. Esta formación de cristales de yeso se produce por la precipitación de los iones disueltos en el agua del subsuelo  $\text{SO}_4^{--}$  y  $\text{Ca}^{++}$  (Esteban, 1990).

La concentración de los iones  $\text{SO}_4^{--}$  y  $\text{Ca}^{++}$  en el agua del subsuelo se estima en 2,8 g/l para los sulfatos y 2 g/l para el calcio. En estas circunstancias Wellman y Wilson (1965) y Gillot et al. (1974) indican que se produce no sólo la precipitación de cristales de yeso en fisuras sino también la apertura de las fisuras por el crecimiento de los cristales. En este sentido, Winkler y Singer (1972) consideran que la presión de cristalización de los yesos, en una solución sobresaturada con una concentración de 5,4 g/l, puede alcanzar los 400 kg/cm<sup>2</sup>, siendo nula para concentraciones de 2,5 g/l o inferiores.

## CONCLUSIONES

La capacidad de hinchamiento de este material, en condiciones de laboratorio, ha mostrado algunas características resaltantes:

- Por lo general el hinchamiento presenta dos fases, una rápida, casi instantánea, y otra más lenta que se desarrolla durante varios meses.
- El hinchamiento se desarrolla sin necesidad de la inhibición total de las muestras, aunque en este caso, los movimientos de expansión están notablemente influidos por el grado de confinamiento.
- El hinchamiento libre alcanza en algunos casos el 15 % después de varios años de ensayo.
- La presión de hinchamiento, máxima medida en los ensayos de laboratorio, es algo superior a 25 kg/cm<sup>2</sup>.

Como conclusiones generales del estudio debe comentarse que:

- Las variaciones de volumen son debidos a la presencia de minerales arcillosos expansivos, de sales solubles en la roca (sulfatos) y a los fenómenos asociados a la interacción entre ambas.
- La fase rápida de los hinchamientos es debida a las arcillas expansivas y la fase lenta se debe, principalmente, a la cristalización del yeso en fisuras y grietas y, en menor medida, a la transformación de anhidrita en yeso.
- En dimensiones del macizo rocoso, la formación de cristales de yeso es responsable de la creación de las vetas extensionales de este material, que son tanto más frecuentes cuanto más cerca están 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 (anhidrita y yeso) de la propia roca matriz. La saturación

en los sulfatos, probablemente, se realiza en zonas relativamente próximas, aunque no es descartable una procedencia más lejana.

- La disolución de los sulfatos ocasiona una variación de la porosidad en zonas superficiales que ayuda a la circulación de las aguas subterráneas hacia las zonas vírgenes del interior del macizo rocoso, favoreciendo el desarrollo de los hinchamientos.

## BIBLIOGRAFIA

- 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.
- ESCARIO, V. (1969). Swelling of soils in contact with water at negative pressure. 2nd International Conference on Expansive Clay soils. Texas A & M, pp. 207-217.
- ESCARIO, V., y SAEZ, J. (1973). Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. Proceedings of Third Int. Conference on Expansive Soils. Haifa, Vol. 1, pp. 195-200.
- ESTEBAN, F. (1990). Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento. Tesis doctoral, pp. 358-373.
- GUILLOT, J. E.; PENNER, E., y EDEN, W. J. (1974). Microstructure of swelling shale and biochemical alteration products. Ottawa, Canadá, Can. Geol. J. 11, pp. 482-489.
- GROB, . (1976). Swelling and heave in Swiss tunnels. Bull. I.A.E.G. n.º 13, pp. 55-60.
- LIPPMANN, F. (1976). Corrensite, a swelling clay mineral, and its influence on floor heave in Tunnels in the Keuper formation. Bull. International Association of Engineering Geology, n.º 13, pp. 65-70.
- LUTENEGGER, A. J.; WOLLENHAUPT, N. C., y HANDY, R. L. (1979). Laboratory simulation of shale expansion by induced gypsum growth. Can. Geol. J. 16:2, pp. 405-409.
- MACHEL, H. G. (1985). Fibrous gypsum and fibrous anhydrite in veins. Sedimentology 32, pp. 434-454.
- MARTIN VIÑAS, J. (1973). Hinchamiento de los suelos por la presencia de sulfato sódico y otras sales solubles en general. Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia 100, pp. 59-69.
- MAZURIK, A., y KOMORNIK, A. (1973). Interaction of structure and swelling clay. Third Int. Conference of Expansive Soils. Haifa, pp. 309-317.
- MUSTAFAYEN, A., y CHINGNIEV, G. D. (1980). Rheology of swelling soils and deformation forecast. Fourth International Conference on Expansive Soils. Denver 1980, pp. 769-780.
- RAMSEY, J. G. (1980). The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature. Vol. 284, pp. 135-139.
- SERRANO, A.; OTEO, C.; DAPENA, E., y MARTIN VIÑAS, J. (1981). Análisis de los fenómenos de expansión de una formación de margas yesíferas. Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia, 146, pp. 9-16.
- WELLMAN, H. W., y WILLSON, A. T. (1965). Salt weathering a neglected erosive agent in coastal and arid environments. Nature 205, pp. 1097-1098.
- WINKLER, E. M., y SINGER, P. C. (1972). Cristalización pressure of salts in stone and concrete. Geological Society of America. Bull. 83, pp. 3509-3515.