

Comportamiento hídrico de calizas y dolomías

Por F. J. ALONSO (*), R. M. ESBERT (*) y J. ORDAZ (*)

RESUMEN

Se han estudiado los procesos de sorción de agua —y su comportamiento cinético— en ocho variedades de calizas y dolomías, empleadas en edificaciones monumentales. Se analizan los mecanismos de absorción de agua bajo diferentes condiciones: al vacío, libre, capilar, higroscópica; así como la desorción en condiciones ambientales y la expansión hídrica. Se han determinado diversos parámetros hídricos: contenido en agua, grado de saturación, coeficientes, etc., en los diferentes ensayos efectuados.

Entre las conclusiones puede señalarse cierto paralelismo en los comportamientos observados, así como notables diferencias entre algunos tipos rocosos: calizas micríticas y cristalinas. Estas diferencias son atribuidas, fundamentalmente, a factores petrográficos como el sistema poroso y la fracción arcillosa.

ABSTRACT

The processes of water sorption and their kinetic behaviour of eight varieties of limestones and dolomites, used in monumental buildings, have been studied. The water absorption mechanisms under different conditions —vacuum, free, capillarity, hygroscopy—, the desorption under room conditions and the hydric expansion, were analyzed. Several parameters: water content, degree of saturation, coefficients of capillarity, etc., have been measured.

Among the conclusions, a certain parallelism in the observed behaviours can be pointed out, as well as remarkable differences among some types: micritic and crystalline limestones. These differences can be basically attributed, to petrographic factors, e. g. pore system and clay fraction.

INTRODUCCION

Se han considerado una serie de ensayos y propiedades en relación con el comportamiento de las rocas frente al agua —ya sea líquida o en forma de vapor—, incluyendo tanto su toma como su pérdida. En concreto, se trata de observar la evolución en el tiempo del contenido en agua de una roca, bajo diferentes condiciones externas. Todas estas propiedades pueden ser incluidas en el campo de los fenómenos de transporte de fluidos en medios porosos no saturados.

Es de destacar su interés desde distintos puntos de vista:

- En la caracterización del sistema poroso de las rocas. La abundancia de poros, su tamaño, forma y conexión condiciona la cantidad

de agua tomada o perdida, así como su cinética.

- En su comportamiento geomecánico. La presencia de agua en las rocas influye en mayor o menor medida en sus propiedades físicas: mecánicas, dinámicas, térmicas, etc.
- En los procesos de alteración. El agua es un factor omnipresente en el desarrollo de dichos procesos; así, destaca su influencia en los daños originados por el hielo, las sales, depósitos de contaminantes, etc.

Los ensayos considerados en este trabajo son los siguientes:

- Absorción de agua al vacío: Saturación.
- Absorción libre de agua, por inmersión total: Absorción.
- Absorción de vapor de agua: Higroscopía.

(*) Area de Petrología y Geoquímica. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.

- Absorción de agua por capilaridad: Succión capilar.
- Desorción libre de agua: Evaporación.

En cuanto a terminología cabe distinguir entre el ensayo genérico: «sorción de agua», y el parámetro elemental obtenido mediante dicho ensayo: «contenido en agua» o «contenido en humedad».

Generalizando, para el ensayo «i» se define el *contenido en agua* (w_i) de forma ponderal: masa de agua presente en la roca referida a su estado seco, por unidad de masa de roca seca, expresándose en tanto por ciento. Su determinación sólo requiere conocer la masa de la roca seca $-M_0-$ y la masa para un cierto estado húmedo, en las condiciones de ensayo «i», que puede depender del tiempo «t» $-M_i(t)-$, entonces:

$$w_i(t) = [(M_i(t) - M_0) / M_0] \cdot 100 \quad [1]$$

La determinación de M_0 se ha obtenido después de mantener las muestras en un horno con ventilación forzada, a una temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, durante un tiempo mínimo de 24 horas, dejándolas enfriar posteriormente en un desecador.

A partir de la absorción de agua al vacío se determina la masa de la roca saturada $-M_s-$, y puede calcularse el contenido en agua en saturación $-w_s-$. Admitiendo que mediante dicho ensayo se consigue la saturación total de la muestra en agua, el valor resultante w_s corresponde a un límite para el agua que puede contener la roca. Entonces, los diferentes contenidos en agua presentados $-w_i(t)-$, pueden ser normalizados respecto a w_s . Dichos valores expresados en tanto por ciento son denominados: *grado de saturación* (S_i).

En consecuencia, queda definido:

$$S_i(t) = [w_i(t) / w_s] \cdot 100 \quad [2]$$

donde $S_i(t)$ puede ser determinado en cualquier instante «t» a lo largo del ensayo «i», siempre que se disponga del correspondiente peso de la muestra $-M_i(t)-$; entonces:

$$S_i(t) = [(M_i(t) - M_0) / (M_s - M_0)] \cdot 100 \quad [3]$$

El grado de saturación es, por tanto, el contenido en agua relativo, referido al contenido máximo de agua que puede presentar una roca; y nos

indica el porcentaje de poros que están llenos de agua dentro de los que pueden contenerla.

Atendiendo a la evolución del contenido en agua de las rocas en los ensayos de sorción considerados, pueden definirse nuevos parámetros referentes a la cinética de estos procesos. Así, se denominan *coeficientes* a las pendientes de las curvas de sorción de agua en sus tramos lineales.

Finalmente, también en relación con la absorción de agua por las rocas, se ha considerado su hinchamiento o expansión lineal. Como en casos anteriores, además de los valores finales, se ha observado su evolución en el tiempo.

ROCAS ESTUDIADAS

Todos los ensayos descritos seguidamente han sido llevados a cabo sobre cuatro tipos rocosos de naturaleza carbonatada, tomándose dos variedades dentro de cada tipo. En la tabla I se indica su denominación y procedencia.

TABLA I
Rocas estudiadas

<i>Caliza del Páramo</i> (Valladolid). Variedades: P-1, P-2.
Canteras de Campaspero. Mioceno Superior.
<i>Caliza de Montaña</i> (Asturias). Variedades: M-1, M-2.
Canteras próximas a Oviedo. Carbonífero.
<i>Dolomía de Boñar</i> (León). Variedades: B-1, B-2.
Canteras de Boñar. Cretácico Superior.
<i>Caliza de Laspra</i> (Oviedo). Variedades: L-1, L-2.
Zona de Buenavista. Eoceno-Oligoceno.

Un estudio detallado de las características petrográficas, así como del sistema poroso de cada una de estas rocas, puede verse en ALONSO et al. (1987). Dichas características son las que determinan los comportamientos hídricos aquí estudiados.

CONTENIDO EN AGUA EN SATURACION

La saturación de agua de un material rocoso se puede alcanzar por distintos métodos: mediante vacío, forzada a presión, en ebullición, por inmer-

sión libre durante tiempos muy largos, etc. De acuerdo con las experiencias de BELIKOV et al. (1967) los mejores resultados se consiguen mediante vacío o aplicando presión, teniendo en cuenta que sólo en estos casos se alcanza la saturación total de la roca.

No obstante, es de señalar que una de las rocas estudiadas (variedad L-2), cuando permanece sumergida libremente en agua durante largos períodos de tiempo (1 mes), presenta contenidos en agua superiores a los obtenidos al vacío. Este hecho, sin duda, guarda relación con el hinchamiento que presenta dicha roca, y es atribuible a la naturaleza esmectítica de su fracción arcillosa.

En consecuencia, y concordantemente con otros autores (VAN KEULER, 1973; Vos, 1976), la determinación del contenido en agua en saturación (w_s) no es tan simple como cabe suponer. Dicho parámetro ha sido obtenido —junto con la porosidad abierta (n_o)— mediante el ensayo de la pesada hidrostática, existiendo la siguiente relación:

$$w_s \cdot \rho_d = n_o \cdot \rho_{\text{agua}}$$

donde ρ_d es la densidad de la roca seca y ρ_{agua} es la densidad del agua. Ambas magnitudes — w_s y n_o — son, por tanto, dos formas distintas de expresar un mismo concepto, el primero de forma ponderal y el segundo volumétrica.

Ensayo

La saturación de las muestras se ha realizado bajo vacío (10^{-3} torr), de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Determinación previa del peso de la roca seca.
- Vacío en seco sobre las muestras, durante unas 14 horas.
- Sin romper el vacío, se introduce lentamente (1 hora) agua destilada, hasta cubrir las totalmente.
- Se mantiene la absorción de agua bajo vacío otras 10 horas.
- Ya sin vacío, se mantiene la absorción 24 a 36 horas más.
- Finalmente, se determina el peso saturado, limpiando el exceso de agua en superficie con

un paño húmedo. La precisión obtenida para esta pesada, se sitúa alrededor de 0,01 g.

En cada uno de los tipos rocosos estudiados, se han tomado varias muestras: 5 a 7 cilindros (D:35; L:65 mm.) y 6 a 8 discos (D:35, L:20 mm.), calculándose el contenido en agua en saturación (w_s) de acuerdo con la expresión [1].

Resultados

En la tabla II se expresa el valor medio de dicho parámetro (\bar{x}), y su desviación típica (σ_{n-1}), para cada una de las variedades rocosas analizadas. Las desviaciones obtenidas, salvo en las rocas de muy bajo contenido en agua, son bastante próximas en términos relativos, situándose alrededor del 10 por 100.

TABLA II
Contenido en agua en saturación (%)

Muestra	\bar{x}	σ_{n-1}
Caliza del Páramo:		
P-1	4.0	0.5
P-2	5.6	1.0
Caliza de Montaña:		
M-1	0.1	0.04
M-2	0.2	0.06
Dolomía de Boñar:		
B-1	5.3	0.5
B-2	5.9	0.5
Caliza de Laspra:		
L-1	0.6	0.2
L-2	2.6	0.3

ABSORCION LIBRE DE AGUA

Cuando una roca se sumerge en agua, absorbe cierta cantidad de agua y lo hace más o menos rápidamente, dependiendo de sus características petrográficas y en concreto de su sistema poroso. En este sentido, TADA y NAKANO (1983) señalan la poca influencia que presentan los grandes poros en la absorción de agua.

El contenido en agua que presenta una roca depende del tiempo de inmersión, si bien para tiempos más o menos largos —según el tipo rocoso— suelen alcanzarse valores de equilibrio. En con-

secuencia, distintos autores y normas de ensayo han establecido diferentes tiempos de referencia.

Así, cabe considerar:

- *Contenido en agua en una hora.*—Parámetro poco utilizado incluido en las normas ISRM (1979) con la denominación —poco afortunada— de «índice de vacíos» (void index).
- *Contenido en agua a los dos días.*—Este es el parámetro más utilizado. Las normas ASTM (1978) le denominan «absorción de agua», y en las normas RILEM (1980) y AFNOR se utiliza para determinar el grado de saturación de las rocas (denominado «coeficiente de saturación» y «coeficiente de Hirshwald», respectivamente).
- *Contenido en agua para tiempos largos.*—Corresponde a los valores de equilibrio. Las normas CNR-ICR (1981) le denominan «capacidad de absorción» y consideran alcanzado el equilibrio cuando la diferencia entre dos pesadas, espaciadas 24 horas, no supera el 0,1 por 100. BELIKOV et al. (1967) hablan de «saturación libre de agua» para tiempos alrededor de 45 días.

En el ensayo realizado —absorción libre de agua por inmersión total— se ha seguido la evolución en el tiempo del contenido en agua de las rocas. Teniendo en cuenta la teoría sobre el comportamiento del flujo de agua a partir de una superficie saturada (KALIMERIS y HALL, 1983), se presenta el contenido en agua y el grado de saturación de las rocas en función de la raíz cuadrada del tiempo: «*curvas de absorción libre de agua*».

Ensayo

Se ha realizado una inmersión total de las muestras en agua destilada, a temperatura ambiente (21°C), manteniéndose durante 12 días. A intervalos más o menos regulares respecto a la raíz cuadrada del tiempo, se ha determinado el peso de las muestras —después de limpiar su superficie con un paño húmedo— con una precisión de 0,01 g.

La determinación del contenido en agua debido a absorción libre — $w_i(t)$ —, así como el correspondiente grado de saturación — $S_i(t)$ —, se ha

obtenido de acuerdo con las expresiones [1] y [3] respectivamente.

Este ensayo, así como los siguientes, se han llevado a cabo al menos sobre dos muestras cilíndricas (D:35, L:65), dentro de cada una de las variedades rocosas estudiadas.

Resultados

En la figura 1 se presentan las curvas de absorción libre de agua y en la figura 2 dichas mismas curvas normalizadas (referidas al grado de saturación). En este segundo caso se muestran los puntos experimentales obtenidos en cada una de las muestras ensayadas.

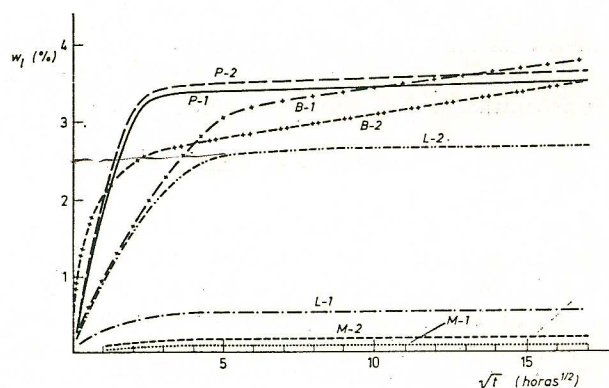


Figura 1.—Curvas de absorción libre de agua por inmersión total: Contenido en agua (w_i) en función del tiempo (\sqrt{t}).

Dichas curvas presentan ciertos rasgos comunes:

- Un tramo inicial recto —coeficiente de correlación superior a 0,99— de acusada pendiente.
- Un tramo medio con cambio gradual de pendiente (puede llegar a faltar si el cambio de pendiente es neto).
- Un tramo final de tendencia prácticamente lineal —en la escala y tiempos considerados— con pendiente ya muy baja.

(Algunas rocas presentan —al extrapolar— cierto contenido inicial en agua. Este hecho puede

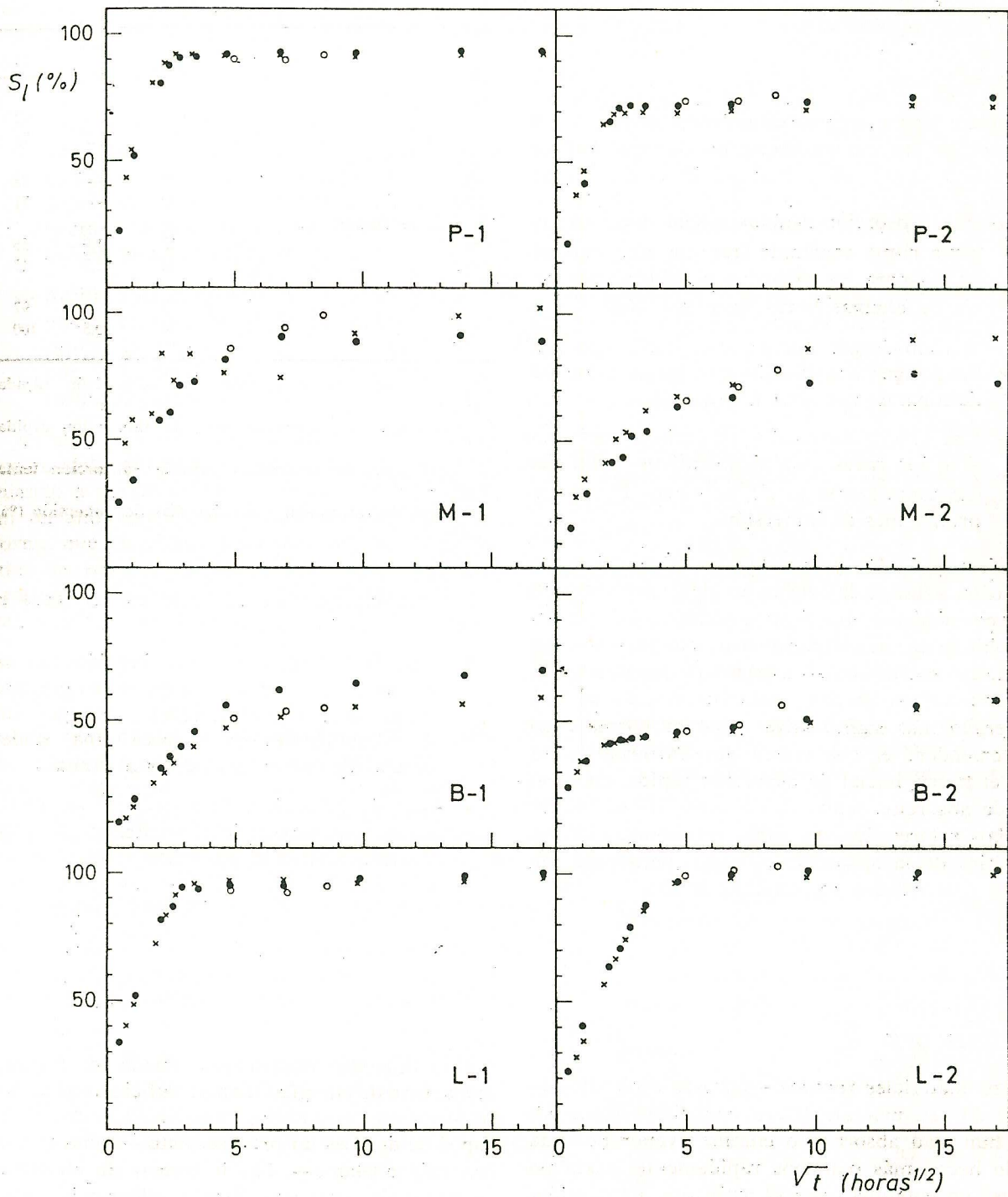


Figura 2.—Curvas de absorción libre de agua por inmersión total: Grado de saturación (S_1) en función del tiempo (\sqrt{t}). Los diferentes tipos de puntos corresponden a distintas muestras.

ser atribuido a un exceso de agua sobre su superficie, a pesar de limpiarlas con un paño húmedo; así, se observa cómo este contenido inicial es más acusado cuanto menor es el contenido en agua de la roca).

En consecuencia, pueden señalarse distintas etapas en el proceso de absorción de agua por las rocas:

- Una «absorción rápida» inicial que tiene lugar a ritmo constante frente a \sqrt{t} . Su duración —para las muestras consideradas— varía de algunas horas hasta un día.
- Al cabo de ese tiempo, y de forma gradual, tiene lugar una disminución en la velocidad de toma de agua por las rocas.
- Una «absorción lenta» posterior, con ritmo —en los casos más significativos— también constante frente a \sqrt{t} , al menos durante el primer mes de inmersión.

Además de los parámetros relativos al contenido en agua de las rocas, es de interés conocer la velocidad con que éste se alcanza. Así, pueden establecerse nuevos parámetros cinéticos —denominados coeficientes— a partir de las pendientes de los tramos lineales de las curvas. Se ha considerado más significativa la curva normalizada, obteniéndose el *coeficiente de saturación*, tanto en el tramo inicial de absorción rápida, como en el de absorción lenta. En la tabla III se indican dichos valores, junto a otros relacionados con la cinética de la absorción de agua, para cada una de las variedades rocosas estudiadas.

ABSORCION DE VAPOR DE AGUA: HIGROSCOPIA

Los materiales rocosos —porosos e hidrófilos— situados en una atmósfera con cierto contenido en humedad absorben o eliminan vapor de agua, y lo hacen más o menos rápidamente, hasta ponerse en equilibrio con el ambiente. La cantidad de humedad presente en las rocas depende tanto de las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa) como de las características propias del material (mineralogía, sistema poroso).

TABLA III
Absorción libre de agua

Muestra	Tpo.	L_1	L_2	S_1
Caliza del Páramo:				
P-1	4	40	0.3	92
P-2	4	32	0.2	73
Caliza de Montaña:				
M-1	8	20	—	88
M-2	16	14	—	71
Dolomía de Boñar:				
B-1	16	12	1.0	56
B-2	2	14	1.0	47
Caliza de Laspra:				
L-1	8	27	0.3	97
L-2'	12	24	0.3	100

Tpo.: Tiempo que se mantiene la «absorción rápida» (horas).

L_1 : Coeficiente de saturación para la «absorción rápida» ($h^{-1/2}$).

L_2 : Coeficiente de saturación para la «absorción lenta» ($h^{-1/2}$).

S_1 : Grado de saturación a los dos días de inmersión (%).

El agua higroscópica presente en las rocas es atribuida a distintas causas:

- Agua de hidratación o cristalización. Las sales son los principales componentes que presentan este comportamiento; aunque son poco importantes en la roca sana, suelen ser abundantes en las partes alteradas.
- Agua de adsorción. Este agua se encuentra ligada a la superficie específica de la roca. Presenta interés la adsorción física —caracterizada por la movilidad de sus moléculas—, ligada sobre todo a minerales arcillosos.
- Agua de condensación capilar. Agua retenida en conductos capilares, en equilibrio para presiones de vapor inferiores a la de saturación.

Esta humedad higroscópica puede ser extraída con aporte de energía y tiempo suficiente para que se alcance el equilibrio, dado que la difusión de vapor de agua es un proceso lento —como se analiza más adelante—. Las isotermas de absorción de vapor de agua suministran información completa del contenido en agua presente en la roca en función de la humedad ambiente, e indirectamente del tamaño de poro (Vos, 1976; DE CASTRO, 1978; SPOONER, 1983).

Los minerales arcillosos juegan un papel importante en estos procesos; así, se distinguen dos grandes grupos (GRIM, 1968):

- Arcillas del tipo esmectita (montmorillonita) y de tipo fibroso (sepiolita, paligorskita), de gran poder higroscópico. La cantidad de agua absorbida depende de la especie mineral concreta y de las condiciones ambientales, superando normalmente el 5 por 100 respecto a su peso seco a 100° C. Su secado requiere altas temperaturas.
- Arcillas del tipo de la caolinita, clorita, illita y sericita, con menor poder higroscópico. Su contenido en agua no suele superar el 1 por 100, mostrando en general una mayor facilidad para el secado.

En el ensayo realizado se ha observado la evolución del contenido en humedad de las rocas, cuando a partir de su estado seco se introducen en un ambiente rico en humedad. De la misma forma que en el apartado anterior, se han obtenido las «curvas de absorción de vapor de agua», representando los parámetros hídricos frente a raíz cuadrada del tiempo.

Ensayo

Las rocas han sido colocadas bajo una campana de plástico, junto a bandejas que contienen agua, manteniéndose dichas condiciones durante 9 días. La humedad relativa a lo largo del ensayo es del 95 por 100, siendo la temperatura de 21° C.

A partir del estado seco de las muestras, se ha ido controlando su peso a intervalos más o menos regulares frente \sqrt{t} .

Durante la operación de pesado, la evaporación experimentada puede situarse —para las muestras más higroscópicas— alrededor de 0,01 g.

A partir de los valores obtenidos se ha calculado el contenido en agua higroscópica — $w_h(t)$ —, así como el correspondiente valor normalizado — $S_h(t)$ —, de acuerdo con [1] y [3].

Resultados

En la figura 3 se presentan las curvas de absorción de vapor de agua, y en la figura 4 las correspondientes curvas normalizadas; igual que

en el caso anterior se indica, respectivamente, el valor medio y los puntos experimentales.

Es de destacar la semejanza de estas curvas con las de absorción libre de agua. Así, puede observarse un primer tramo lineal de pendiente relativamente elevada, seguidamente una zona con cambio gradual de pendiente y, finalmente, un último tramo ya horizontal. (El hecho de que las curvas no pasen por el origen, puede ser debido a que al comienzo del ensayo el ambiente no estaba aún saturado en humedad.)

Inicialmente, por tanto, existe una «absorción rápida» de humedad, que es lineal frente a \sqrt{t} —coeficiente de correlación superior a 0,99—, y que se mantiene para las muestras consideradas de 1 a 2 días. Para tiempos mayores tiene lugar una disminución progresiva de la velocidad de absorción. Por último el contenido en agua de la roca tiende a estabilizarse en unos niveles y para unos tiempos que varían según las características de las rocas.

En la tabla IV se han expresado algunos parámetros en relación con este comportamiento. En este caso puede observarse un comportamiento más próximo entre los diferentes tipos rocosos analizados, especialmente en cuanto al tiempo que dura la absorción de vapor de agua. Las diferencias más importantes se dan en la velocidad con que este fenómeno ocurre: coeficiente de saturación, y quedan reflejadas en el grado de saturación final de la roca.

TABLA IV
Absorción de vapor de agua
(H_r : 95%; T: 21° C)

Muestra	Tpo.	H	S _h
Caliza del Páramo:			
P-1	2	2.5	24
P-2	2	1.1	10.5
Dolomía de Boñar:			
B-1	1	0.6	4.5
B-2	1	0.7	4.5
Caliza de Laspra:			
L-1	2	3.7	28
L-2	2	4.4	34

Tpo.: Tiempo que se mantiene la «absorción rápida» (días).
H: Coeficiente de saturación ($h^{-1/2}$).
S_h: Grado de saturación en el equilibrio (%).

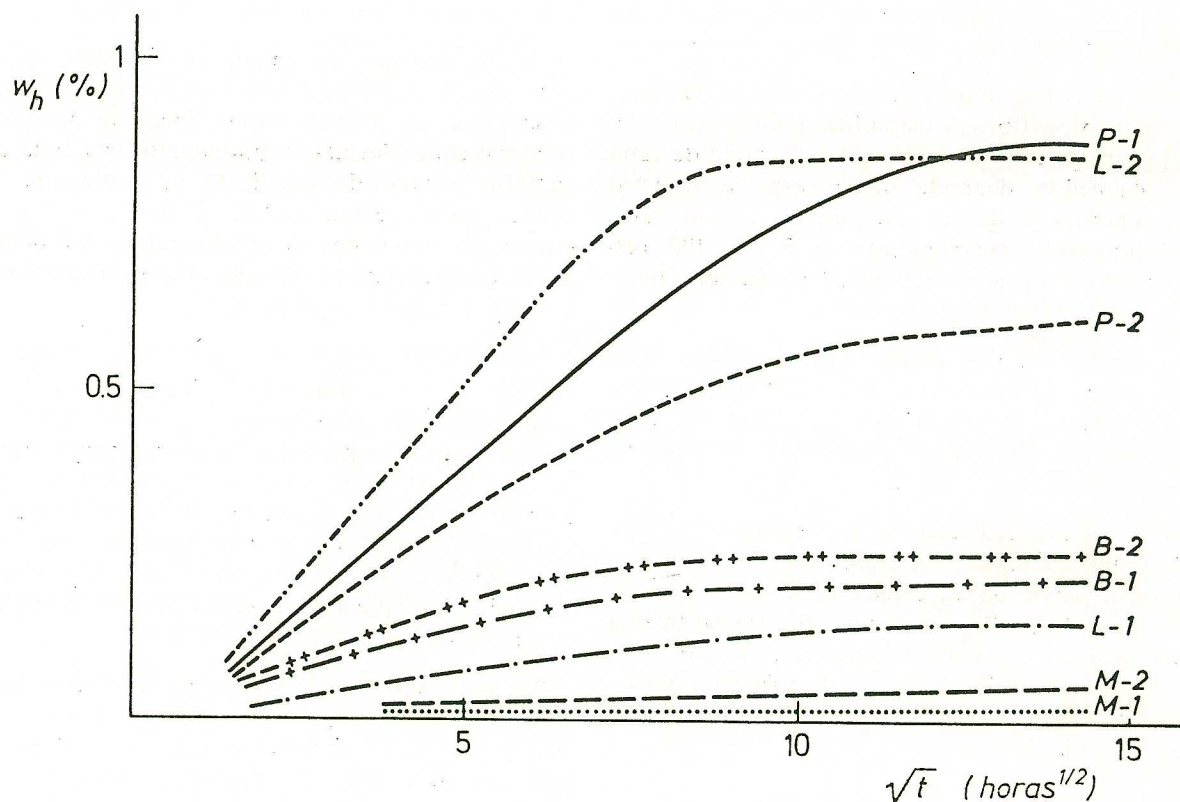


Figura 3.—Curvas de absorción de vapor de agua (H_r : 95%): Contenido en agua (w_h) en función del tiempo (\sqrt{t}).

SUCCION CAPILAR

Es conocida la capacidad que tienen los materiales porosos de succionar agua por encima del nivel que presenta la superficie líquida contenida en ellos. Este hecho es consecuencia de su carácter hidrófilo, así como de la configuración de su sistema poroso (TORRACA, 1982).

En rocas con poros capilares el agua experimenta un ascenso que es inversamente proporcional al tamaño de dichos poros, dependiendo también de las características del sólido (mineralogía), del líquido (pureza del agua) y del poder de evaporación del ambiente (temperatura, humedad, etc.).

En cuanto a la cinética de este fenómeno, es conocida —tanto teórica como experimentalmente— su dependencia lineal con la raíz cuadrada del tiempo (Vos, 1976; MAMILLAN, 1981; KALIMRIS y HALL, 1983).

En este caso suelen considerarse distintas magnitudes, entre las cuales pueden mencionarse:

— Cantidad de agua tomada (ΔM) por unidad de superficie (S) de flujo. Entonces se tiene:

$$\Delta M(t)/S = C \sqrt{t}$$

donde «C» es el *coeficiente de absorción capilar* o *coeficiente de capilaridad* (expresado en $\text{Kg}/\text{m}^2 \text{h}^{1/2}$).

— Distancia penetrada por el agua o avance del frente húmedo (H). Igualmente se tiene:

$$H(t) = A \sqrt{t}$$

siendo «A» el *coeficiente de penetración capilar* (expresado en $\text{m}/\text{h}^{1/2}$).

Ambos coeficientes pueden considerarse parámetros característicos de los materiales, fijadas previamente las condiciones de ensayo. En este

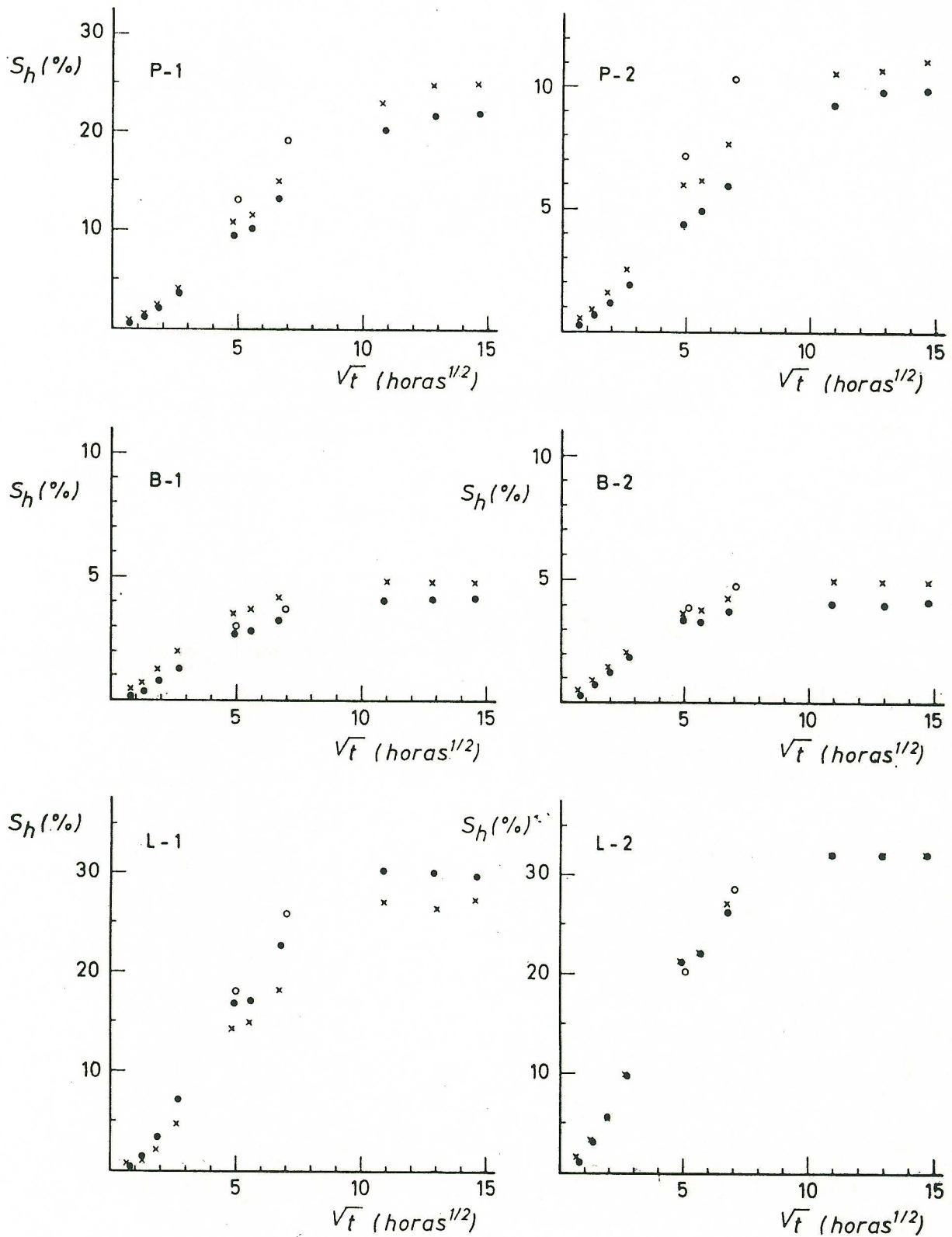


Figura 4.—Curvas de absorción de vapor de agua (H_r : 95%): Grado de saturación (S_h) en función del tiempo (\sqrt{t}). Los diferentes tipos de puntos corresponden a distintas muestras.

sentido pueden mencionarse las normas dadas por RILEM (1980) y CNR-ICR (1982) para la obtención de «C». Dicho coeficiente es más utilizado ya que es más fácil de obtener y más preciso.

De la misma manera, pueden obtenerse:

— Cantidad de agua absorbida (w_c), definida de acuerdo con la expresión [1]. Entonces:

$$w_c = B \sqrt{t}$$

donde «B» es otro coeficiente de absorción capilar.

— Grado de saturación (S_c), definido de acuerdo con la expresión [3]. Entonces:

$$S_c = D \sqrt{t}$$

donde «D» es el coeficiente de saturación capilar, ya utilizado por otros autores (GERARD, 1978; LEARY, 1981). Estos dos coeficientes poseen menor interés, dada su dependencia de la geometría de las muestras.

Evidentemente, todos estos parámetros se encuentran relacionados. Así, para un modelo de poros capilares de igual tamaño se tiene (ALONSO, 1986):

$$C = 10 n_0 A$$

de acuerdo con las unidades indicadas para «C» y «A». Esta expresión nos permite determinar un «coeficiente de penetración capilar teórico» a partir del de absorción capilar.

Igualmente pueden obtenerse relaciones entre los restantes coeficientes:

$$\begin{aligned} B &= w_s A/L \\ D &= 100 A/L \end{aligned}$$

siendo « w_s » el contenido en agua en saturación (%) y «L» la longitud de la probeta perpendicularmente a la cara de flujo (expresada en m).

Para tiempos mayores la toma de agua por capilaridad deja de presentar comportamiento lineal, teniendo lugar una caída acelerada en el ritmo de absorción de agua. Finalmente, se observa una tendencia a la estabilización del contenido en agua, sin perder de vista que los valores finales de algunas magnitudes dependen en gran medida de la geometría de las muestras.

En los ensayos de capilaridad efectuados se ha observado la evolución de las distintas magnitudes relacionadas con la toma de agua por las rocas, obteniéndose las correspondientes «curvas de capilaridad» al representar dichas magnitudes frente a la raíz cuadrada del tiempo.

Ensayo

El ensayo se ha llevado a cabo en bandejas de plástico sobre las que se ha colocado una delgada base porosa (arenisca), situando encima un papel de filtro grueso (WHATMAN, n. 4.041) y añadiendo agua destilada hasta el nivel del papel de filtro. Secas las muestras, al comienzo del ensayo son colocadas sobre el papel de filtro, controlándose su peso a intervalos regulares frente a \sqrt{t} . Asimismo, cuando es posible, se ha determinado la altura alcanzada por el agua.

Una serie de muestras ha sido ensayada en condiciones normales (H_r : 75%; T: 20° C), durante unos 3 a 5 días. Otra lo ha sido en ambiente saturado durante un tiempo mucho mayor, tal como se indica: Los primeros días bajo una campana de plástico (H_r : 95%; T: 20° C), seguidamente cada una de las muestras fue cubierta por un vaso de vidrio, permaneciendo de esta manera durante unos dos meses. (Debido a las pequeñas variaciones térmicas diarias, este último ambiente se presenta periódicamente sobresaturado.)

Se ha determinado $\Delta M(t)/S$, siendo:

$$\Delta M(t) = M_c(t) - M_0$$

de acuerdo con la notación empleada; así como el contenido en agua $w_c(t)$ y grado de saturación $S_c(t)$, a partir como en casos anteriores de las expresiones [1] y [3].

Resultados

En la figura 5 se presentan las curvas de absorción capilar (para el incremento de masas por unidad de superficie) y en la figura 6 las curvas de penetración capilar. Estas segundas no han podido ser obtenidas en todas las rocas y, en general, no merecen la misma confianza que las de absorción.

En ambos casos puede corroborarse el com-

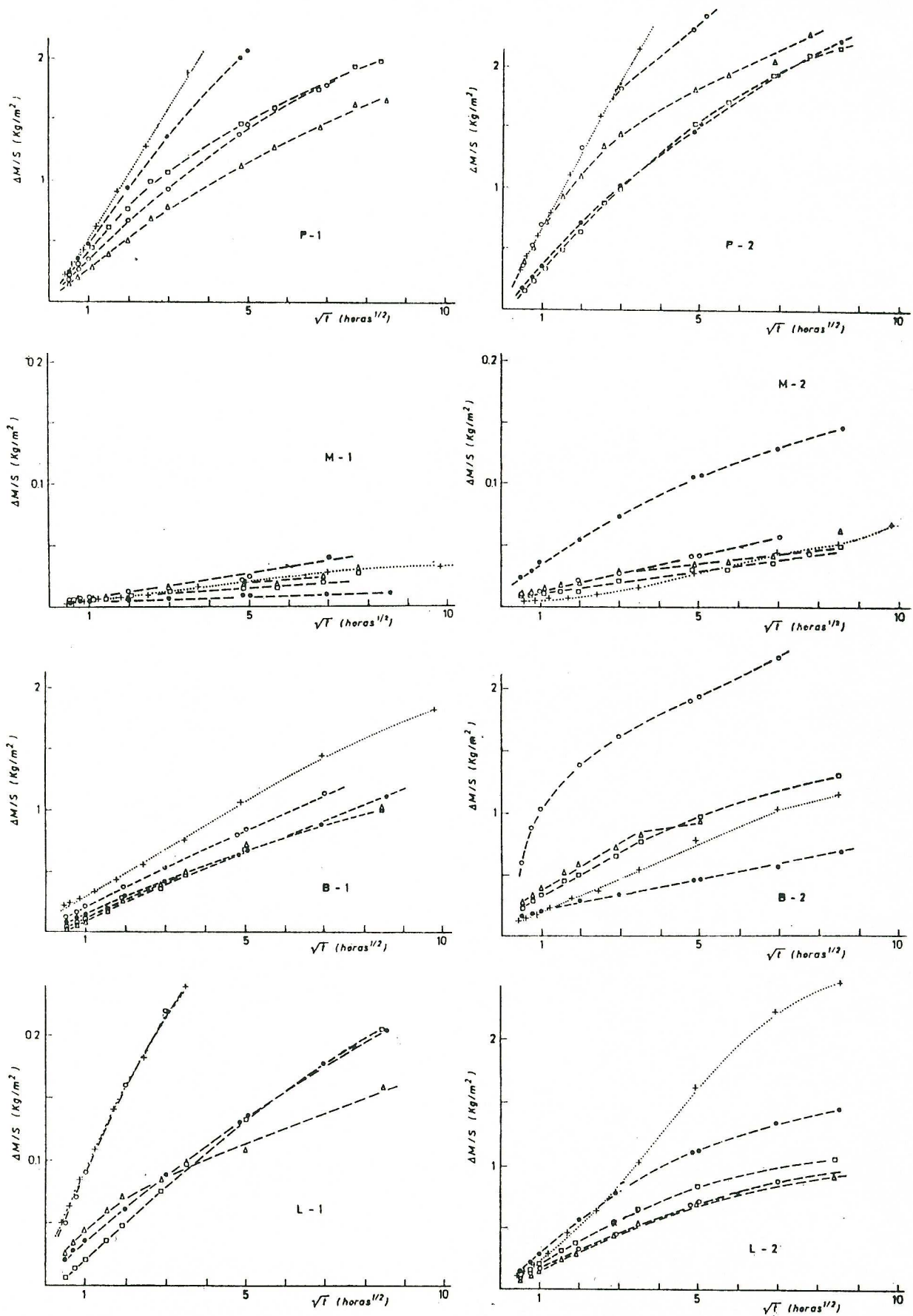


Figura 5.—Curvas de absorción capilar: Incremento de masa por unidad de superficie ($\Delta M/S$) en función del tiempo (\sqrt{t}). Las distintas muestras son indicadas por diferentes tipos de puntos, correspondiendo (+) a la muestra ensayada en ambiente saturado.

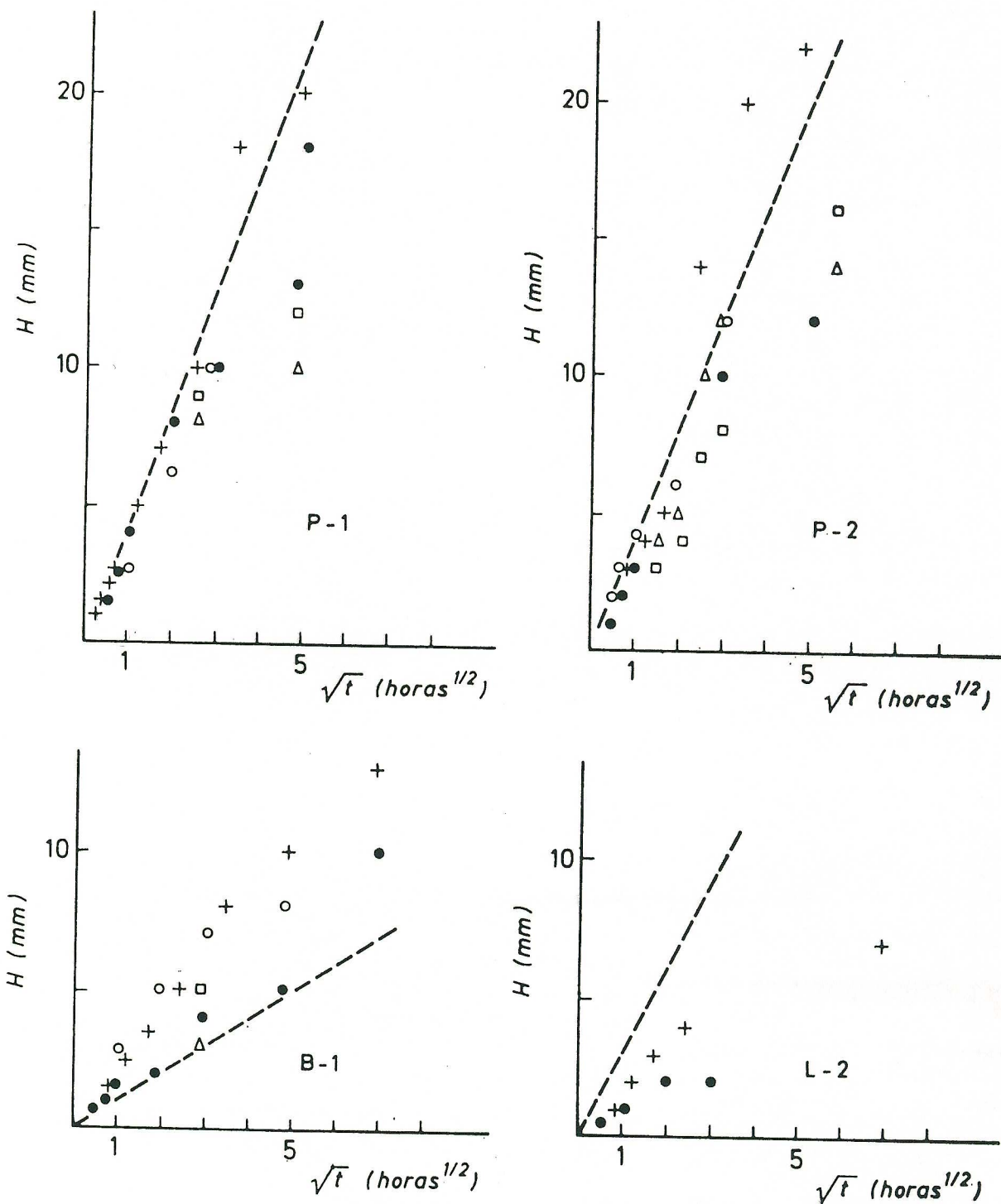


Figura 6.—Curvas de penetración capilar: Altura alcanzada (H) en función del tiempo (\sqrt{t}). Los puntos han sido obtenidos experimentalmente en diferentes muestras, las rectas teóricamente a partir del valor medio de los coeficientes de absorción capilar.

portamiento lineal al comienzo del ensayo: «absorción rápida», manteniéndose éste más o menos tiempo, dependiendo de las condiciones del ensayo (humedad ambiente) y de las características de las muestras. Las pendientes en dichos tramos lineales corresponden, respectivamente, a los coeficientes «C» y «A».

En concreto, esta absorción rápida dura un mínimo de ocho horas, pudiendo llegar a prolongarse durante más de cuatro días (variedades B-1 y M-1). Seguidamente, tiene lugar una disminución gradual de pendiente de forma sumamente lenta.

En ambiente saturado la toma de agua por capilaridad presenta coeficientes ligeramente más altos y, además, la absorción rápida se mantiene mayor tiempo. Esto es lógico si se tiene en cuenta que junto a la absorción capilar tiene lugar una absorción higroscópica, ya que se parte de rocas secas. (Esto hace que las rocas más higroscópicas muestren pequeños aumentos de pendiente en los primeros minutos de ensayo, y, al extrapolar, las rectas parezcan no pasar por el origen.)

En la tabla V se han expresado los valores de «C» —valor medio (\bar{x}) y desviación típica (σ_{n-1})—, así como los coeficientes «A» y «D» experimentales y los calculados teóricamente.

TABLA V
Coefficientes de capilaridad

Muestra	C · 10 ⁻²		A · 10 ⁻²		D	
	\bar{x}	σ_{n-1}	Exp.	Teor.	Exp.	Teor.
Caliza del Páramo:						
P-1 ...	38	10	0.27	0.42	9	8.1
P-2 ...	50	18	0.30	0.40	7.6	8.4
Caliza de Montaña:						
M-1 ...	0.4	—	—	0.14	1.6	2.4
M-2 ...	0.7	—	—	0.15	2.0	1.6
Dolomía de Boñar:						
B-1 ...	14	1.5	0.14	0.10	2.4	1.7
B-2 ...	16	7	—	0.11	1.6	1.4
Caliza de Laspra:						
L-1 ...	5	2	—	0.35	7.0	7.7
L-2 ...	20	6	0.10	0.30	9.0	6.5

C: Coeficiente de absorción capilar (Kg/m² · h^{1/2}).

A: Coeficiente de penetración capilar (m/h^{1/2}).

D: Coeficiente de saturación capilar (h^{-1/2}).

Atendiendo al coeficiente de penetración capilar, pueden establecerse dos grandes grupos dentro de las rocas estudiadas:

— A=0.1 cm/h^{1/2}. Corresponde a las variedades cristalinas de mayor tamaño de acceso de poro (Dolomía de Boñar y Caliza de Montaña).

— A=0.4 cm/h^{1/2}. Corresponde a variedades micríticas, con pequeño tamaño de acceso de poro (Calizas del Páramo y Laspra).

En cuanto a las diferencias observadas entre los valores teóricos y experimentales puede señalarse:

- En la muestra B-1 la absorción de agua es inferior al ascenso capilar observado, esto hace pensar que los poros mayores no se saturan por capilaridad.

- Contrariamente, la muestra L-2 presenta una absorción de agua superior al ascenso capilar, este hecho puede ser atribuido al hinchamiento que manifiesta la roca.

Para el ensayo realizado en ambiente saturado y mantenido durante tiempos largos se muestra en este caso cómo evoluciona el grado de saturación de las rocas frente a \sqrt{t} —figura 7—, indicándose el cambio realizado en las condiciones de humedad.

Como en casos anteriores, algunas rocas presentan una primera etapa donde la toma de agua es muy importante y lineal con \sqrt{t} : «absorción rápida». Este comportamiento se mantiene alrededor de dos días. Seguidamente, decrece de forma gradual el ritmo de absorción de agua, hasta alcanzarse una última fase donde el contenido en agua tiende a estabilizarse asintóticamente, para tiempos ya muy largos.

No obstante, otros tipos rocosos muestran un comportamiento lineal a lo largo de todo el intervalo de tiempo considerado, presentando además coeficientes mucho más bajos. Este hecho —sin duda relacionado con el sistema poroso— es muy acusado en la Caliza de Montaña (M-1), roca eminentemente fisurada.

Al extremarse la humedad ambiente —a partir del punto señalado en la figura 7— tienen lugar fenómenos de condensación capilar, con notables diferencias de comportamiento entre los distintos tipos rocosos considerados:

- Las dolomías muestran un incremento en el

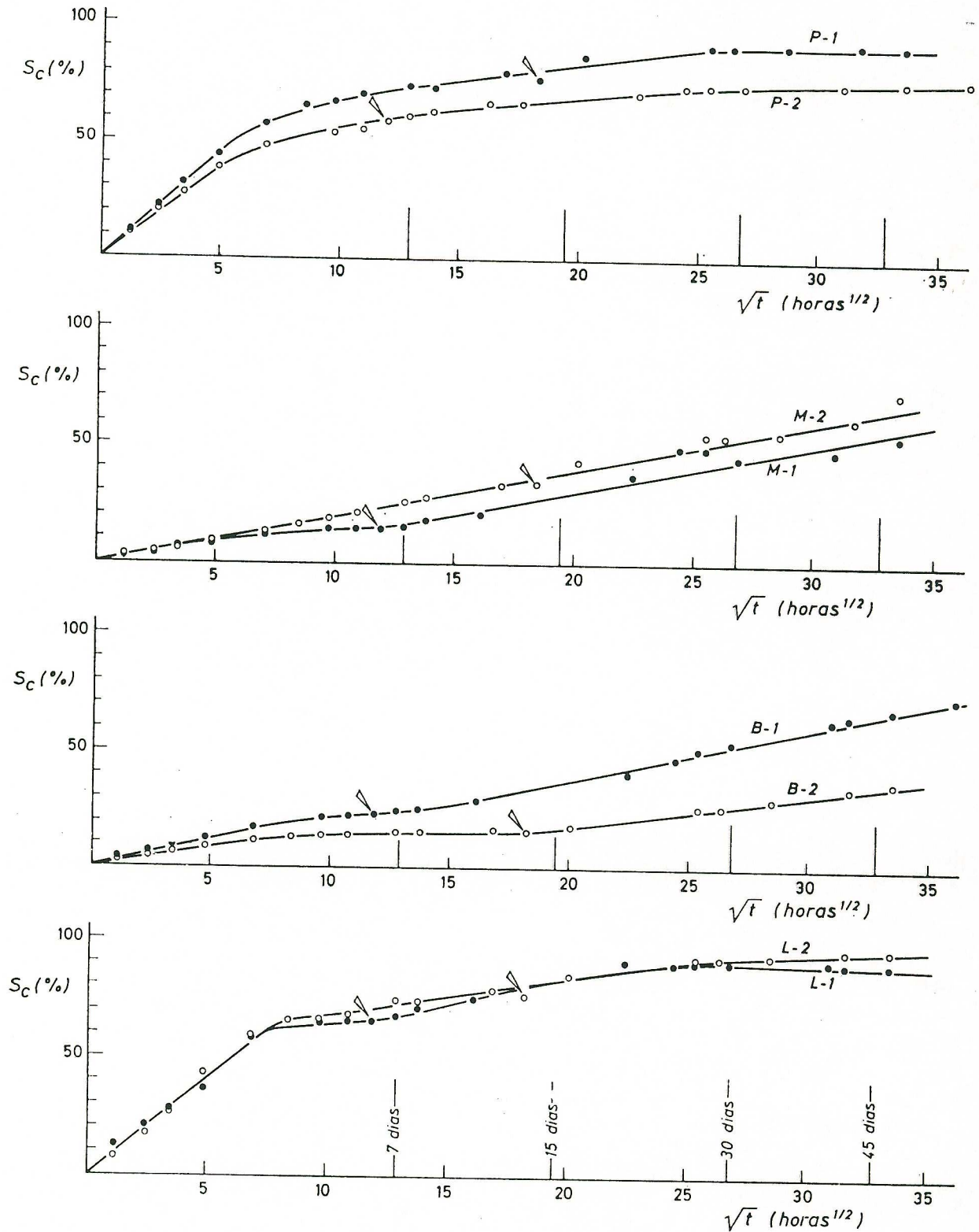


Figura 7.—Curvas obtenidas en el ensayo de capilaridad realizado en ambiente saturado, y periódicamente sobresaturado a partir del punto señalado (\\): Grado de saturación (S_c) en función del tiempo (\sqrt{t}).

ritmo de absorción de agua, pasando a tomar valores similares a los iniciales, y los mantienen durante más de dos meses.

- En las calizas micríticas el incremento es menor, manifestándose únicamente como un retraso en el comienzo de la absorción lenta.

El grado de saturación alcanzado al final de este ensayo es elevado y comparable al obtenido por inmersión libre en agua a lo largo de dos semanas.

DESORCION DE AGUA: EVAPORACION

El secado de los materiales rocosos es un proceso complejo en el que intervienen muchos más factores que los petrográficos. Entre ellos pueden señalarse los ambientales (temperatura, humedad, ventilación), así como otros dependientes de las características de las muestras (geometría y dimensiones, contenido en agua, etc.).

No obstante, son conocidos algunos aspectos de este fenómeno (STAMBOLOV y VAN ASPEREN DE BOER, 1976; Vos, 1978; TORRACA, 1982). Así, una muestra más o menos saturada en agua, inicialmente presenta una velocidad de secado constante, hasta alcanzar un punto a partir del cual ésta decrece rápidamente: «punto crítico» (Vos, 1976).

Este hecho es interpretado de la siguiente forma: Al comienzo el agua es transportada por el sistema poroso hasta la superficie, donde evapora. La velocidad de evaporación es, por tanto, constante e igual a la de su superficie líquida equivalente. Cuando el contenido en agua de la roca ya no permite mantener dicho aporte —contenido en agua crítico—, el secado continúa para el agua ligada por fuerzas capilares, o electrostáticas; su velocidad depende ahora del coeficiente de difusión de vapor de agua de la roca. El proceso cada vez es más lento, tendiendo a estabilizarse el contenido en agua de forma asintótica.

En rocas de baja porosidad el secado se manifiesta rápidamente sobre su superficie. Así, al principio, aparecen zonas secas que van creciendo hasta ponerse en contacto; esto da lugar a manchas aisladas de humedad que van decreciendo hasta desaparecer. El secado total se alcanza a los 15 minutos. Cabe mencionar la relación existente entre las últimas manchas de humedad y ciertos rasgos texturales (granos, fisuras, etc.). Al aumentar

la porosidad, el secado de la superficie es más lento y difuso, consecuencia de la migración de agua desde el interior.

Alcanzado el equilibrio para unas condiciones ambientales dadas, al variar éstas puede variar el contenido en humedad de las rocas (isotermas de absorción). No obstante, como consecuencia de la histéresis que presenta el agua de condensación capilar —correspondiente a poros entre 0.002 y 0.05 μm (GREGG y SING, 1982)—, ligeras variaciones de humedad en el ambiente pueden no afectar a la roca.

En los ensayos efectuados se ha observado la evolución del contenido en agua en las rocas, para diferentes ambientes de secado, a partir de muestras previamente saturadas. Como en casos anteriores se han representado contenido en agua y grado de saturación en función del tiempo: «*curvas de evaporación*», sin que ahora sea de interés considerar su raíz cuadrada.

Ensayo

Se ha llevado a cabo en una habitación con temperatura y humedad estables ($T: 20 \pm 2^\circ \text{C}$ y $H_r: 70\%$ en una tanda de muestras y 80% en otra, con variaciones inferiores al 5%). Previamente, las rocas son saturadas en agua bajo vacío. Al comienzo del ensayo se limpian las muestras con un paño húmedo y se colocan sobre una rejilla de plástico, manteniéndose en las condiciones señaladas durante 12 días. A intervalos regulares de tiempo —más espaciados al avanzar el ensayo— se ha determinado su peso.

A partir de estos valores se calcula el contenido en agua presente en la roca — $w_s(t)$ —, así como el correspondiente grado de saturación — $S_s(t)$ —, de acuerdo con las expresiones [1] y [3], respectivamente.

Resultados

En la figura 8 se presentan las curvas de evaporación para una humedad relativa del 80% . Las figuras 9 y 10 corresponden a las curvas normalizadas —grado de saturación en función del tiempo—; en este caso se muestran dos curvas para cada variedad rocosa: la inferior para una humedad del 70% y la superior para el 80% . (Puede observarse cómo en algunos casos las curvas se

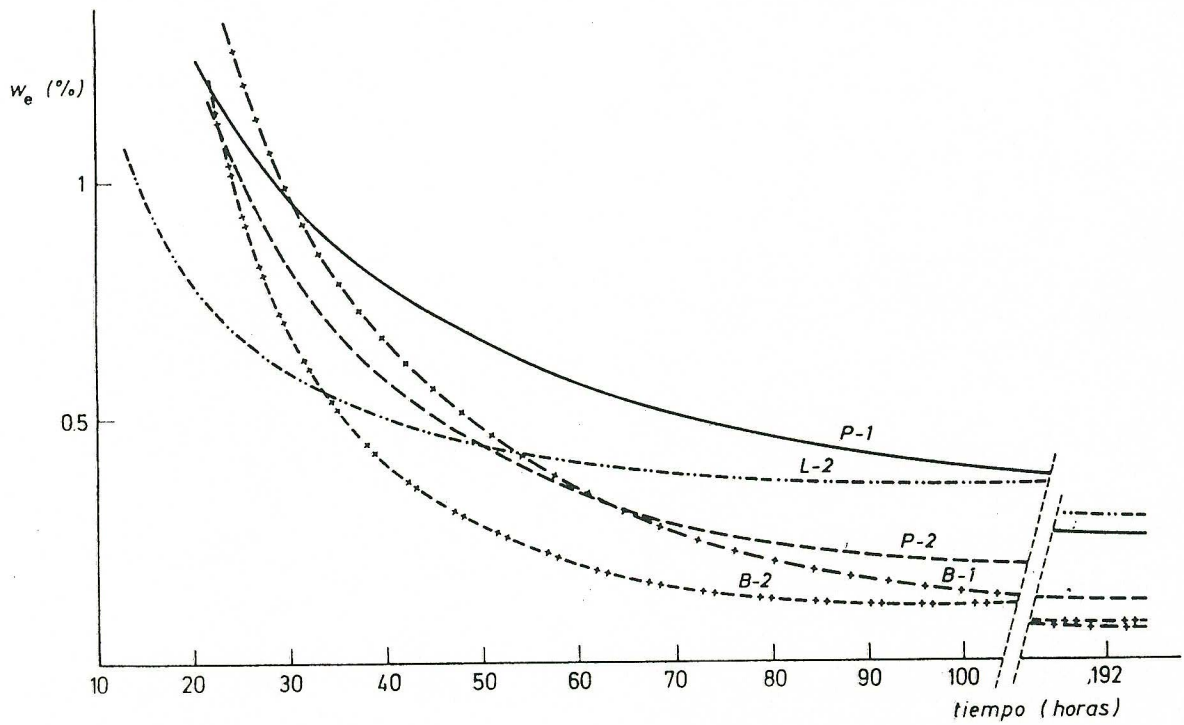
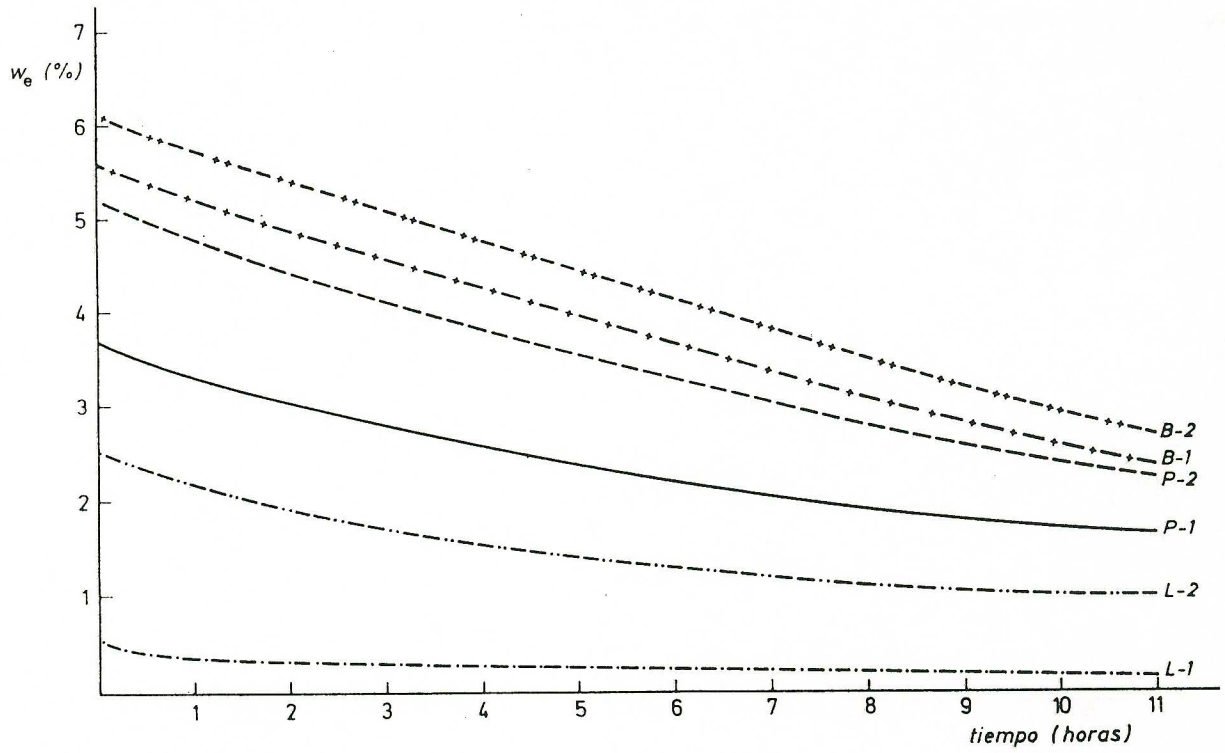


Figura 8.—Curvas de evaporación: Contenido en agua (w_a) en función del tiempo, durante las primeras horas y los primeros días de secado. Humedad ambiente: 80%.

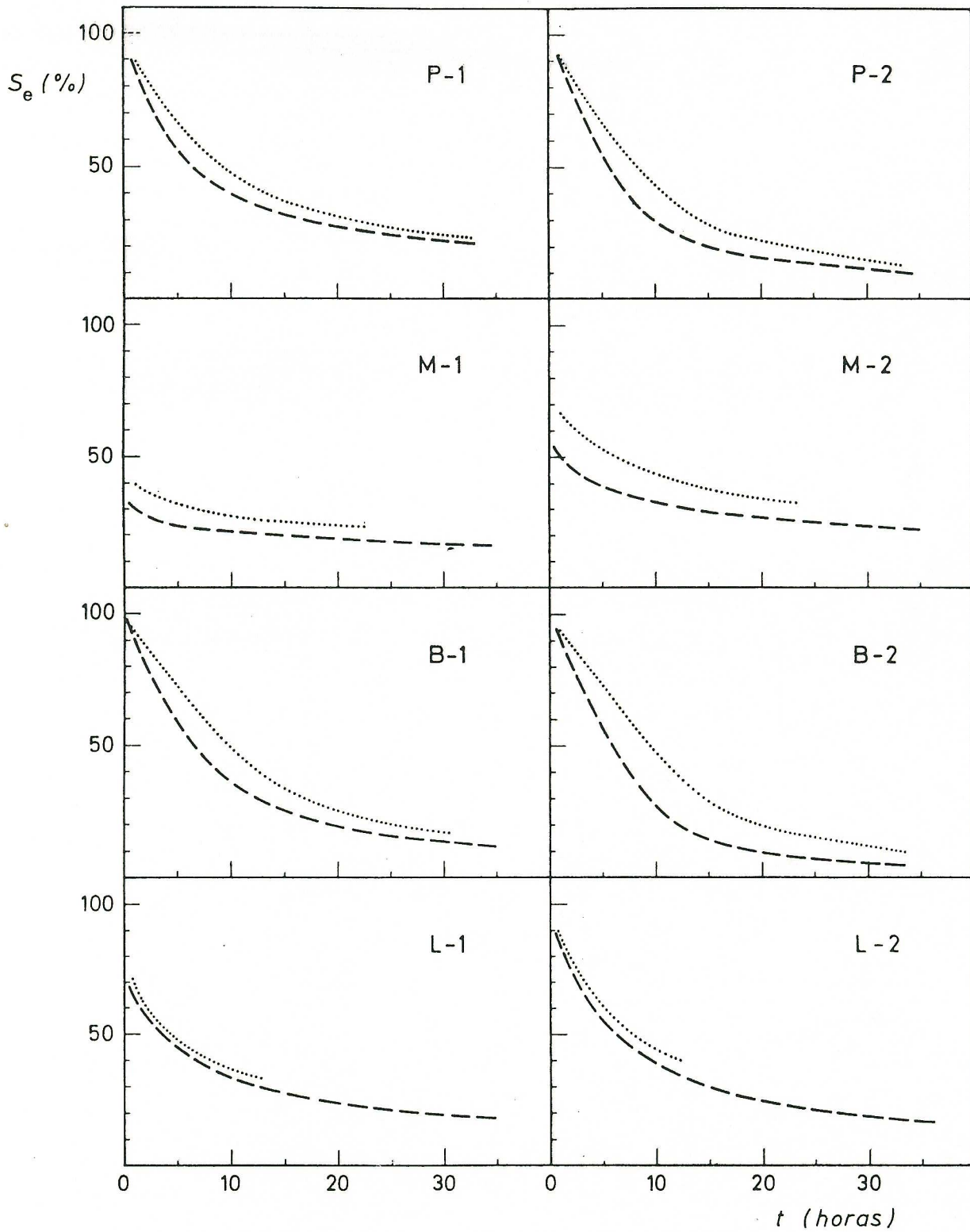


Figura 9.—Curvas de evaporación «primeras horas»: Grado de saturación (S_s) en función del tiempo. Humedad ambiente: 70% en línea de trazos, y 80% en línea de puntos.

encuentran desplazadas de los valores saturados de partida; esto es particularmente acusado en las calizas cristalinas —poco porosas—, y es atribuible a un exceso de agua en su superficie.)

En la tabla VI se indica el grado de saturación que presentan las rocas en distintos momentos del secado, después de corregidos los valores correspondientes a las variedades cristalinas.

TABLA VI
Evaporación (humedad relativa: 70%)

Muestra	S_s			
	5 h.	20 h.	2 d.	8 d.
Caliza del Páramo:				
P-1	55	31	16	7
P-2	55	18	8	2
Caliza de Montaña:				
M-1	47	35	25	12
M-2	58	40	28	11
Dolomía de Boñar:				
B-1	58	18	8	1
B-2	55	10	2.5	0.5
Caliza de Laspra:				
L-1	53	30	17	6
L-2	53	25	13	9

S_s : Grado de saturación, a partir del estado saturado, en las primeras horas y días de secado (%).

De acuerdo con las curvas obtenidas, pueden señalarse también diferentes etapas durante el secado:

— Inicialmente tiene lugar un «secado rápido», lineal en el tiempo, cuya pendiente sólo depende de la humedad ambiente, y su duración del contenido en agua que posee la roca. (Así, para un 70% de humedad se observa una pérdida de saturación del 10% por hora, manteniéndose dicho ritmo más de 5 horas, sobre todo en las rocas porosas).

— A continuación, y de forma imperceptible, decrece el ritmo de secado, siendo difícil de establecer su comienzo (punto crítico). En este caso resulta más fácil determinar el punto de máximo cambio de pendiente. (Para las muestras estudiadas tiene lugar a las 10 horas de ensayo.)

— Seguidamente tiene lugar un «secado lento» donde la pérdida de agua es cada vez menor. A otra escala y considerados tiempos mayores —fi-

gura 10—, puede observarse cómo esta pérdida de agua presenta un comportamiento exponencial, especialmente en las rocas más cristalinas.

Los contenidos en agua finales —ya de equilibrio— dependen de la capacidad higroscópica de la roca y de la humedad del ambiente, precisando tiempos elevados para alcanzarse.

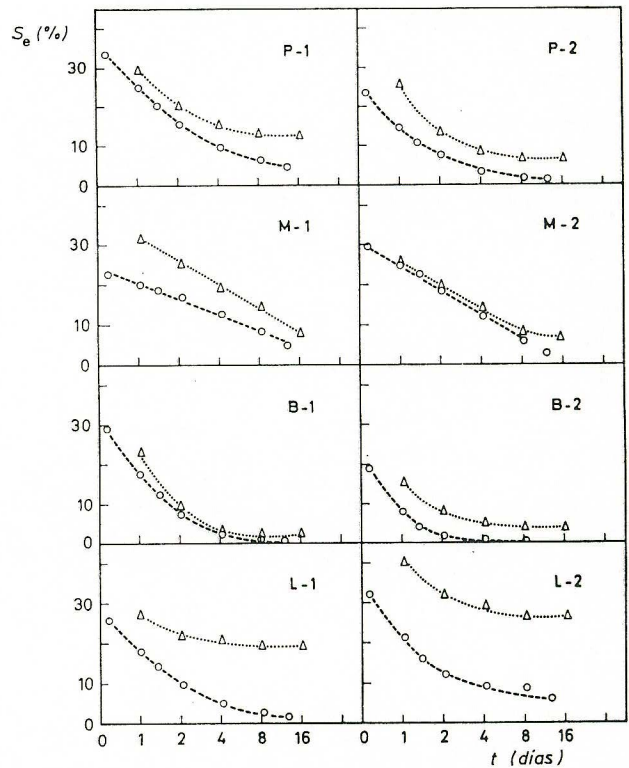


Figura 10.—Curvas de evaporación «primeros días»: Grado de saturación (S_s) en función del tiempo. Humedad ambiente: 70% en línea de trazos y 80% en línea de puntos.

EXPANSION HIDRICA

Algunas rocas al absorber agua desarrollan tensiones en su interior, que son puestas de manifiesto por su expansión volumétrica, siempre que lo permita su grado de confinamiento. En este comportamiento, además de los valores finales alcanzados, es de interés su cinética y su relación con la toma de agua por la roca.

Se ha determinado la expansión lineal (ϵ) —también denominada hinchamiento— que experimen-

ta una muestra no confinada durante la absorción libre de agua, de acuerdo con la expresión:

$$\epsilon = (\Delta L / L_0) \cdot 100 (\%)$$

donde:

$$\Delta L = L(t) - L_0$$

siendo L_0 la longitud de la roca seca, y $L(t)$ la longitud de la muestra, después de permanecer sumergida su mayor parte en agua durante un tiempo «t».

Mientras no se especifique lo contrario, se consideran tiempos suficientemente largos como para que se alcancen valores de equilibrio, ya prácticamente constantes.

De las rocas estudiadas únicamente la variedad L-2 de Laspra experimenta hinchamiento, sin duda en relación con el porcentaje y naturaleza de su fracción arcillosa. En el ensayo realizado se ha observado la evolución en el tiempo de la expansión lineal de la roca, según tres direcciones ortogonales. Como en anteriores ocasiones se presenta dicho parámetro en función de la raíz cuadrada del tiempo: «Curvas de hinchamiento».

Ensayo

El procedimiento experimental utilizado para la determinación de la expansión lineal es el indicado por ORDAZ (1978) —de acuerdo con DUNCAN (1976)—, y se corresponde con las recomendaciones de la ISRM (1979). En esencia, consta de una cubeta en donde se disponen ortogonalmente tres extensómetros mecánicos, cuya sensibilidad es de 1 μ m. En este caso se han utilizado probetas prismáticas (70x30x30 mm.), cuya longitud es determinada con una precisión de 0.1 mm.

Al comienzo del ensayo —tras el secado previo de la roca—, la muestra es colocada en la cubeta ajustándose los comparadores a cero y añadiéndose agua destilada a 18° C, hasta quedar cubiertas más de sus tres cuartas partes. A partir de ese momento se han tomado los incrementos de longitud registrados en los comparadores, a intervalos de tiempo más o menos constantes frente a \sqrt{t} .

Resultados

En la figura 11 se presentan las curvas de hin-

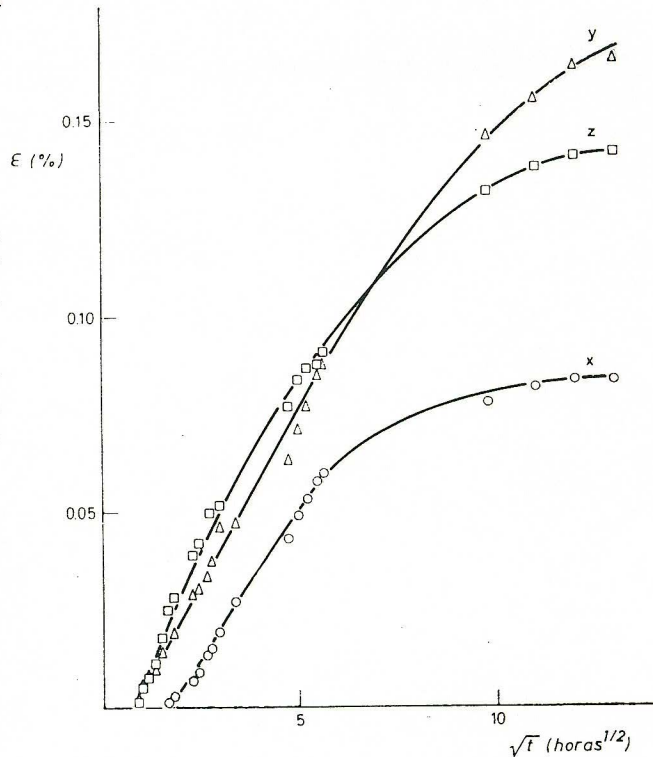


Figura 11. Curvas de hinchamiento en la Caliza de Laspra: Expansión lineal (ε) en función del tiempo (√t), para tres direcciones ortogonales.

chamiento libre para las tres direcciones consideradas. Es de destacar la semejanza entre estas curvas y las de absorción libre de agua (figs. 1 y 2). Así, inicialmente se observa un tramo lineal frente a \sqrt{t} y de fuerte pendiente: «hinchamiento rápido», a continuación un tramo con cambio gradual de pendiente; finalmente, la expansión tiende a ser constante, alcanzando valores de equilibrio.

No obstante, más en detalle destacan ciertas diferencias entre ambos comportamientos:

- Inicialmente la roca no manifiesta hinchamiento, a pesar de la importante absorción de agua que tiene lugar.
- El comportamiento lineal «rápido» se mantiene ahora durante un tiempo superior, respecto a la absorción libre de agua.
- Para tiempos mayores el hinchamiento continúa con valores notables, mientras la absorción de agua es insignificante.

En resumen, es de señalar cierto retraso en el hinchamiento experimentado por las rocas, respecto a su absorción de agua. Este comportamiento puede ser debido a que la primera agua que penetra en la roca ocupa los espacios vacíos de mayor tamaño, sin afectar los relacionados con los minerales arcillosos. La absorción de agua por dichos minerales es, en consecuencia, un proceso más lento, con notable inercia respecto al contacto de la roca con el agua, y en el que puede destacarse la pequeña cantidad de agua que interviene en dicho fenómeno.

CONCLUSIONES

A) Características de los procesos de sorción de agua por las rocas

— La absorción de agua muestra en todos los casos considerados —absorción libre, capilar e higroscópica— una cinética semejante:

- Inicialmente tiene lugar una «absorción rápida», que se mantiene constante frente a \sqrt{t} , y cuya duración es mayor en los procesos más lentos de absorción de agua.
- A continuación, y de forma gradual, tiene lugar una disminución en el ritmo de absorción de agua.
- Finalmente, dependiendo del proceso considerado, puede mantenerse durante algún tiempo una «absorción lenta», hasta alcanzarse asintóticamente valores de equilibrio para el contenido en agua de la roca.

El coeficiente en dichos tramos lineales, así como la duración de cada una de estas etapas, guarda relación con las características petrográficas de las rocas, fundamentalmente con las relativas a su sistema poroso y fracción arcillosa.

— El secado responde a distinto comportamiento, siendo ahora mayoritariamente independiente de las características de las rocas:

- Al comienzo también tiene lugar un «secado rápido», constante en el tiempo y dependiente de las condiciones ambientales. Su duración depende del contenido en agua que presentan las rocas al inicio del proceso.
- Insensiblemente comienza a disminuir la velocidad de secado, variando de forma gradual,

hasta alcanzarse asintóticamente valores de equilibrio para el contenido en agua de la roca. Estos valores finales dependen de la humedad del ambiente y de la capacidad higroscópica de las rocas.

B) Influencia de la petrografía en los procesos de absorción de agua por las rocas

— Las calizas micríticas estudiadas, rocas porosas ($n_0 \approx 10\%$) y de pequeño tamaño de acceso de poro ($r \approx 0.015 \mu m$), presentan una absorción rápida muy importante, cambio brusco de pendiente y absorción lenta muy pequeña. Comparando los coeficientes obtenidos en los diferentes ensayos (fig. 12), puede además señalarse:

- La absorción libre de agua y la de vapor de agua no guardan buena relación entre sí. Sin duda, esto es debido a que ambos procesos dependen de distintos parámetros petrográficos: sistema poroso y contenido en arcillas, respectivamente.

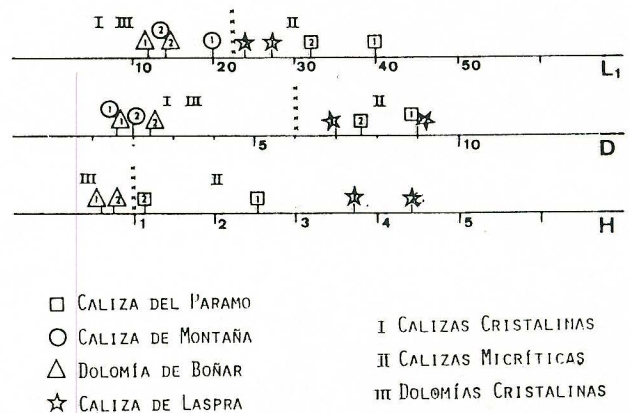


Figura 12.—Comparación de los coeficientes de saturación obtenidos —L₁, D, H— en los diferentes ensayos de absorción de agua —libre, capilar e higroscópica, respectivamente—, para los distintos tipos rocosos considerados. En todos los casos las calizas micríticas son las que presentan los valores más elevados.

- La succión capilar presenta un comportamiento intermedio, respecto a la absorción de agua líquida y de vapor de agua. En consecuencia, dicho fenómeno parece relacionado tanto con el sistema poroso como con la fracción arcillosa.

- Los macroporos apenas intervienen en la toma de agua por las rocas, rebajando su grado de saturación.
- La expansión hídrica muestra un notable retardo respecto a la absorción libre de agua, y se mantiene con el mismo ritmo dentro ya de etapas de absorción lenta. Dicha absorción por tanto es atribuida a la toma de agua por las arcillas.

— Las dolomías cristalinas estudiadas, rocas porosas ($n_0 \approx 15\%$) y de elevado tamaño de acceso de poro ($r \approx 1 \mu\text{m}$), responden al mismo comportamiento, si bien mucho menos acentuado: absorción rápida menor y absorción lenta más acusada.

— Las calizas cristalinas estudiadas, rocas de muy baja porosidad ($n_0 = 0.6\%$), presentan una absorción de agua, más gradual, siendo difícil la diferenciación de capas; en particular, la succión capilar se mantiene lineal frente a \sqrt{t} durante más de dos meses.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica (Proyectos núms. 4446/79 y 2573/83), y a la Fundación Ramón Areces (Proyecto: «Evaluación del estado de alteración y alterabilidad de los materiales rocosos de las Catedrales de León y Sevilla»).

BIBLIOGRAFIA

- ALONSO, F. J. (1986): *Caracterización petrofísica y alterabilidad de calizas y dolomías*. Tesis Doctoral, Dpto. Petrología, Fac. de Geología. Univ. de Oviedo, 309 pp.
- ALONSO, F. J.; ESBERT, R. M., y ORDAZ, J. (1987): *Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías*. Bol. Geológico y Minero, 98-II, pp. 226-237.
- A. S. T. M.: *Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of natural building stone*. 1978 Anual Book of A. S. T. M. Standards, Parte 19, norma C 97-47, pp. 1-3.
- BELIKOV, B. P.; ZALESSKII, B. V.; ROZANOV, Y. A.; SANINA, E. A., y TIMCHENKO, I. P. (1967): *Methods of studying the physico-mechanical properties of rocks*. En: Physical and mechanical properties of rocks, B. V. Zaleskii (Ed.), Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, pp. 1-58.
- CASTRO, E. DE (1978): *Les méthodes de suction dans l'étude de l'altération des pierres*. Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 2, 26 pp.
- C. N. R. I. C. R. (Centro di studio cause di diperimento e metodi de conserzazione delle opere d'Arte. Istituto Centrale del Restauro) (1981): *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizioni*. Doc. Normal: 7/81, Roma, 5 pp.
- C. N. R. I. C. R. (1983): *Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare*. Doc. Normal: 11/82, Roma, 6 pp.
- DUNCAN, N. (1969): *Engineering geology and rock mechanics*. Leonard Hill, London, 252 pp.
- GERARD, R. (1978): *Trois méthodes d'essai de gélimité récemment normalisées en Belgique*. Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 3, 2, 18 pp.
- GREGG, S. J., y SING, K. S. W. (1982): *Adsorption, surface area and porosity*. Academic Press, London, 300 pp.
- GRIM, R. E. (1968): *Clay Mineralogy*. Mc Graw-Hill Book Company, 596 pp.
- I. S. R. M. (1979): *Suggested methods for determining: Water content, porosity, density, absorption and related properties, Swelling and slake-durability index properties*. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 16 (2), pp. 143-156.
- KALIMERIS, N., y HALL, C. (1983): *Absorption and desorption of porous building materials*. En: Materials Science and Restoration, F. H. Wittman (Ed.), Proc. Int. Coll., Edition Lack and Chemie, pp. 57-66.
- KEULER, J. VAN (1973): *Density of porous solids*. Matériaux et Constructions, Bull. RILEM, 6 (33), pp. 181-183.
- LEARY, E. (1981): *A preliminary assessment of capillarity tests as indicators of the durability of British limestones*. En: The Conservation of Stone II, R. Rossi-Manaresi (Ed.), Proc. of the Int. Symp., Bologna, pp. 73-90.
- MAMILLAN, M. (1981): *Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs*. En: The Conservation of Stone II, R. Rossi-Manaresi (Ed.), Proc. of the Int. Symp., Bologna, pp. 59-72.
- ORDAZ, J. (1978): *Sobre el hinchamiento en algunas rocas blandas*. Memorias del Simposio Nacional sobre Rocas Blandas, Madrid, vol. 1 (A-5), 5 pp.
- R. I. L. E. M. (1980): *Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement*. Matériaux et Constructions, Bull. RILEM, 13 (75), pp. 216-220.
- SPOONER, D. C. (1983): *The practical relevance of mechanisms of water vapour transport in porous building materials*. En: Autoclaved aerated concrete; moisture and properties, F. H. Wittmann (Ed.), Elsevier Sci. Pub., pp. 27-41.

- STAMBOLOV, T., y VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J. (1976): *The deterioration and conservation of porous building materials in monuments: A review of the literature*. Int. Cent. for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, ICCROM, Roma, 86 pp.
- TADA, S., y NAKANO, S. (1983): *Microstructural approach to properties of moist cellular concrete*. En: *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*, F. H. Wittmann (Ed.), Elsevier Sci. Pub., pp. 71-88.
- TORRACA, G. (1982): *Porous building materials: Materials science for architectural conservation*. Int. Cent. for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, ICCROM, Roma, 141 pp.
- Vos, B. H. (1976): *Waterabsorption and drying of materials*. En: *The Conservation of Stone I*, R. Rossi-Manaresi (Ed.), Proc. of Int. Symp., Bologna, pp. 679-694.
- Vos, B. H. (1978): *Hygric methods for the determination of the behaviour of stones*. Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris, 3.8, 19 pp.

Recibido: Febrero de 1987.