

Metodología aplicable al estudio de la alteración de rocas graníticas usadas en la construcción

Methodology for the study of weathering of granitic building stone

SILVA, B.; RIVAS, T.; PRIETO, B.; MARTINEZ, A.

En este trabajo se presentan los resultados de los análisis realizados sobre un sillar granítico extraído del Claustro de San Martín Pinario (Santiago de Compostela). La oportunidad de disponer de esta muestra nos ha permitido realizar una serie de determinaciones que no siempre es posible llevar a cabo en los monumentos. Además del análisis desde el punto de vista petrográfico-mineralógico y geoquímico, se han determinado varias propiedades físicas. Por una parte, aquellas que condicionan el movimiento del agua a través de la roca, como la porosidad accesible al agua, grados de absorción y saturación y coeficiente de capilaridad, y por otra, aquellas que definen la resistencia mecánica del material a la compresión y flexotracción. También se han determinado los coeficientes de dilatación térmica y por hinchamiento.

Estas propiedades son fundamentalmente para caracterizar una roca como material de construcción y pueden dar la clave de su comportamiento frente a diversos mecanismos de alteración.

Palabras clave: Alteración, granito, edificios monumentales.

We report the results of analyses of a granite ashlar extracted during a restoration work from the cloister of the Monastery of San Martín Pinario (Santiago de Compostela, Spain). Petrographic, mineralogical and geochemical analyses were supplemented by determination of physical properties governing water transport in the stone (open porosity, degree of absorption and saturation, and capillary coefficient), compressive and bending strength and thermal dilation coefficient and swelling coefficient. These fundamental characteristics of building stone may throw light on its response to diverse weathering mechanisms.

Key words: Weathering, granite, monumental buildings.

INTRODUCCION

Una dificultad importante en el estudio de la alteración de monumentos suele ser la limitación de la toma de muestras, de modo que casi siempre la caracterización de los materiales se realiza por observación visual o a partir de pequeñas muestras, poco representativas.

La oportunidad de disponer de un sillar granítico, extraído de uno de los Claustros de San Martín Pinario (Santiago de Compostela), donde existe un proceso de desplazación importante, nos ha brindado la posibilidad de realizar sobre la roca una serie de ensayos y determinaciones que pocas veces se pueden llevar a cabo en los monumentos.

Se trata de estimar el papel que juegan las propiedades intrínsecas de la roca en el proceso de deterioro y al mismo tiempo comprobar qué determinaciones suministran más información y de este modo establecer una metodología de análisis para este tipo de trabajos.

MATERIAL Y METODOS

En el muro orientado al Norte del Claustro de la Portería se ha extraído un sillar de granito perteneciente a la segunda hilada, a una altura sobre el suelo de 38 cm. El paramento presenta un importante proceso de desplazación; por las dimensiones y

características de las separaciones superficiales, ésta se designan como plaquetas (DELGADO RODRIGUES, 1991).

En tres lugares de dicho sillar (A, B, C) se tomaron muestras de plaquetas y de tres niveles sucesivos en profundidad por debajo de ellas (Fig. 1). Las plaquetas se separaron con una espátula y las muestras más profundas mediante cincel y martillo.

De la zona interna del sillar (Zona D, Fig. 1) se recogió una muestra (RS1) y se cortaron probetas para la determinación de las propiedades físicas.

Sobre las muestras descritas anteriormente se realizaron las siguientes determinaciones y ensayos:

1. *Estudio al microscopio petrográfico* de láminas delgadas, preparadas a partir de muestras de la zona D, de plaquetas y de cortes realizados perpendicularmente a la superficie. Algunas de estas muestras se prepararon adicionando a la resina consolidante un colorante fluorescente (Rodamina B).

2. *Composición mineralógica por difracción de RX*. Esta determinación se ha hecho en muestras totales y en muestras en las que se concentraron los productos de alteración, realizando una molienda suave y una dispersión con amoníaco de las fracciones finas (DELGADO RODRIGUES, 1976).

3. *Análisis químico total*. Se han determinado los elementos mayoritarios de las

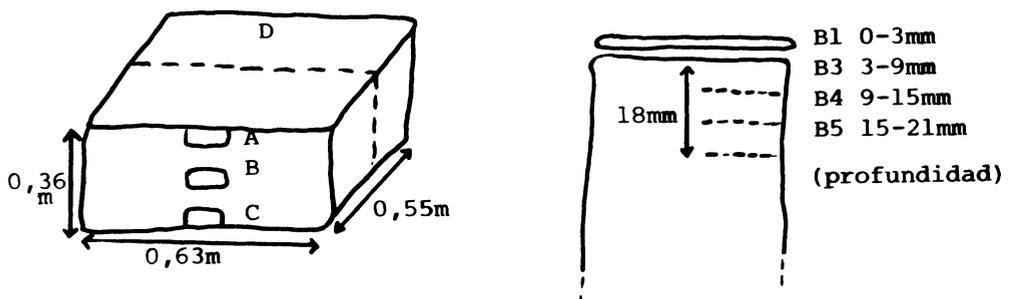


Fig. 1. Esquema del sillar donde se señala el muestreo realizado.

muestras RS1, B1, B3, tras la fusión con carbonato sódico y disolución con ácido fluorhídrico. La sílice se determinó por volatilización y el resto de los elementos por espectrometría de absorción y emisión atómica.

4. *Determinación del contenido de sales solubles en agua*, a partir de extractos obtenidos por la agitación de un gramo de muestra molida en 100 ml. de agua químicamente pura, durante 2 horas y posterior filtración. Los aniones SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- , se determinaron por cromatografía iónica y los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+ , por absorción atómica.

5. *Estudio del comportamiento hídrico y determinación de las propiedades físicas de la roca*. Se realizaron siguiendo las normas de la RILEM (UNESCO-RILEM, 1978), y del CNR-ICR (CNR-ICR, 1981, 1982), utilizando para todos los ensayos un número de ocho probetas cúbicas de 5 cm. de arista, para así poder calcular una media estadística.

Los parámetros medidos y las propiedades hídricas ensayadas son los siguientes:

—*Densidades real y aparente* de muestras tomadas en la zona D y de plaquetas. Se determinaron por el método de la pesada hidrostática tras saturación de agua al vacío de las probetas.

—*Determinación de la porosidad accesible al agua*, calculada a partir de los parámetros anteriores.

—*Absorción libre de agua*. Este ensayo consiste en la inmersión total en agua destilada de las probetas secas a peso constante. A intervalos de tiempo determinados se realizan pesadas de cada probeta obteniéndose así el incremento de peso.

—*Ensayo de capilaridad*. Las probetas se sumergen en agua hasta una altura de 0,5 cm., obteniéndose el incremento de peso hasta la saturación. El coeficiente de capilaridad obtenido expresa el incremento de peso por unidad de superficie frente al

tiempo. Se determinó el coeficiente en varios sentidos.

6. *Resistencia a la flexotracción y compresión* (UNE 80-101).

7. *Coficiente de dilatación térmica a 60° y por hinchamiento en H_2O a 20°C*. La dilatación se mide mediante dos dilatómetros situados en ambos extremos de las probetas mientras éstas son sometidas a ciclos de saturación en agua y secado a 60°C.

Estas últimas determinaciones (6 y 7) se han hecho sobre probetas de dimensiones $4 \times 4 \times 16$ cm. cortadas en dos sentidos diferentes con relación al paramento del sillar.

RESULTADOS

1. Caracterización del material

El material del sillar es un granito adaméllítico de textura granuda a hipidiomorfa, con fenocristales incluidos en una matriz cuarzosa. Presenta orientaciones de fluidez y abundantes restos de antiguas estructuras.

A nivel macroscópico se observan separaciones o segregaciones de oxihidróxidos de Fe que dan lugar manchas y bandeados irregulares y a una pátina superficial bastante generalizada, que confiere a la piedra una coloración amarillenta.

Presenta también una cierta anisotropía, marcada fundamentalmente por los cristales de biotita, que tienden a disponerse con los planos 001 perpendicularmente al paramento.

El análisis petrográfico realizado sobre muestras del interior del sillar, dio la siguiente composición modal:

Cuarzo	49 %
Plagioclasa	12 %
Feldespato potásico	9 %
Moscovita	16 %

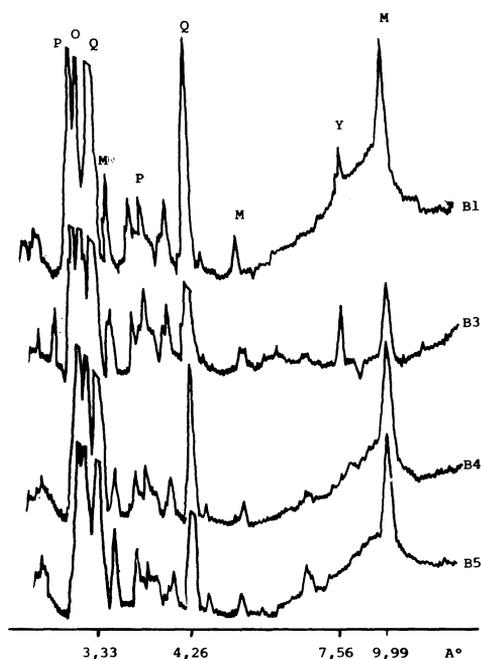


Fig. 2. Difractogramas de Rayos X de las muestras tomadas en el sillar a diferentes profundidades. (Véase Fig. 1).
Q: Cuarzo; P: Plagioclasa; M: Micas; O: Ortosa; Y: Yeso.

Biotita-Clorita	12 %
Accesorios (Apatito, Circón)	2 %

El cuarzo está presente como cristales alotriomorfos, con sombras de presión relacionadas con procesos tectónicos. Los fenocristales de plagioclasa, parcialmente sericitizados, se presentan maclados y con inclusiones de cuarzo y moscovita. El feldespato potásico es fundamentalmente microclina observándose la típica macla en enrejado. La moscovita se presenta en crisales tabulares bien definidos. Los cristales de biotita presentan un color fuertemente rojizo y están parcialmente cloritizadas. En ocasiones presenta roturas y plegamientos, posiblemente de origen tectónico. El apatito se observa en secciones tabulares y basales.

2. Estudio de la alteración

Resultados de la difracción de RX

En los difractogramas de las plaquetas y de los fragmentos de la zona interior del bloque (Fig. 2), se identifican únicamente los minerales constituyentes del granito. No se detectan los característicos productos de alteración de esta roca (caolinita, gibbsita), ni siquiera realizando una concentración de las fracciones finas mediante molienda suave.

Tampoco aparece ningún efecto propio de los oxihidróxidos de Fe. Las segregaciones amarillo-rojizas que recubren los huecos de la roca y que le confieren el color característico probablemente son formas de hierro no cristalinas o microcristalinas, con una enorme capacidad de cubrición y coloración.

Es destacable la presencia de yeso en los difractogramas correspondientes a las muestras de plaquetas.

Resultados del análisis químico total

Los datos obtenidos en los tres niveles en profundidad y en la muestra del interior del sillar son prácticamente idénticos (Tabla 1). No se observa pérdida de los elementos constituyentes más móviles ni, por consiguiente, enriquecimiento en los elementos del sistema residual, es decir, desde el punto de vista geoquímico el grado de alteración es similar en la plaqueta y en la zona interna del sillar.

El ligero incremento de Ca parece ser de origen alóctono y se relaciona con el yeso identificado por difracción de RX.

Resultados de la extracción de sales

En las muestras tomadas a diferente profundidad en el sillar, se observa un incremento de iones en los niveles superficiales,

TABLA 1. Resultados del análisis químico total (%).

	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
B1	5.5	2.8	0.3	1.2	2.0	17.3	69.1	3.1
B3	5.6	3.0	0.3	1.9	2.0	16.0	68.0	3.2
B5	5.4	2.9	0.6	0.9	1.9	16.1	69.8	2.3
RS1	5.1	2.0	0.3	0.9	2.3	16.3	70.4	2.2

de los cuales el Ca⁺⁺ y el SO₄⁻² son mayoritarios, guardando buena correlación entre ellos (Fig. 3). De estos datos se deduce que el yeso es la sal que tiene más probabilidad de cristalizar, de acuerdo con los resultados de la difracción de rayos X.

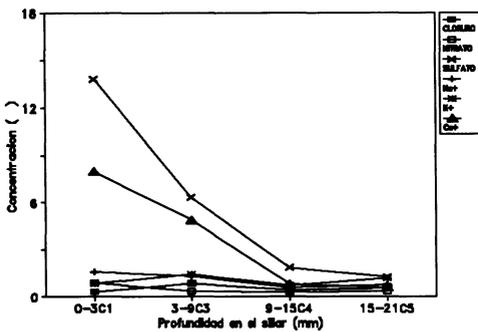


Fig. 3. Resultados de la extracción de sales solubles de muestras tomadas en profundidad, en la zona C del sillar.

Estudio petrográfico

El estudio en lámina delgada de las muestras de la zona interna del sillar y de las preparaciones realizadas a partir de cortes perpendiculares a la superficie, revela que la alteración mineralógica es poco significativa. Los únicos síntomas de meteorización observados son: ligero anubarramiento o picoteado de la plagioclasa y decoloración y apertura de los paquetes de la biotita, así como una segregación y movilización de

oxihidróxidos de Fe a partir de este mineral, que pasan a tapizar las paredes de las fisuras. Todo esto se observa en la misma cuantía tanto en las muestras internas como en las superficiales.

Lo más destacable es la intensa red de fisuración que presenta la roca, tanto intra como inter y transgranular. La observación por microscopía de fluorescencia ayuda sobremanera a visualizar los huecos, poniéndose de manifiesto los diferentes patrones de fisuración de los minerales: los cristales de feldespato potásico se encuentran atravesados por una nítida red de fisuras intragranulares, siguiendo los planos de exfoliación (Foto 1), mientras que los cristales de plagioclasa muestran un denso entramado de microfisuras, principalmente en los núcleos (Foto 2). El cuarzo presenta fisuración sobre todo intergranular, separando los granos individuales que forman los agregados policristalinos (Foto 2). El modelo que afecta a los cristales de moscovita y biotita, es intra-granular, aprovechando los planos de exfoliación (Foto 2).

Un hecho interesante que se observa es que son las micas las que determinan en gran medida la dirección de las fisuras transgranulares (Foto 3).

En las láminas delgadas de los cortes perpendiculares a la superficie, se puede apreciar un importante incremento de la fisuración, especialmente de las fisuras transgranulares. Aparecen verdaderas fracturas (superficies de no adherencia que dividen al cuerpo considerado en dos partes distintas; DELGADO RODRIGUES, 1983) paralelas entre sí y a la superficie del sillar, que son

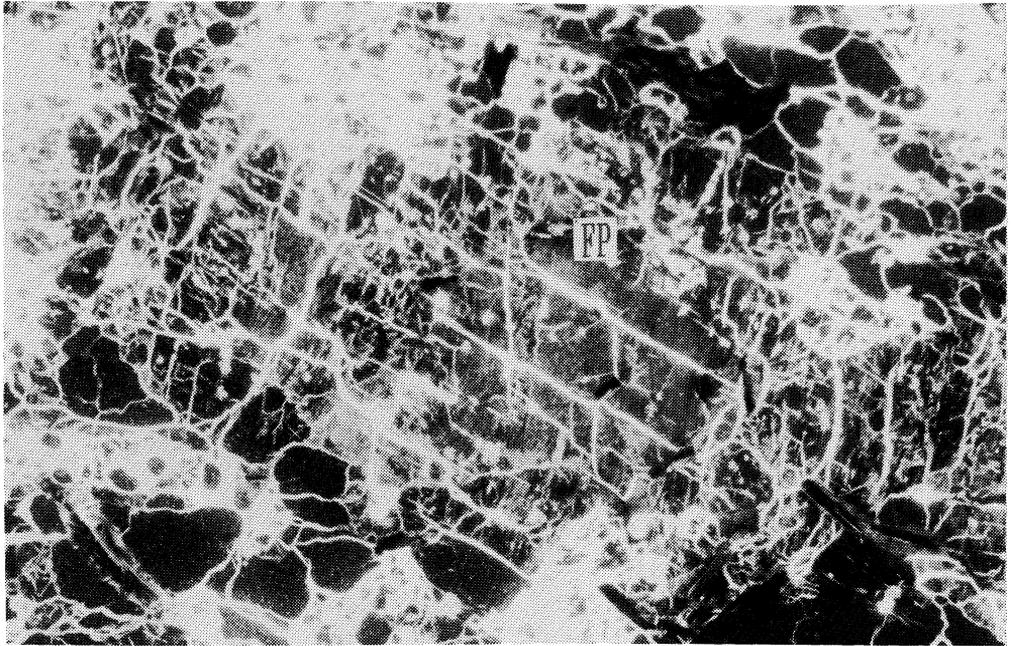


FOTO 1. Microfotografía de fluorescencia de un grano de feldespato potásico que presenta una densa red de fisuración intragranular siguiendo los planos de exfoliación. x40.

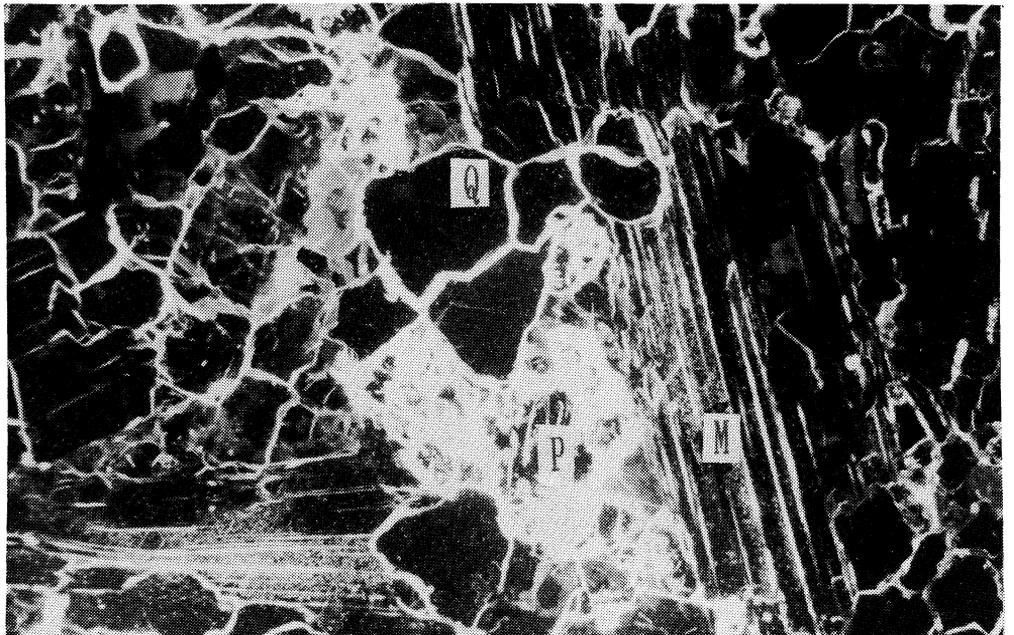


FOTO 2. Microfotografía de fluorescencia donde se observan los diferentes modelos de fisuración que afectan a los minerales. Q: Cuarzo; P: Plagioclasa; M: Micas. x40.

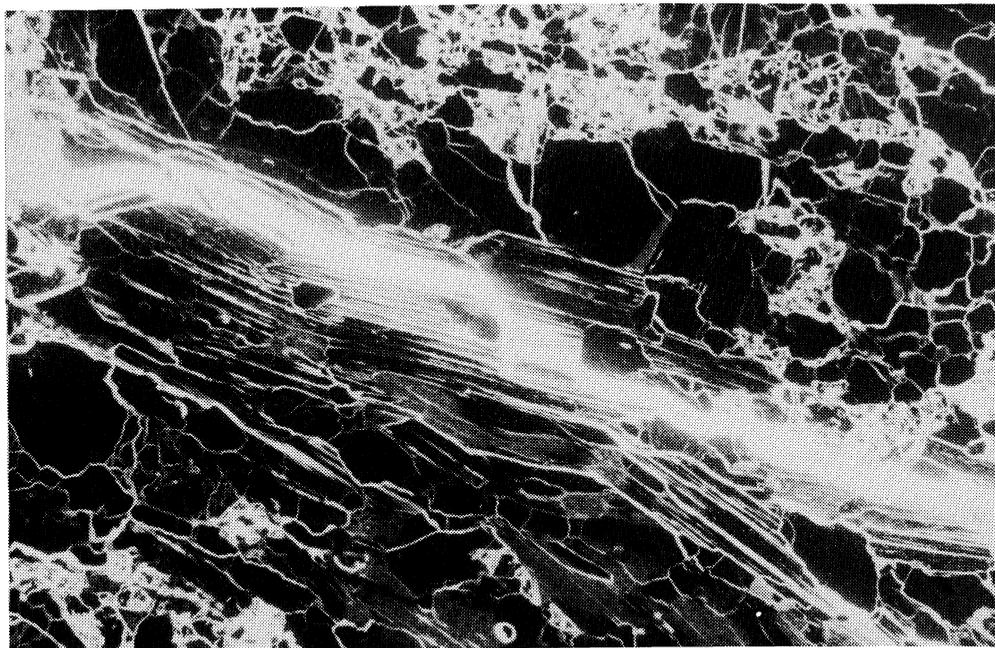


FOTO 3. Las micas determinan la dirección de la fisuración transgranular, que aprovecha los planos de exfoliación en su recorrido. x40.

las que dan lugar a la separación de las plaquetas. Es de destacar que aunque la mayor parte de las fisuras tienen tendencia a seguir la dirección aproximadamente marcada por las micas, no siempre es así. De hecho se observan fracturaciones de las micas perpendicularmente a sus planos de exfoliación (Foto 4). Así pues, la separación de las plaquetas no está únicamente determinada por la anisotropía de la roca.

Este elevado grado de fisuración y fracturación de la zona superficial, se refleja en los datos de densidad y porosidad accesible al agua, obtenidos en muestras de plaquetas.

Entre la plaqueta y el material inmediatamente inferior a ella se pueden observar la cristalización del yeso. El yeso se presenta como cristales de hábito acicular que crecen sobre ambas superficies de fractura. Este hecho es más evidente en las zonas del sillar donde la plaqueta está casi o totalmente desprendida.

3. Caracterización física

La roca presenta una porosidad accesible muy elevada en comparación con rocas graníticas sanas y no fisuradas (Tabla 2). Esta porosidad se refleja en el contenido de agua absorbido, que es muy significativo, y que junto a la rapidez con que se alcanza la saturación en el ensayo de absorción libre (7 horas después de comenzado el ensayo) indican un importante grado de alteración desde el punto de vista físico.

El grado de saturación que alcanza el material en condiciones de presión ambiental es prácticamente el mismo que bajo vacío (Fig. 4), lo que indica una alta permeabilidad a los fluidos y por tanto una buena comunicación de los espacios vacíos, característica propia de los materiales graníticos, donde los huecos son predominantemente tipo fisura.

El coeficiente de capilaridad obtenido es

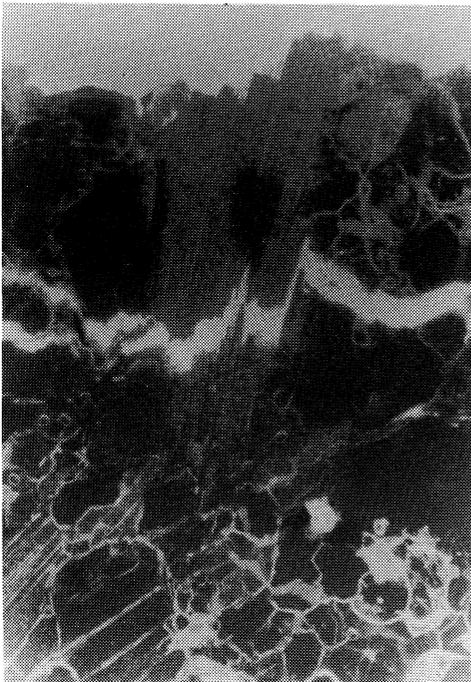


FOTO 4. Microfotografía de fluorescencia de un corte perpendicular a la superficie con desarrollo de plaquetas. La fracturación se produce también perpendicularmente a los planos de exfoliación de la mica. x40.

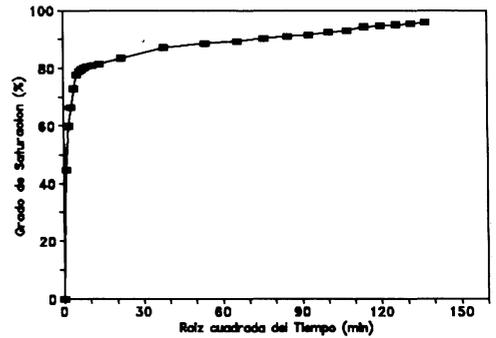


Fig. 4. Grado de saturación alcanzado frente al tiempo en el ensayo de absorción libre.

bajo (Tabla 3) y coincide con valores dados para este tipo de materiales.

Los ensayos de compresión y flexotracción (Tabla 3) muestran valores de resistencia claramente influidos por la anisotropía de la roca. Los valores más altos en compresión se obtienen cuando los esfuerzos son paralelos a la orientación de las micas y en flexotracción, cuando el esfuerzo se realiza perpendicularmente a aquella. En ambos

TABLA 2. Propiedades físicas de la roca

	DA	DR	PA	WS
INTERIOR	2.50	2.62	4.61	1.84
PLAQUETA	2.13	2.47	6.57	n.d.

DA: Densidad aparente (g/cm^3)

DR: Densidad real (g/cm^3)

PA: Porosidad accesible (%)

WS: Contenido de agua en saturación (%)

casos, la resistencia es menor que los valores dados para rocas graníticas sanas (WINKLER, 1975).

Dado que la resistencia mecánica está en relación directa con la porosidad de las rocas, se confirma la existencia de una anisotro-

pía fisural, relacionada con la orientación de las micas.

En el ensayo de dilatación térmica (Tabla 3) se observa que el valor del coeficiente es sensiblemente superior cuando el incremento se mide en la misma dirección que

TABLA 3. Resultados de los ensayos de capilaridad, resistencia mecánica y dilatación térmica y por hinchamiento.

ORIENTACION DE LOS PLANOS 001		
		
CAPILARIDAD (Kg/cm ² . sg ^{1/2})	0,020	0,024
DILATACION TERMICA (m/m . °C)	8,69 . 10 ⁻⁶	6,44 . 10 ⁻⁶
HINCHAMIENTO (m/m)	1,3 . 10 ⁻⁴	2,8 . 10 ⁻⁴
COMPRESION (Kg/cm ²)	1062	850
FLEXOTRACCION (Kg/cm ²)	50	85

siguen, de forma aproximada, los planos 001 de las micas. En el ensayo de hinchamiento, por el contrario, se observa que el incremento mayor se produce perpendicularmente a la orientación de los paquetes micáceos.

El hecho de que la dilatación térmica sea mayor paralelamente a las micas que perpendicularmente a ellas, puede ser debido a que en esta última dirección, la dilatación de los granos individuales queda más amortiguada por los huecos, especialmente por las fisuras transgranulares que, como hemos dicho anteriormente, siguen con preferencia la dirección paralela a las micas.

En cuanto al coeficiente de hinchamiento, a falta de minerales hinchables y de una cantidad apreciable de arcilla, es difícil aventurar una explicación. El hecho de que sea una propiedad anisótropa indica que puede estar relacionada con los productos de alteración de las micas.

CONCLUSIONES

Los análisis químicos totales realizados sobre el sillar indican que desde el punto de vista geoquímico, la roca presenta el mismo grado de alteración, en todo caso muy débil, entre el nivel más superficial y el más profundo.

En este sentido, los índices habitualmente usados en el estudio de la alteración, basados en balances geoquímicos, no son válidos para expresar los procesos de alteración ocurridos en los monumentos.

En lo que se refiere a las transformaciones de los minerales, sucede lo mismo, de modo que el estudio mineralógico tanto por difracción de RX como por la observación de las láminas delgadas ha resultado también muy poco discriminatorio.

Las propiedades físicas son las que mejor reflejan el deterioro: elevada porosidad accesible al agua, baja resistencia mecánica,

alta capacidad de absorción de agua, etc., son síntomas de una alteración importante.

El estudio en lámina delgada resulta útil para la observación de la red fisural y en este sentido es de gran ayuda la aplicación de la microscopía de fluorescencia. Se puede observar cómo el número y tamaño de las fisuras se incrementa considerablemente en los primeros centímetros superficiales.

La anisotropía en esta roca tiene mucha más importancia de lo que una simple observación visual haría pensar. Se pone de manifiesto en todas las propiedades direccionales: capilaridad, resistencia a la flexotracción y a la compresión, dilatación térmica o por hinchamiento.

Sin embargo, aunque la anisotropía no es directamente el factor determinante de la formación de las plaquetas (las separaciones superficiales no se forman por un mecanismo de exfoliación), indirectamente puede jugar un papel fundamental a través de su influencia en la ascensión capilar, dilatación

térmica o hinchamiento o condicionando el comportamiento de la piedra frente a la movilización y cristalización de sales solubles.

Puesto que las propiedades físicas son las que mejor reflejan la alteración de la roca y dado que para su determinación se necesita una considerable cantidad de muestra, que prácticamente nunca se puede tomar en el monumento, consideramos de gran interés en este tipo de estudios, localizar la cantera de procedencia del material de construcción, y sobre muestras tomadas en ella, determinar el comportamiento hídrico y mecánico de la roca.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la C.E.E. a través del Proyecto STEP CT90-0110.

BIBLIOGRAFIA

- CNR-ICR, (1981). Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità d'imbibizione. Doc. Normal 7/81. 5 pág. Roma, 1981.
- CNR-ICR, (1982). Assorbimento d'acqua per capillarità. Coeficiente d'assorbimento capillare. Doc. Normal 11/82. 6 pág. Roma, 1982.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1976). Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay. *Proceedings 2nd Int. Symp. The Deterioration of Building Stones*. 252-270 pág. Athens, 1976.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1991). Proposal for a terminology of stone decay forms on monuments. News Letter. Group Petrography of the ICOMOS Stone Committee 1/91: 2-4. Lisboa, 1991.
- UNESCO-RILEM, (1978). Masses volumiques réelle et apparente. *Essai* n.º I.2. Paris, 1978.
- UNE 80-101 (1988). Determinación de resistencias mecánicas. 24 pág. Asociación española de normalización y certificación. Madrid, 1988.
- WINKLER, E. M. (1975). Stone: Properties, durability in man's environment. 2nd. Ed. *Springer-Verlag*. Wien. New. 230 pág.

Recibido, 1-VI-1993
Aceptado, 15-VIII-1993