

Factores intrínsecos que condicionan el comportamiento físico y la alterabilidad de las areniscas miocénicas utilizadas en la construcción del acueducto romano de Zaghouan-Cartago (Túnez)

Intrinsic factors determining the physical behaviour and durability of the Miocene sandstones used to build the Zaghouan-Carthage aqueduct (Tunis)

K. ZOGLAMI^{*}, D. GÓMEZ-GRAS^{*}, A. ÁLVAREZ^{*}, M. P. DE LUXÁN^{**}

^{*} Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona

^{**} Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)

Persona de contacto/Corresponding author: david.gomez@uab.es

Fecha de recepción: 15-XII-03

Fecha de aceptación: 3-III-04

ESPAÑA

RESUMEN

En este trabajo se estudia la relación entre los factores intrínsecos, el comportamiento físico y la alterabilidad de la arenisca miocénica utilizada en el Patrimonio Monumental de Túnez, en concreto, en el acueducto romano de Zaghouan-Cartago.

A partir del estudio petrográfico detallado de la roca se ha caracterizado el sistema poroso mediante microscopía y porosimetría de mercurio. También se ha caracterizado su comportamiento hídrico (absorción al vacío, desorción, capilaridad, permeabilidad al vapor de agua), se ha determinado su comportamiento mecánico (resistencia a compresión, resistencia al desgaste por rozamiento) y su durabilidad mediante ensayos acelerados de cristalización de sales (sulfato de sodio). Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento hídrico debido al carácter macroporoso de la roca y a la buena comunicabilidad de su red porosa. La roca se caracteriza por una muy baja resistencia mecánica debida a su escasa litificación, lo que la hace muy vulnerable a la acción de las sales. Como la roca no contiene minerales químicamente inestables, su resistencia a la alteración química es muy alta. Por otro lado, se puede afirmar que la durabilidad del material está directamente condicionada por la presencia o ausencia de sales en el monumento.

PALABRAS CLAVE: arenisca, características petrofísicas, alterabilidad, acueducto Zaghouan-Cartago.

SUMMARY

The present paper addresses the relationship between the intrinsic factors, physical behaviour and durability of Miocene Age sandstone used to build Tunisian Heritage Monuments, and more specifically the Zaghouan-Carthage aqueduct.

A petrographic study (optical microscopy and mercury intrusion porosimetry) was conducted to characterise the porous system of the rock. Stone hydric behaviour was also determined by finding vacuum saturation, desorption, capillary and water vapour transmission. Finally, mechanical strength (compressive strength, abrasion resistance) and durability (via accelerated sodium sulfate crystallisation ageing) were also found. The results obtained were indicative of good hydric performance due to the macroporous nature of the stone and the connectivity of its porous system. This rock was also found to have very low mechanical strength due to its scant lithification, making it particularly susceptible to salt weathering. It was also observed to be highly resistant to chemical alteration, given the absence of chemically unstable minerals in its composition. The durability of the material was consequently found to depend directly on the presence or absence of salts in the monument.

KEYWORDS: sandstone, petrographic characteristics, durability, Zaghouan-Carthage aqueduct.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se centra en el estudio de una roca arenisca que aflora en la zona nororiental de Túnez y que pertenece a la formación Fortuna (Oligoceno superior-Mioceno inferior) y más concretamente a sus facies continentales fluviales que son de edad Aquitaniense-Burdigaliense (1).

El interés del estudio de esta roca se debe a su uso histórico frecuente en el Patrimonio Monumental de Túnez (como es el caso del acueducto Zaghouan-Cartago y la ciudad romana de Uthina) y, además, por su posible utilización en obras de intervención o de restauración de estos monumentos. El acueducto de Cartago tiene unos 132 km de longitud y representa la obra romana más importante de toda África y el acueducto de mayores dimensiones de todo el imperio romano. A lo largo de su recorrido hay 17 km de construcciones aéreas, la mayor parte de las cuales se encuentran en el valle del río Miliane (2) y (3). Esta parte aérea presenta un estado crítico de deterioro que hace necesaria su intervención inmediata. Este deterioro es fundamentalmente de tipo estructural (problemas de inestabilidad y presencia de fisuras y fracturas), junto con una ligera arenización de la piedra. Ésta es la razón principal que ha motivado el planteamiento de esta investigación sobre el comportamiento y la durabilidad de la roca constructiva del acueducto, cuyos resultados permitirán establecer criterios de selección de las areniscas a utilizar en la reparación de los monumentos tunecinos construidos con esta piedra y, concretamente, del acueducto de Zaghouan-Cartago.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio petrográfico y del sistema poroso se ha realizado mediante técnicas de microscopía óptica y porosimetría de mercurio. Los ensayos de comportamiento hídrico, de hinchamiento, de cristalización de sales y la determinación de la densidad, de las propiedades mecánicas y de la abrasión se han basado en métodos descritos en las recomendaciones RILEM (4) y NORMAL (5) (6) y (7) y en las normas UNE (8) y (9).

2.1. Estudio petrográfico

Por su composición, la arenisca es una cuarzo-arenita, no cementada y litificada por compactación, que está compuesta principalmente de cuarzo (69-84%), feldespato, esencialmente ortosa (0-1,1%), con una porosidad de 17-25% y una matriz de 0-11%, representada por arcillas infiltradas de tipo interestratificado illita-smectita y caolinita. El estudio petrográfico de la variedad de areniscas muestreadas en el campo ha permitido diferenciar 4 litotipos diferentes:

1. INTRODUCTION AND AIM OF THE STUDY

The present study focuses on the Fortuna formation sandstone (Upper Oligocene-Lower Miocene) outcropping in North-eastern Tunisia and specifically on its Aquitanian-Burdigalian Age fluvial-continental facies (1).

The relevance of this type of rock lies in its frequent use in Tunisian Heritage Monuments (such as the Zaghouan-Carthage aqueduct or the Roman city of Uthina) and its potential use in restoration or rehabilitation works. About 132 km long, the Carthage aqueduct was the largest ever built in the Roman Empire and the most ambitious Roman structure in Africa. It includes 17 km of above-grade construction, most of which is in the Oued Miliane Valley (2) (3). Due primarily to structural failure (instability, cracking) and some slight disintegration of the rock, this part of the aqueduct is in a critical state of decay, necessitating immediate action. The present research on the behaviour and durability of the sandstone used to build the aqueduct was driven primarily by the need to establish the criteria for selecting the most suitable building stone for restoring Tunisian monuments, particularly the Zaghouan-Carthage aqueduct.

2. RESULTS AND DISCUSSION

Optical microscopy and mercury intrusion porosimetry were the methods used to study the petrography and porous system of the sandstone. Hydric, swelling and salt crystallisation tests were conducted and density, mechanical properties and abrasion resistance were determined to RILEM (4) and NORMAL (5) (6) (7) recommendations and UNE standards (8) (9).

2.1. Petrographic study

The sandstone studied is a non-cemented, compaction-lithified quartz arenite containing quartz grains (69-84 %) and feldspars (mainly orthoclase; 0-1,1%), with porosity accounting for 17-25% of the volume and the matrix, consisting of infiltrated clay minerals (essentially mixed layers of illite-smectite and kaolinite), for 0-11%. Based on the results of the petrographic study of the sandstone samples taken in the field, four lithotypes can be distinguished:

- 1- Areniscas finas sin arcillas, con selección extremadamente buena a muy buena.
- 2- Areniscas finas con arcillas, con selección extremadamente buena a muy buena.
- 3- Areniscas de tamaño medio sin arcillas, con selección moderada.
- 4- Areniscas de tamaño medio con arcillas, con selección moderada.

Todas estas variedades pueden, a su vez, presentar laminaciones sedimentarias que implican la existencia de pequeños cambios granulométricos entre láminas (discontinuidades, anisotropías).

La determinación del grado de compactación de las areniscas, puesto que es el único mecanismo de litificación, se ha realizado restando el volumen intergranular inicial (VIG inicial) y final (VIG final). El VIG inicial, definido como el volumen anterior a la compactación de las areniscas ensayadas, se ha determinado utilizando los valores aportados por Beard y Weyl (10) para arenas no consolidadas de texturas similares a las de las areniscas estudiadas en este trabajo. Mediante un conteo sobre lámina delgada, según el método de Gazzi-Dickinson (11), se ha determinado el porcentaje de VIG final que poseen estas areniscas en la actualidad. Los resultados han mostrado que las areniscas finas están más compactadas que las gruesas, ya que el volumen intergranular perdido por compactación (VIG compactado) es superior. Esto se traduce en un mayor número de contactos entre granos en las finas que en las gruesas y en una mayor superficie de presión-disolución (Tabla 1 y Figura 1). Por tanto,

- 1- Clay-free, extremely to very well-sorted fine-grained sandstone.
- 2- Clay-containing, extremely to very well-sorted fine-grained sandstone.
- 3- Clay-free, moderately sorted medium-grained sandstone.
- 4- Clay-containing, moderately-sorted medium-grained sandstone.

All these lithotypes may contain sedimentary laminations, indicative of small inter-laminar changes in grain size and the resulting discontinuities or anisotropic properties.

The sole lithification mechanism at work in this rock, compaction, was determined by subtracting the final intergranular volume (final VIG) from the initial intergranular volume (initial VIG). The initial VIG, defined as the volume existing prior to compaction of the sandstones tested, was determined from the Beard and Weyl values (1973) (10) for non-consolidated sands with textures similar to the texture of the rocks analysed. The percentage of the final intergranular volume of the sandstone currently present in the rock was determined with the Gazzi-Dickinson thin section point-counting technique (11). The results showed the fine-grained sandstones to be more tightly compacted than the coarser rocks because of the greater intergranular volume compaction loss (compactated VIG) in the former. This translates into a larger number of inter-grain contacts and greater pressure dissolution area in the fine than in the coarse-grained sandstones (Table 1 and Figure 1). Therefore, well-sorted,

TABLA 1/TABLE 1

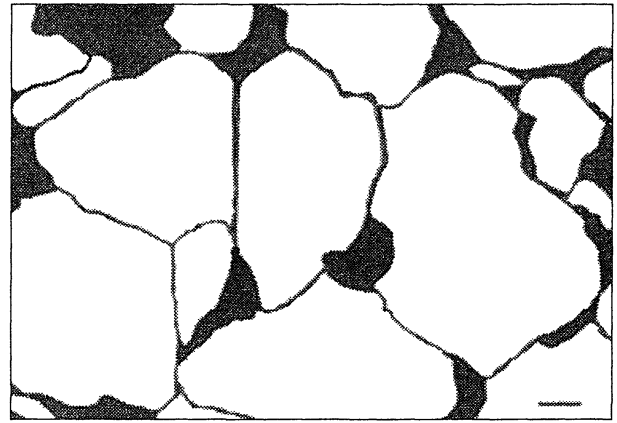
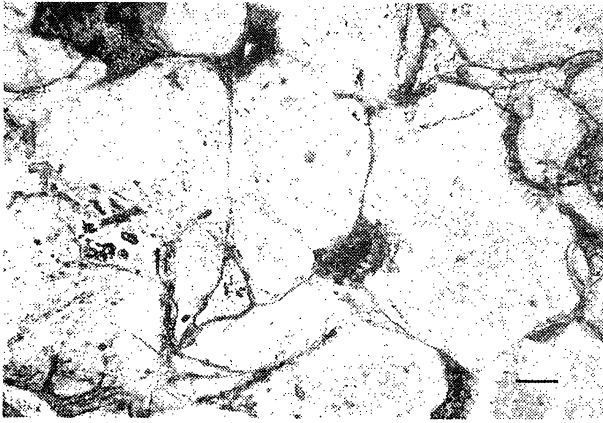
Tamaño de grano, compactación, litificación y resistencia mecánica
Grain size, compactness, lithification and mechanical strength

Muestra / Sample	MB9	MB12	MB14
Tamaño de grano medio / Mean grain size	Fino / Fine (0,210 mm)	Medio / Medium (0,420 mm)	Fino a medio / Fine - medium (0,210-0,420 mm)
Selección (So) / Sorting (So)	Extremadamente bien seleccionada (So 1,0-1,1) (*)	Moderadamente bien seleccionada (So 1,4-2,0) (**)	Muy bien seleccionada con cambios granulométricos (So 1,1-1,2) (***)
Superficies de presión-disolución <i>Pressure dissolution seams</i>	53,20	20,22	20,64
Número de contactos / Number of contacts	24	12	6
VIG inicial (%) / Initial VIG (%)	41,3	34,2	40,2-38,1
VIG Final (%) / Final VIG (%)	27,5	23,9	24,9
VIG Compactado (%) / Compactated VIG (%)	13,8	10,9	15,3-13,2
Resistencia a compresión (MPa) <i>Compressive strength (MPa)</i>	16,47	5,49	4,32

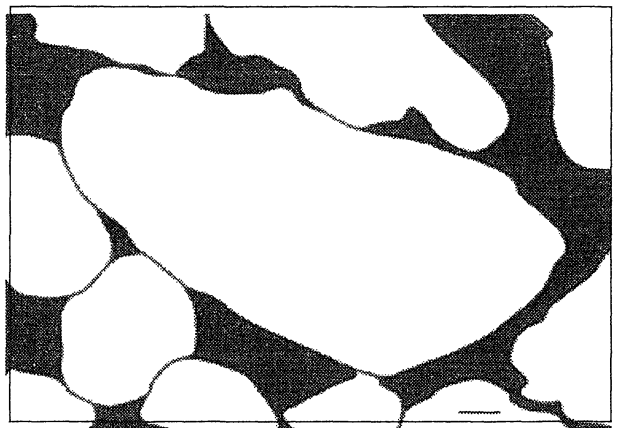
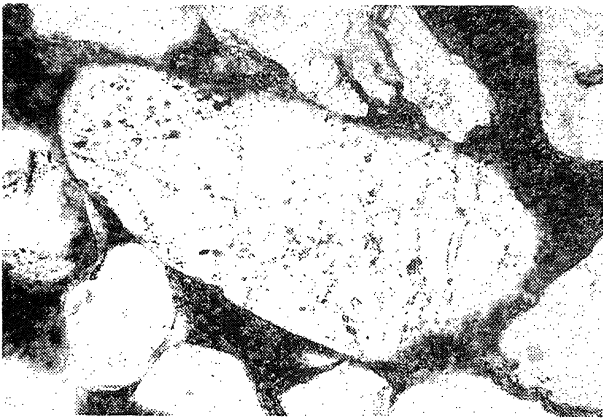
(*) Extremadamente bien seleccionada / *Extremely well-sorted.*

(**) Moderadamente bien seleccionada / *Moderately well-sorted.*

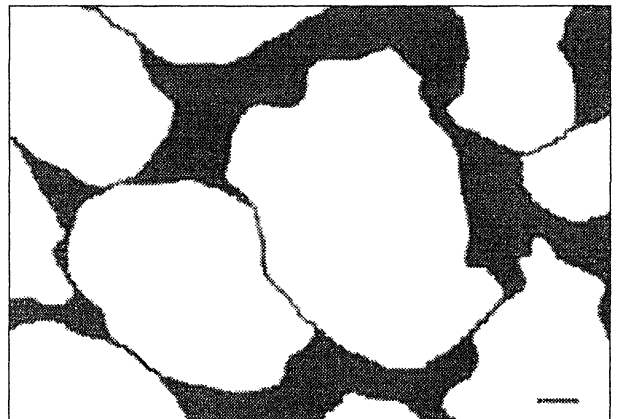
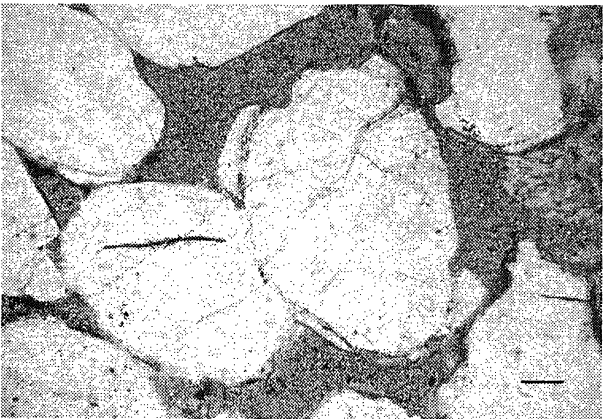
(***) Muy bien seleccionada con cambios granulométricos / *Very well-sorted with grain size changes.*



MB2/MB2



MB5/MB5



MB6/MB6

Figura 1.- Variación del número de contactos y de la superficie de presión-disolución en función del tamaño de grano. A la izquierda, fotografías de microscopio y a la derecha, tratamiento de esas imágenes en la que se han redibujado, en línea gruesa, los contactos de presión-disolución (Escala, 200 μm). (MB2) Arenisca fina y muy bien seleccionada. (MB5) Arenisca de tamaño medio, moderadamente seleccionada. (MB6) Arenisca de tamaño medio y muy bien seleccionada.

Figure 1.- Variation in the number of grain contacts and in the involved pressure-dissolution area with surfaces related to the grain size (photo on left). Right: processed image, in which the pressure-dissolution seams have been re-drawn with a thick line (length of bar, 200 μm). (MB2) well-sorted fine-grained sandstone. (MB5) moderately-sorted medium-grained sandstone. (MB6) well-sorted medium-grained sandstone.

los litotipos de areniscas finas y muy bien seleccionadas son los más litificados.

2.2. Estudio del sistema poroso

La porosidad total de la roca, determinada a partir de la porosimetría de mercurio, presenta valores elevados (17-25%) (Tabla 2) (12). La variación observada se debe, fundamentalmente, a la presencia de arcillas y, en menor medida, al grado de selección y al grado de compactación de las muestras. Estos factores modifican la configuración de la red porosa. Los valores muestran además que la presencia de arcillas (4-11%) provoca un aumento de microporosidad (2-5%) y, en especial, de infraporosidad (2%). Los valores de la Tabla 2 y los histogramas de la Figura 2 muestran el carácter macroporoso de esta arenisca. En muestras de características petrográficas idénticas (tamaño de grano y selección), como es el caso de las muestras MB1 y RD, se observa que la presencia de arcillas hace disminuir el tamaño de acceso a los poros. Esto se refleja en el valor del diámetro medio de la muestra sin arcillas (33,40 μm) (MB1) con respecto al de la muestra con arcillas (19,82 μm) (RD) y también en la distribución de poros de cada una de las muestras.

En relación con el tamaño de partícula, se puede observar que las muestras de tamaño medio a grueso (MB5, MB7) presentan no sólo accesos de poros mayores que en el caso de las areniscas finas, sino también más variedad de poros debido a la moderada selección de estas areniscas (Figura 2C).

fine-grained sandstones are the most lithified of the four rock types distinguished.

2.2. Study of porous system

Mercury intrusion porosimetry studies yielded high total porosity values (17-25%) for the rock (Table 2) (12). The variation found was due chiefly to the clay content although also, to a lesser extent, to the sample sorting and compactness that determine the configuration of the porous system. These values also showed that microporosity (2-5%) and especially infraporosity (2%) increase in the presence of clay minerals (4-11%). The values in Table 2 and bar graphs in Figure 2 are indicative of the macroporous nature of this sandstone. In samples with identical petrographic characteristics (grain size and sorting), such as MB1 and RD, the presence of clay minerals reduces pore throat size, as can be seen by comparing the mean pore diameter in the clay-free (MB1) and clay-containing samples (RD) -33,40 μm and 19,82 μm -, respectively; as well as the pore distribution in the two samples.

Due to moderate sorting, medium- to coarse-grained samples (MB5, MB7) had both larger pore throats and greater pore variety than the fine-grained rock (Figure 2C).

TABLA2/TABLE 2

Principales características de las muestras ensayadas y parámetros obtenidos a partir de la porosimetría de mercurio
Characteristics of the samples studied and mercury intrusion porosimetry values

Muestra / Sample	MB1	MB2	MB3	MB4	RD	MB5	MB7
Tamaño de grano (mm) / Grain size (mm)	0,20	0,15	0,15	0,15	0,20	0,42	0,42
Selección / Sorting (*)	Ext. B	Ext. B	Ext. B	Ext. B	Ext. B	Ext. B	M. B.
Presencia de arcillas / Clay content (%)	0	0-1	0-1	0-1	6-11	9-10	5
Densidad real / Real density (g/cm^3)	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,56	2,61
Densidad aparente / Apparent density (g/cm^3)	2,03	1,96	1,97	1,97	2,08	2,06	2,15
Porosidad total / Total porosity (%)	22,35	24,79	24,57	25,86	20,80	19,44	17,50
Macroporosidad / Macroporosity (%)	89,18	85,38	85,52	83,47	82,43	81,68	82,52
Microporosidad / Microporosity (%) (**)	8,65	12,82	12,87	14,65	13,35	14,32	14,32
Infraporosidad / Infraporosity (%) (***)	1,36	1,80	1,93	1,87	4,22	3,73	3,73
Diámetro medio / Average diameter (μm)	33,40	23,43	21,20	20,80	19,82	25,22	28,73
Moda / Mode (μm)	30-40	20-30	20-30	20-30	10-20	20-40	20-40

(*) Ext. B: Extremadamente bien seleccionada / Extremely well-sorted; M. B. Moderadamente bien seleccionada / Moderately well-sorted.

(**) Microporosidad: Diámetro de poro < 15 μm / Microporosity: Pore diameter < 15 μm

(***) Infraporosidad: Diámetro de poro < 0,1 μm / Infraporosity: Pore diameter < 0,1 μm

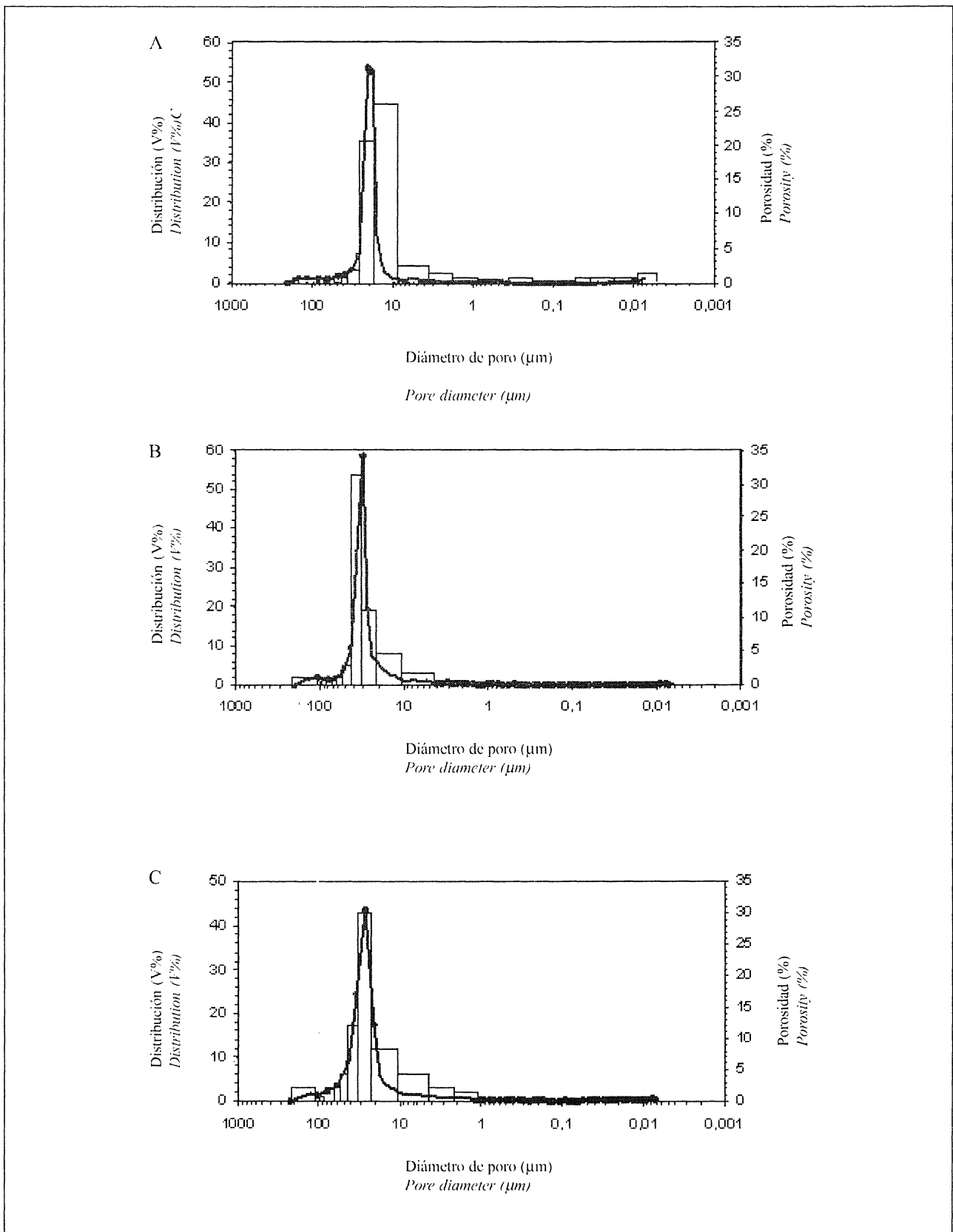


Figura 2.- Distribución de la porosidad en función del diámetro de acceso de poro. A) Arenisca fina con arcillas y muy buena selección (RD). B) Arenisca fina sin arcillas y muy buena selección (MB1). C) Arenisca de tamaño medio con arcillas y moderada selección (MB7).

Figure 2.- Distribution of the porosity based on the diameter of pore access. A) Clay-containing very well-sorted fine-grained sample (RD). B) Clay-free very well-sorted fine-grained sample (MB1). C) Clay-containing moderately-sorted sample (MB7).

Según se observa en el microscopio óptico, las arcillas se disponen de dos maneras, o bien recubriendo los granos de forma discontinua, o bien formando meniscos entre los granos más próximos. La primera disposición tiende a disminuir el volumen de la porosidad y también el tamaño de acceso de los poros (Figura 3A) pero no afecta al grado de interconexión. En cambio, cuando las arcillas forman meniscos (Figura 3B) llegan a obstruir por completo los accesos a los poros. Esto provoca un cambio en la configuración del sistema poroso que hace disminuir su interconexión, dificultando así el acceso y la circulación de los fluidos líquidos y gaseosos en el interior de la roca (13) (14).

2.3. Comportamiento hídrico **B**

Los ensayos hídricos se han realizado sobre siete muestras representativas de los diferentes litotipos antes descritos. En la Tabla 3 se presentan los valores de los parámetros hídricos más significativos.

Como se observa en la Tabla 3, la porosidad es muy alta y viene acompañada de un alto grado de saturación (W_s). El coeficiente de absorción capilar (C.A.C.) es muy alto, como se refleja en la curva de absorción capilar (Figura 4). El grado de saturación obtenido por capilaridad (S_i) es muy alto y representa más del 80% de la cantidad de agua absorbida al vacío, lo que es indicativo de la muy buena comunicabilidad de la red porosa de esta arenisca.

La dispersión observada en las curvas de absorción capilar es debida a la presencia variable de arcillas (0-11%). Las arcillas obstruyen total o parcialmente los pequeños accesos de poros, lo que provoca una

Under the optical microscope the clay minerals were found to be arranged in one of two ways: as a discontinuous cover around the quartz grains or as menisci between adjacent grains. The discontinuous cover arrangement tends to reduce porosity volume and pore throat size (Figure 3A), but not the degree of connectivity. The menisci, on the contrary (Figure 3B), completely obstruct the pore throats, prompting a change in pore system configuration and reducing connectivity. This process hinders liquid and gas accessibility and mobility inside the rock (13) (14).

2.3. Hydric behaviour

Hydric tests were conducted on seven representative samples of the lithotypes described above. Table 3 gives the most significant hydric parameter values.

As observed in Table 3, the porosity and vacuum saturation (W_s) were very high. The water absorption coefficient (W.A.C.) was also very high, as the capillary water absorption curve shows (Figure 4). The degree of capillary saturation (S_i) accounted for over 80% of the vacuum saturation water, an indication of the excellent connectivity of the pore system in this sandstone.

The dispersion observed in the capillary water absorption curves is due to the variable presence of clay minerals (0-11%). These minerals partially or completely obstruct the smaller pore throats, reducing

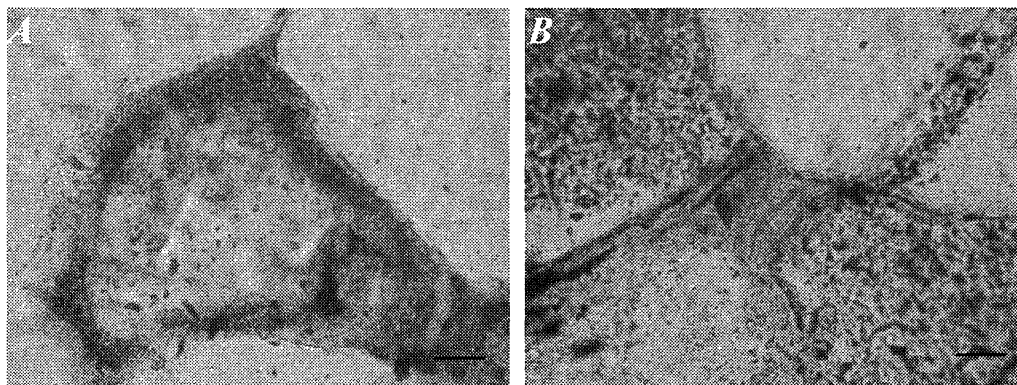


Figura 3.- Disposición de las arcillas dentro de la red porosa (escala 80 μ m). A) Reducción del tamaño de los poros. B) Formación de meniscos que obstruyen los accesos de poros.

Figure 3.- Arrangement of clay minerals in the porous system (bar length, 80 μ m). A) Reducing pore diameter and B) Forming menisci that obstruct pore accesses.

TABLA 3 / TABLE 3

Parámetros hídricos de los diferentes litotipos de la arenisca
Hydric parameters for sandstone lithotypes

Características petrográficas <i>Petrographic characteristics</i>	Muestra <i>Sample</i>	Parámetros / <i>Parameters</i>					
		N (%)	Ws (%)	C.A.C. / <i>W.A.C.</i> (kg/m ² s ^{0,5})	Si (%)	Se (%)	Wc (%)
Areniscas finas sin arcillas <i>Clay-free fine-grained sandstones</i>	MB1	22,59	10,99	0,596	80,44	0,30	4,19
	MB2	25,07	12,61	0,740	82,10	0,47	3,80
	MB3	25,13	12,66	0,724	82,28	0,73	3,42
	MB4	25,42	12,86	0,682	83,13	0,55	3,81
Areniscas de grano medio y con arcillas (5-10%) / <i>Clay-containing (5-10%) medium-grained sandstones</i>	MB5	21,15	10,11	0,149	76,16	0,85	2,57
	MB7	18,45	8,53	0,100	73,00	1,55	1,76
Arenisca con laminaciones sedimentarias y con arcillas (1-2%) <i>Clay containing (1-2%) sandstones and sedimentary laminations</i>	MB6	20,17	9,67	0,580	86,35	0,57	2,81
	Valor medio <i>Mean value</i>	22,57	11,06	0,510	80,49	0,72	3,19

N: Porosidad accesible / *Accessible porosity*; Ws: Grado de saturación en agua obtenido al vacío / *Water saturation under vacuum*; C.A.C.: Coeficiente de absorción capilar / *W.A.C: Water absorption coefficient*; Si: Grado de saturación de agua obtenido por capilaridad / *Capillary saturation degree*; Se: Contenido en agua al final del proceso de desorción / *Final water content at the end of the dry process*; Wc: Contenido en agua crítico / *Critical water content*.

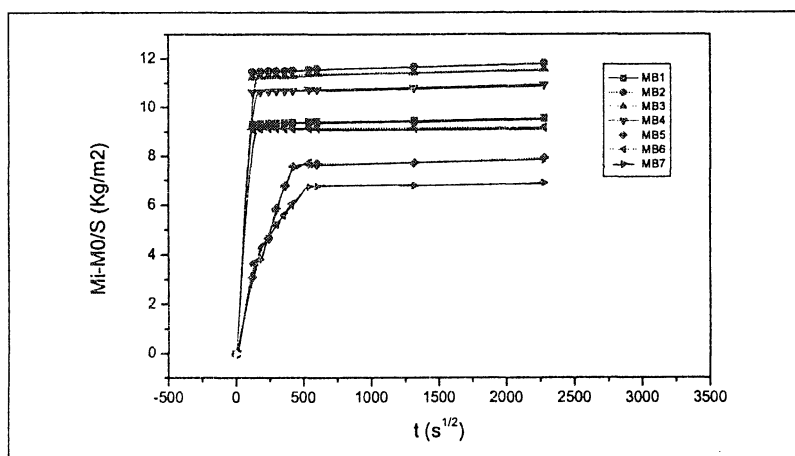


Figura 4.- Curvas de absorción de agua por capilaridad de los diferentes litotipos de la arenisca. (Muestras MB1, MB2, MB3 y MB4 sin arcillas. Muestras MB5 y MB7 con mayores porcentajes de arcillas y MB6 con porcentajes intermedios).

Figure 4.- Capillary water absorption curves for sandstone lithotypes. (Samples MB1, MB2, MB3 and MB4 are clay-free; samples MB5 and MB7 have the largest clay content and sample MB6 has an intermediate clay content).

disminución en la interconexión de la red porosa y, en consecuencia, una disminución de la velocidad de absorción de agua. Por otro lado, esta disminución de la velocidad de absorción de agua puede ser el resultado de la disminución de la interconexión de la red porosa provocada por la moderada selección de las muestras de grano medio (MB5, MB6 y MB7) con respecto a las muestras de grano fino.

pore system connectivity and, consequently, slowing the rate of water absorption. Such a reduction in water absorption flows may also be due to decreased connectivity resulting from the more moderate sorting of medium- (MB5, MB6 and MB7) than fine-grained sandstone samples.

Las anisotropías relacionadas con la presencia de laminaciones sedimentarias disminuyen la absorción de agua por capilaridad. Esto es debido a la disminución de la interconexión de la red porosa como consecuencia de los cambios alternantes del tamaño de grano.

Otro factor intrínseco, que condiciona el comportamiento hídrico de estas areniscas, es la anisotropía debida a la polaridad estratigráfica. Se observa que las muestras en las que la estratificación es perpendicular al flujo ascendente de agua, se saturan más que las colocadas con la estratificación paralela al flujo ascendente (Tabla 4). Sin embargo, estas diferencias son pequeñas y debidas a la compactación sufrida por estas areniscas, que provoca la aparición de contactos cóncavo-convexos entre los granos, preferentemente en la dirección perpendicular a la de la compactación. Esto hará que se junten y suelden los granos paralelamente a la estratificación y, por tanto, que disminuya algo la porosidad y, sobre todo, la comunicabilidad en esta dirección.

En cuanto a la cinética de desorción, los valores del contenido en agua crítico (W_c) son muy bajos con un promedio de 3,19% con respecto a la máxima saturación en agua al vacío, lo que implica una alta velocidad de evaporación (Figura 5), debida a que casi la totalidad del agua contenida en los capilares se

Capillary water absorption declines in the presence of sedimentary lamination anisotropy because the alternating grain sizes reduce connectivity.

A further intrinsic factor that determines the hydric behaviour of these sandstones is stratigraphic polarity anisotropy. Samples in which stratification was perpendicular to the upward flow were observed to absorb more water than those in which stratification was parallel to the flow (Table 4). These differences were small, however, and due to sandstone compaction in which concave-convex inter-grain contacts are formed primarily in a direction perpendicular to compaction. In this process, the grains abut and seal the gaps parallel to stratification, for a slight decline in porosity but a more substantial decrease in connectivity in that direction.

With respect to desorption kinetics, the critical water content (W_c) was found to be very low, with a mean value of 3.19% of maximum vacuum saturation. This would explain the high evaporation rate (Figure 5), since nearly all the water in the capillaries evaporates

TABLA 4 / TABLE 4

Ensayo de capilaridad
Capillary test

Muestra / Sample	C.A.C. / V.A.C. ($\text{kg/m}^2 \text{s}^{0.5}$)	Si (%)
Muestra orientada con la estratificación perpendicular al flujo ascendente <i>Stratification perpendicular to the upward flow</i>	0,51	80,49
Muestra orientada con la estratificación paralela al flujo ascendente <i>Stratification parallel to the upward flow</i>	0,55	76,75

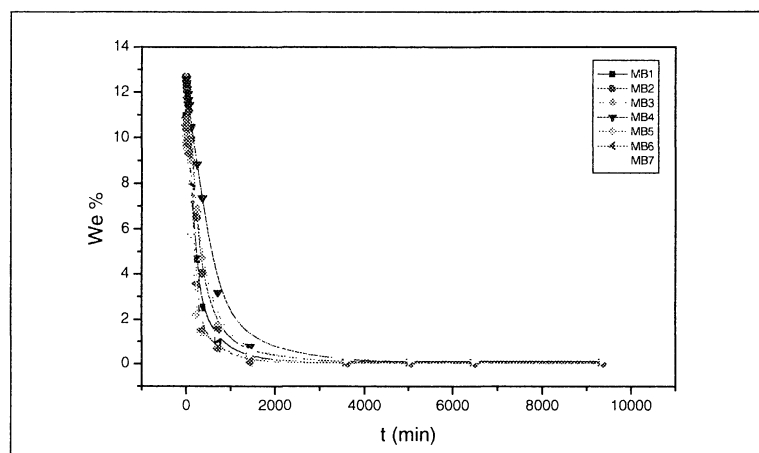


Figura 5.- Curvas de desorción de los diferentes litotipos de la arenisca. W_c : contenido en agua de la probeta; t : tiempo.

Figure 5.- Sandstone lithotype desorption curves. W_c : Specimen water content; t : time.

evapora en la superficie de la roca. Este valor indica una buena interconexión de la red porosa que está en consonancia con la escasa microporosidad detectada (Tabla 2).

El contenido en agua al final del proceso de evaporación (S_e) es muy bajo, indicando una retención casi nula, que es una característica muy propia de este material, debida a su muy alta comunicabilidad y a la ausencia total de material cementante.

Los valores del coeficiente de permeabilidad al vapor (δ) (Tabla 5) muestran una alta permeabilidad, coherente con el grado de interconexión de la red porosa evidenciado por los ensayos anteriores. La dispersión observada es debida a la presencia variable de arcillas (0-11%), ya que estas últimas obstruyen los estrechamientos de la red porosa modificando la configuración del sistema poroso y dificultando su comunicabilidad (13) y (14).

Los resultados del ensayo de hinchamiento han mostrado que el material presenta una dilatación hídrica nula a pesar de la presencia de arcillas de tipo interstratificado illita-smectita, por lo que éstas no tienen un carácter expansivo.

2.4. Comportamiento mecánico

Los ensayos de resistencia a compresión (8) y de abrasión (9) de la piedra arenisca se dan en la Tabla 6 para muestras con diferente tamaño de grano.

Los valores obtenidos muestran una resistencia mecánica muy baja debido:

- a la ausencia total de una fase aglomerante,
- a la alta porosidad,
- a la alta esfericidad de los granos de cuarzo, que hace que la superficie de contacto entre granos sea predominantemente puntual, y
- a la baja compactación de la roca.

at the rock surface. This value is also indicative of good pore system connectivity, which is in keeping with the low microporosity observed (Table 2).

The water content after evaporation (S_e) was very low, an indication that retention was nearly nil. This characteristic feature of such sandstones is a result of high connectivity and the total absence of any cementing.

Water vapour permeability was high, as shown by the values of the respective coefficient (δ) given in Table 5; this is consistent with the pore system connectivity results described above. The dispersion of the values observed is due to the variable presence of clay minerals (0-11%), which partially obstruct the pore throats, modifying the configuration of the pore system and hindering connectivity (13) (14).

The swelling test results showed hydric expansion in the sandstone to be nil, despite the presence of interstratified clay minerals such as illite and smectite in the samples, which were, therefore, necessarily non-expansive.

2.4. Mechanical behaviour

The compressive strength (8) and abrasion (9) test results are shown in Table 6 for the various sandstones.

The mechanical strength values were very low due to the:

- absence of a cementing phase,
- high porosity,
- predominantly spherical shape of quartz grains and the concomitant prevalence of point contacts between them, and
- low rock compactness.

TABLA 5 / TABLE 5

Ensayo de permeabilidad al vapor de agua
Water vapour permeability test

Características petrográficas <i>Petrographic characteristics</i>	Areniscas finas sin arcillas <i>Clay-free fine-grained sandstones</i>			Areniscas finas con arcillas <i>Clay-containing fine-grained sandstones</i>			
	Muestra <i>Sample</i>	MB8	MB9	MB10	MB11	MB12	MB13
δ (10^{-9}) (kg/m.s.Pa)	54,52	68,80	60,24	38,09	41,28	39,57	33,55

δ : Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua / *Water vapour permeability coefficient*

La dispersión obtenida se debe, fundamentalmente, al tamaño de grano. Se observa que cuanto más fino es el tamaño de grano más resistente es la roca, ya que las muestras finas se encuentran más litificadas que las gruesas. Esto es debido al mayor número de contactos entre granos y a la mayor superficie de presión-disolución.

2.5. Alterabilidad

La alterabilidad de esta roca se ha estudiado mediante el ensayo RILEM de cristalización de sales con sulfato de sodio (4) (15) y (16). Observando las curvas de la Figura 6 se detecta un aumento de peso durante el primer ciclo correspondiente a la cristalización de

The dispersion of the values was due primarily to grain size. The finer the grain size, the stronger the rock, since fine-grained samples are more lithified, due, as discussed earlier, to the larger number of inter-grain contacts and greater pressure dissolution area.

2.5. Durability

Sandstone durability was studied with the RILEM salt (sodium sulfate) crystallisation test (4) (15) (16). The curves in Figure 6 reflect the weight gain recorded in the samples during the first cycle, corresponding to the thenardite crystallisation inside the pores. The

TABLA 6/TABLE 6
Ensayos mecánicos de la roca
Sandstone mechanical test

Tamaño de grano Grain size	Muestra Sample	Abrasión lineal Lineal abrasion (mm)	Muestras Samples	Resistencia a compresión Compressive strength (MPa)
Fino Fine	MB15	36,48	MB22	22,36
	MB16	36,75	MB23	16,47
	MB17	36,67	MB24	24,32
	MB18	36,85	MB25	20,39
	MB19	36,76	MB26	15,69
	Valor medio Mean value	36,70	Valor medio Mean value	19,85
Medio Medium	MB20	49,94	MB27	5,49
	MB21	50,08	MB28	4,32
	Valor medio Mean value	50,01	Valor medio Mean value	4,91

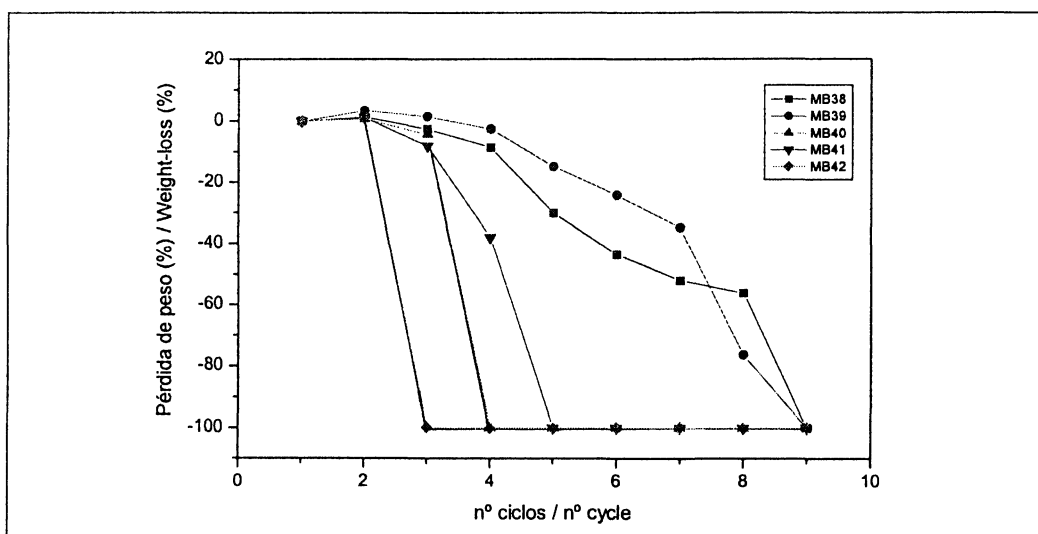


Figura 6.- Pérdida de peso durante los ensayos de cristalización de sales.

Figure 6 - Weight-loss during salt weathering tests.

tenardita dentro de los poros. En el segundo ciclo de cristalización, la hidratación de la tenardita a mirabilite viene acompañada de una arenización parcial de las muestras en las capas más externas. Esta arenización se debe a la tendencia que tienen estos sulfatos a cristalizar en las capas más externas del material facilitando la desagregación de la superficie (17).

Las muestras que han resistido mejor al ataque salino son las que presentan una granulometría con partículas finas, debido a su mayor litificación y a la ausencia de laminaciones sedimentarias. Las muestras de tamaño medio y grueso se desmoronaron totalmente al final del cuarto ciclo, además, las que poseían laminaciones se fragmentaron y se desplazaron a favor de ellas, durante el segundo o el tercer ciclo de inmersión, dependiendo de la abundancia de laminaciones. Esto es debido al esfuerzo disruptivo que provoca la acumulación e hidratación de la sal (tenardita) dentro de estas discontinuidades. La debilidad a favor de estas laminaciones se debe, sobre todo, a la menor cohesión que poseen las láminas con partículas de tamaño grueso. La presencia de arcillas también favorece la alterabilidad ya que aumentan la microporosidad, aunque este factor parece tener menor incidencia en la alterabilidad que el tamaño de grano y la presencia de laminaciones (13) y (14).

Diferentes autores relacionan la intensidad de alteración con el porcentaje de microporos existente en la roca (18) y (19) y con el tamaño de poros, es decir, cuanto más pequeño es el tamaño de poro más agresiva es la alteración (20). En las muestras estudiadas, el porcentaje de microporos es muy bajo y el tamaño de poros es alto (Tabla 2), por lo que la baja resistencia de esta roca a la alteración por cristalización de sales se puede atribuir a la ausencia de fase aglomerante, a la baja cohesión entre los elementos de la roca y al bajo coeficiente de compactación de la roca.

3. CONCLUSIONES

La integración de los estudios petrográficos junto con los resultados de los análisis hídricos, mecánicos y de alterabilidad, permite deducir que los mecanismos de alteración de esta piedra sólo pueden ser debidos a procesos mecánicos o físicos. La predominancia de cuarzo y la ausencia de minerales y material cementante de composición alterable en la roca, junto con su buen comportamiento hídrico, imposibilitan cualquier tipo de alteración química de la misma. Por tanto, según la investigación realizada se pone de manifiesto que la vulnerabilidad de esta roca radica en su baja resistencia mecánica, que está directamente relacionada con su baja litificación. El estudio de la roca y sus diferentes litotipos permiten predecir el comportamiento y la durabilidad de esta arenisca utilizada como material de

hydration of thenardite to mirabilite in the second cycle of crystallisation entailed partial granular disintegration of the outer layers, due to the tendency of these sulfates to crystallise on such layers, prompting surface deterioration (17).

With a higher degree of lithification and absence of sedimentary laminations, the fine-grained samples were less susceptible to salt weathering. The medium- to coarse-grained samples had disintegrated entirely by the end of the fourth cycle. The laminated samples, in turn, exhibited flaking and scaling during the second or third immersion cycle, as a result of the exploitative action of inter-laminar accumulations of hydrated salt (thenardite). Such weakness is due in particular to the lesser bonding strength of laminas with coarse particles. The presence of clay minerals also favours decay, due to the concomitant increase in microporosity, although this factor appears to have a smaller impact than grain size or lamination (13) (14).

Several authors associate the intensity of decay with the percentage of micropores in the rock (18) (19) and pore size, i.e., the smaller the pore size the more aggressive the decay process (20). In the samples studied, with a very small percentage of micropores and large pore size (Table 2), stone susceptibility to salt weathering can be attributed to the absence of a cementing phase, the weak bonding among components and the low compactness coefficient of the rock.

3. CONCLUSIONS

It may be deduced from the present joint examination of the results of petrographic studies and hydric, mechanical and durability test findings that, in this stone, decay must be due to physical or mechanical processes only. The predominance of quartz in the rock, the absence of chemically unstable minerals or a cementitious phase and good hydric behaviour rule out the possibility of chemical alteration. Therefore, the research conducted shows that the vulnerability of this material lies in its low mechanical strength, due in turn to scant lithification. The behaviour and durability of

construcción en el acueducto Zaghouan–Cartago y otros monumentos tunecinos con ella construidos.

En resumen, esta roca es muy vulnerable a los agentes de alteración cuyos mecanismos impliquen fuerzas mecánicas disruptivas, como es el caso de la cristalización de sales solubles y del hielo-deshielo. La ausencia de sales solubles en el monumento, así como la ausencia de heladas en la zona donde se ubica el acueducto explica el buen estado de conservación de la piedra constructiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M. Martí, F. Bohils, O. Castell (Servei de Microscòpia de la Universitat Autònoma de Barcelona-UAB), a J. Ques (Laboratori Làmines Primes de la UAB) y al Dr. J. L. Prada la ayuda recibida durante la consecución del trabajo. Agradecemos, asimismo las correcciones a este artículo realizadas por el Dr. E. Cardellach y a los revisores de esta revista, que han contribuido a la mejora del manuscrito original.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) D. Gómez-Gras, K. Zoghliami: *Procedencia de las areniscas de la unidad superior de la Fm. Fortuna en el NE de Túnez*. Geotemas, nº 5 (2003), pp. 109-111.
- (2) C. Fernández Casado: *Ingeniería hidráulica romana*. p. 682, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1983.
- (3) F. Rakob: *L'aqueduc de Carthage*. Dossiers de l'archéologie, nº 38 (1979), pp. 34-42.
- (4) RILEM 25-PFM: *Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement*. Mater. Struct., Vol. 13, nº 75 (1980), pp. 175-253.
- (5) NORMAL 11/85: *Assorbimento d'acqua per capillarità*. CNR–ICR. Roma, 1985.
- (6) NORMAL 29/88: *Misura dell'indice di asciugamento (drying index)*. CNR–ICR. Roma, 1988.
- (7) NORMAL 7/81: *Assorbimento per immersione total. Capacità di imbibizione*. CNR–ICR. Roma, 1981.
- (8) Norma UNE-EN 1926, 1999: *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión*.
- (9) Norma UNE-EN ISO 10545-6, 1995: *Determinación de la resistencia a la abrasión*.
- (10) D.C. Beard, P.K. Weyl: *Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand*. AAPG Bulletin, nº 57 (1973), pp. 349-369.
- (11) R.V. Ingersoll, T.F. Bullard, J. P. Grimm, J.D. Pickle, S.W. Sores: *The effects of grain size on detrital modes: a test of Gazi-Dickinson point-counting model*. Jour. Sedim. Petrol., Vol. 54 (1984), pp.103-116.
- (12) M.C. López de Azcona, R. Fort, F. Mingarro: *La conservación de los materiales pétreos en la fuente de La Cibeles*, Madrid (España). Mater Construcc, Vol. 52, nº 265 (2002), pp. 65-75.
- (13) F. Veniale, M. Setti, C. Rodríguez-Navarro, S. Lodola: *Procesos de alteración asociados al contenido de minerales arcillosos en materiales pétreos*. MATER CONTRUCC, Vol. 51, nº 263-264 (2001), pp. 163-182.
- (14) P. A. Warker, B. J. Smith: *Salt distribution in clay-rich weathered sandstone*. Earth Surface Processes & Landform, nº 25 (2000), pp. 1333-1342.
- (15) G.M. Grossi, R. Esbert: *Las sales solubles en el deterioro de las rocas monumentales. Revisión bibliográfica*. Mater Construcc, Vol. 54, nº 235 (1994), pp. 15-30.
- (16) R. Fort, A. Bernabéu, M. A. García del Cura, M. C. López de Azcona, S. Ordóñez, F. Mingarro: *La Piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico*. Mater Construcc, Vol. 52, nº 266 (2002), pp. 19-32.
- (17) M. P. Luxán, F. Dorrego: *Caracterización y selección de morteros en la restauración de la Portada de los Reyes (Benavente, Zamora)*. MATER CONTRUCC, Vol. 54, nº 273 (2004), pp. 35-44.
- (18) K.L. Gauri, A.R. Punuru: *Characterisation and durability of limestone determined through mercury intrusion porosimetry*. Proceedings of the 1st Int. Symp. on the Conservation of Monument in the Mediterranean Basin, Bari, Italy (1989), pp. 263-269.
- (19) S. Ordoñez, R. Fort, M. A. García del Cura: *Pore size distribution and the durability of a porous limestone*. Quarterly Journal of Engineering Geology, nº 30 (1997), pp. 221-230.
- (20) R. M. Esbert, R. M. Marcos: *Las piedras de la catedral de Oviedo y su deterioro*. p. 144, Ed. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Oviedo, 1983.

* * *

the sandstone used to build the Zaghouan–Carthage aqueduct and other Tunisian monuments can be predicted on the basis of the study of the rock and its various lithotypes.

The stone studied is highly susceptible to weathering agents whose mechanisms involve disruptive mechanical forces, such as salt crystallisation and freezing. The absence of both soluble salts in the monument and of freezing weather in the area where the aqueduct is sited explains the good condition, even today, of this building material.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank M. Martí, F. Bohils, O. Castell (Servei de Microscòpia de la Universitat Autònoma de Barcelona-UAB), J. Ques (Laboratori Làmines Primes, UAB) and Dr. J.L. Prada for their assistance throughout this study. Dr. E. Cardellach and the journal reviewers are thanked for their thoughtful and constructive comments.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Monográfico dedicado a

LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (Nº 247/248) a: *Los Materiales Compuestos en la Construcción*.

Los Materiales Compuestos en la Construcción es una temática muy actual ya que incide en el desarrollo y aplicación de Nuevos Materiales ("Composites"), que son el futuro en el campo de la Construcción. Uno de los sectores productivos que más influyen en el PIB es el de la construcción, con lo cual resulta necesario involucrar al sistema de I+D en el desarrollo de nuevos materiales compuestos basados en el cemento. En estos términos se presentaba en la última convocatoria de proyectos de investigación de la CICYT y dentro del Programa Nacional de Materiales, lo referente a las investigaciones en el Área de Materiales Compuestos (B.O.E. 7 de noviembre de 1997). *Los Materiales Compuestos en la Construcción* constituyen un tema estratégico, tanto para los ingenieros de caminos, canales y puertos como para los ingenieros de materiales.

Este número monográfico se compone de dos partes. La parte I se dedica a los materiales compuestos de matriz de hormigón. Son tratados temas claves como la dosificación, la interfase en sistema acero-hormigón y la implantación de nuevas fibras como son las acrílicas. La parte II se concentra en los denominados materiales compuestos de matriz orgánica, analizándose en profundidad las nuevas tecnologías tipo sandwich, textiles o de parrilla.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos, en los que también se presentan las amplias posibilidades de aplicación de estos materiales. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en su respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- *Materiales Compuestos en la Construcción: Introducción (Composite Materials in Building: Introduction)*
A. Miravete
- *Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero (Mix design of steel fiber reinforced concrete)*
E. Moreno y M. Fernández Cánovas
- *Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras (Interface study of fiber reinforced concrete)*
A. Pacios y M. Fernández Cánovas
- *Hormigones reforzados con fibras acrílicas (Concretes reinforced with acrylic fibres)*
T. Amat
- *Fabricación y diseño de estructuras parrilla (Manufacture and design of composite grids)*
Stephen W. Tsai, Kevin K.S. Liu y Philippe M. Manna
- *Características de los elementos resistentes tipo sandwich contruidos en materiales compuestos avanzados a partir de tejidos tridimensionales (Characteristics of sandwich-type structural elements built of advanced composite materials from three dimensional fabrics)*
L. Castejón, M.A. Jiménez y A. Miravete
- *Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles (Composite materials from new textile technologies)*
M.A. Jiménez, L. Castejón y A. Miravete
- *Los composites y la construcción: su ayer, hoy y mañana (Composites and construction: yesterday, today and tomorrow)*
J. Manco
- *Conclusiones finales (Final conclusions)*
A. Miravete