

Evaluación de tratamientos de consolidación e hidrofugación aplicados a la arenisca miocénica utilizada en el Patrimonio Monumental de Túnez

Evaluation of consolidating and water repellent treatments applied to the miocene sandstone used in Tunisian Heritage Monuments

K. ZOGHLAMI¹, D. GÓMEZ-GRAS¹, A. ÁLVAREZ¹, M. P. DE LUXÁN^{2*}

¹ Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona

² Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)

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

Fecha de recepción: 24-III-04

Fecha de aceptación: 14-VI-04

ESPAÑA

RESUMEN

Esta investigación se centra en la evaluación del comportamiento de la arenisca miocénica utilizada en el acueducto de Zaghouan-Cartago y otros monumentos del Patrimonio Monumental de Túnez tras la aplicación de tratamientos de hidrofugación y de consolidación. Para los tratamientos se han seleccionado productos comerciales: dos consolidantes a base de silicato de etilo, Tegovakon (TV) y Keim-Silex OH (KSOH); dos hidrofugantes (siloxanos), Tegosivin HE 328 (THE) y Tegosivin HL100 (THL) y un producto de acción doble (consolidante e hidrofugante) a base de ester de ácido silílico con siloxano, Keim-Silex H (KSH). Además se ha aplicado un tratamiento mixto con aplicación sucesiva de TV y THL.

Estos tratamientos de conservación con productos organosilícicos afectan a la estructura porosa de la arenisca, produciendo, en todos los casos, una disminución de la porosidad total y de la permeabilidad al vapor de agua. El hidrofugante THE es el producto que menos influye en estas propiedades, al mantener la distribución de la red porosa más similar a la de la arenisca sin tratar.

Los hidrofugantes disminuyen la absorción de agua y los consolidantes incrementan la resistencia mecánica. La mezcla TV+THL preparada confiere propiedades similares a la de los hidrofugantes y, por tanto, frente al ensayo RILEM de cristalización de sales se producen fuertes desplazaciones.

Los mejores resultados en el tratamiento de la arenisca se han obtenido con el producto de doble efecto consolidante e hidrofugante (KSH), ya que mejora tanto las propiedades mecánicas como su comportamiento frente a la acción de las sales, aunque reduce la permeabilidad al vapor de agua.

PALABRAS CLAVE: arenisca, propiedades petrofísicas, productos consolidantes e hidrofugantes organosilícicos.

SUMMARY

The research reported in the present paper focused on the behaviour of the Miocene sandstone used to build the Roman aqueduct at Zaghouan-Carthage and other Tunisian Heritage monuments, after application of water repellent and consolidating treatments as a preliminary to restoration. Commercial consolidants and water repellents were used in the experiments: two ethyl silicate consolidants, Tegovakon (TV) and Keim-Silex OH (KSOH); two (siloxane) water repellents, Tegosivin THE 328 (THE) and Tegosivin HL100 (THL); and a dual (consolidant and water repellent) action substance, Keim-Silex H (KSH) (silicate acid ester base with siloxane). A mixed treatment consisting of successive coats of TV and THL (TVHL) was also applied.

These organosilicate consolidants and water repellents acted on the porous structure of the sandstone, reducing total porosity and water vapour permeability. The water repellent THE was found to affect these properties least, with a pore size distribution that resembled the distribution in the untreated sandstone most closely.

Water repellents diminish water absorption and consolidants increase mechanical strength. The TV-THL mix, which yielded results similar to those obtained with water repellents alone, was unable to prevent the substantial scaling that occurs during (RILEM) salt crystallisation-induced artificial ageing.

The best results were found with the dual action consolidant/water repellent product (KSH), which improved the mechanical properties while affording protection from the decay caused by salts in artificial ageing trials. This substance was found to reduce water vapour permeability, however.

KEY WORDS: sandstone, petrophysical properties, consolidants and water repellents organosilicate products

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los monumentos más representativos del Patrimonio Monumental de Túnez, como es el caso del acueducto romano de Zaghouan-Cartago, fueron construidos con la arenisca miocénica perteneciente a la unidad superior de la formación Fortuna (1). El presente estudio se ha planteado con el objetivo de investigar previamente el comportamiento de la arenisca frente a distintos tratamientos de posible aplicación en la restauración de estos monumentos.

La roca estudiada es una cuarzoarenita no cementada y litificada por compactación, compuesta principalmente de cuarzo (69-84%), feldespato (esencialmente ortosa, 0-0,1%) con una elevada porosidad (17-25%) y matriz (0-11%) representada por arcillas infiltradas de tipo interestratificado illita-esmectita y caolinita. Esta roca arenisca se divide en dos grandes grupos: areniscas finas y areniscas gruesas, las dos variedades pueden presentar o no arcillas y laminaciones sedimentarias (1).

En un estudio petrofísico previo de esta arenisca (2) se ha mostrado que posee una muy baja resistencia mecánica asociada a una muy baja resistencia al ataque salino, debido a su baja compactación y a la ausencia de cemento. El estudio también mostró que las areniscas finas son mucho más resistentes que las gruesas debido a su mejor litificación. El comportamiento hídrico es muy bueno, caracterizado por una absorción y desorción de agua muy rápida, con una retención casi nula. La porosidad se dispone en forma de grandes poros comunicados por canales, que constituyen los accesos de poros. Estos accesos, aunque son de tamaño inferior al del propio poro, tienen dimensiones importantes (20-34 µm). En las rocas finas, los tamaños reales de poro, no medidos por porosimetría de mercurio sino observados por microscopía óptica y electrónica, varían entre 50-60 µm, y pueden alcanzar 120 µm. En las rocas gruesas, los tamaños de poro más frecuentes se encuentran alrededor de 200 µm, y alcanzan hasta 500 y 600 µm. Esto confiere al sistema poroso de estas rocas un carácter macroporoso y una interconexión entre poros óptima que permite una libre circulación de fluidos.

La composición monomictica cuarzosa de la roca, la ausencia de minerales y de cementos de composición alterable, junto con su excelente comportamiento hídrico, proporcionan a la roca su inalterabilidad química. Sin embargo, debido a su baja resistencia mecánica, esta roca es muy vulnerable a los agentes de alteración cuyos mecanismos implican fuerzas mecánicas disruptivas, como es el caso de los ciclos de cristalización de sales solubles, los de hielo-deshielo o los cambios debidos a la dilatación térmica.

1. INTRODUCTION

Some of the most prominent Tunisian Heritage monuments, such as the Roman aqueduct at Zaghouan-Carthage, were built with Miocene Age sandstone taken from the upper unit of the Fortuna formation (1). The present survey was designed to determine the behaviour of this sandstone when treated with different products prior to their possible use to restore these monuments.

The sandstone studied is a non-cemented quartz-arenite lithified by compaction, including quartz grains (69-84 %) and feldspars (mainly orthoclase, 0-1.1%) in its composition, with a porosity of 17-25% and a matrix (0-11%) consisting of infiltrated clay minerals, essentially mixed-layers of illite-smectite and kaolinite. Two categories of rock can be distinguished from the standpoint of grain size: fine-and medium-grained sandstones. Both varieties may contain clays and exhibit sedimentary lamination (1).

A previous petrophysical study of this sandstone (2) found that it has very low mechanical strength and resistance to salts due to its scant compactness and the absence of cementing phases. That survey also showed the more lithified, fine-grained sandstones to be mechanically stronger than their medium-grained counterparts. Stone hydric behaviour is excellent, with very high water absorption and desorption rates and essentially no water retention. Its porosity comprises large pores whose interconnecting channels constitute the pore throats. Whilst smaller in diameter than the pores themselves, these throats are nonetheless fairly large (20-34 µm). In the fine-grained sandstones, actual pore sizes -measured not by mercury intrusion porosimetry but under optical and electronic microscopes- vary on average from 50 to 60 µm, but may reach values of up to 120 µm. In medium-grained sandstones, the most common pore size is around 200 µm, with values reaching up to 500 or 600 µm. It is to this configuration that the stone owes its macroporous nature and the inter-pore connections that facilitate the circulation of fluids.

The high quartz content of the rock, together with the absence of unstable (reactive) minerals and cements, and its excellent hydric behaviour, make it highly resistant to chemical decay. Due to its low mechanical strength, however, this stone is very vulnerable to weathering agents whose degenerative mechanisms involve mechanical forces such as salt crystallization, freeze-thaw cycles or thermal expansion.

Por tanto, para mejorar su comportamiento es necesario incrementar las propiedades mecánicas mediante la aplicación de productos consolidantes y proteger la roca contra la penetración del agua en fase líquida con productos hidrofugantes, ya que ésta puede ser un vehículo para las sales solubles, cuya cristalización interna es muy nociva en esta roca. El presente estudio se plantea con esta finalidad y como paso previo a la restauración de los monumentos construidos con esta piedra. Los productos seleccionados son comerciales y se han elegido en base a sus prestaciones demostradas con areniscas (3-4) y con la piedra de una manera general (5-8).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras estudiadas proceden de las canteras romanas que han suministrado material para la construcción de diferentes monumentos tunecinos. La variedad ensayada ha sido la arenisca de granulometría fina, ya que es la más utilizada en el Patrimonio por su mayor resistencia mecánica. Las muestras han sido cortadas en cubos de 5 cm de lado para realizar los ensayos hídricos y en prismas de (5x5x10) cm para el ensayo de resistencia a la compresión. Los respectivos tratamientos han sido aplicados mediante brocha en las cuatro caras laterales de las muestras, según se describe en las recomendaciones RILEM (9). De este modo se persigue que el flujo de agua y de la solución salina penetre y sature la porosidad interna a través, preferentemente, de las dos caras sin tratar, sobre todo en el caso de los hidrofugantes, lo que nos permitirá estudiar los daños producidos por las sales en la interfase roca tratada-roca sin tratar. En el ensayo de permeabilidad al vapor, las muestras utilizadas son de (4x4x1) cm y han sido tratadas por las caras inferior y superior, es decir, las de (4x4) cm, según indican las recomendaciones RILEM.

En los tratamientos con consolidantes y hidrofugantes puros, el tiempo transcurrido entre la aplicación de los productos y el inicio de los ensayos es de un mes. Por otro lado, el tiempo transcurrido entre la aplicación del consolidante y del posterior hidrofugante es igualmente de un mes.

Para evaluar el efecto de los productos se han determinado, tanto en las muestras tratadas como en las muestras sin tratar (MB), las propiedades relacionadas con el acceso y movimiento de agua: porosidad abierta, absorción de agua por capilaridad y velocidad de secado del agua absorbida. Estas dos últimas propiedades se han evaluado de forma dinámica (curvas de absorción y secado) y se han determinado los correspondientes parámetros y coeficientes según las recomendaciones RILEM y NORMAL (9-12). La durabilidad de la roca se ha contrastado por la alteración sufrida en el ensayo acelerado de cristalización de sales según las recomendaciones RILEM con

Consequently, if rock performance is to be enhanced, its mechanical strength must be reinforced with consolidants, and it must be protected from the penetration of liquid water, which is a vehicle for the soluble salts whose subsequent crystallization inside the rock triggers a particularly aggressive deterioration process. The present study is the first stage of a wider project whose ultimate aim is the restoration of the monuments built with this sandstone by improving the natural properties of the rock with selected commercial consolidants and water repellents. The products used were chosen on the basis of the beneficial effects reported in connection with both sandstones (3-4) and other rocks (5-8).

2. MATERIALS AND METHODS

The samples studied were taken from the formations quarried by the Romans to build a number of monuments in Tunisia. Fine-grained sandstone was chosen for both the hydric and mechanical tests, as this was the type of rock preferred by Roman architects for its greater mechanical strength. The samples were cut into 5 cm cubes for the hydric tests and (5x5x10) cm prisms for the compressive tests. All four lateral surfaces were coated with the consolidants and water repellents, pursuant to RILEM recommendations (9). This procedure is designed to allow the water and saline solution to penetrate and saturate the internal pores, preferably through the two untreated surfaces. Particularly in the case of water repellents, this makes it possible to study the damage caused by the salts crystallising along the untreated-treated rock interface. The top and bottom surfaces (i.e., measuring (4x4) cm of the (4x4x1) cm specimens used in the water vapour permeability tests were coated with the respective products as specified in the RILEM recommendations.

Testing was conducted one month after the samples had been treated with pure consolidants or water repellents. A full month also lapsed between the time the consolidant was applied and subsequent treatment of the specimens with the water repellent.

The properties associated with the uptake and internal movement of water, namely open porosity, capillarity water absorption and desorption rate, were compared in treated and untreated samples (MB) to evaluate the effect of the products tested. The water inflow and drying rates were evaluated dynamically (absorption and drying curves) and the respective parameters and coefficients were determined to RILEM and NORMAL recommendations (9-12). Rock durability, in turn, was found by measuring the type of decay taking place during the salt crystallization test consisting, in accordance with RILEM recommendations,

una disolución de sulfato de sodio al 10% y durante 9 ciclos de inmersión total. La cuantificación de la porosidad abierta y la distribución del tamaño de los poros antes y después de la aplicación de los productos se ha llevado a cabo mediante porosimetría de mercurio y microscopía electrónica de barrido (MEB). Se ha determinado, también, la variación de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de la resistencia a la compresión y a la abrasión según la norma UNE (13) y la recomendación ISO (14), antes y después de la aplicación de los consolidantes.

En el ensayo de capilaridad, la superficie de absorción es siempre la superficie tratada tal como indican las recomendaciones RILEM para el caso de tratamiento parcial de las muestras.

Para la determinación de la distribución de poros en las muestras mediante la técnica de porosimetría de mercurio (MIP) se ha utilizado un equipo PASCAL (Pressurization with Automatic Speed-up Continuous Adjustment Logic) 240. Para ello, las muestras han sido cortadas en probetas de (2x1x1) cm de la parte más externa de las mismas muestras que han servido para la realización de los ensayos hídricos. De esta manera se han podido relacionar, de una manera más precisa, los resultados hídricos con los cambios porométricos generados por la aplicación de los productos.

Los productos organosilílicos utilizados en este trabajo son:

Acción consolidante

- Silicato de etilo (oligómero): Tegovakon V (TV).
- Silicato de etilo (oligómero): Keim-Silex OH (KSOH).

Acción hidrofugante

- Emulsión acuosa de un metilpolisiloxano: Tegosivin HE 328 (THE).
- Siloxano oligomérico de cadena corta que reacciona con la humedad de la roca para transformarse en un polisiloxano: Tegosivin HL 100 (THL).

Acción doble: consolidante e hidrofugante

- Consolidante e hidrofugante incoloro a base de éster de ácido silílico con siloxanos: Keim-Silex H (KSH).
- Combinación del TV más el THL (TV+THL).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Sistema poroso y análisis microestructural

En el caso de las muestras tratadas con consolidantes (TV, KSOH) y con el producto de doble efecto (KSH), así como

of nine total immersion cycles in 10% sodium sulphate solution. SEM and mercury intrusion porosimetry were used to analyse open porosity and pore size distribution before and after application of the products. Variations in mechanical properties were likewise determined before and after application of the consolidants, with compression and abrasion tests conducted to UNE (13) and ISO (14) recommendations.

Pursuant to RILEM recommendations, where samples were subjected to partial treatment only, the absorption surface in capillary tests was always the treated surface.

A PASCAL 240 (Pressurisation with Automatic Speed-up Continuous Adjustment Logic) porosimeter was used in the MIP determination of pore distribution. The specimens used were cylinders measuring (2x1x1) cm cut from the outer edge of the cubes previously used for the hydric tests, a procedure that made it possible to relate the hydric results more precisely to the porosimetric changes generated by the treatments.

The organosilicate products used in this study were:

Consolidating action

- *(Oligomeric) ethyl silicate: Tegovakon V (TV).*
- *(Oligomeric) ethyl silicate: Keim-Silex OH (KSOH).*

Water repellent action

- *Water-based methylpolysiloxane emulsion: Tegosivin HE 328 (THE).*
- *Short chain oligomeric siloxane that reacts with the humidity in the rock to form a polysiloxane: Tegosivin HL 100 (THL).*

Dual consolidating and water repellent action

- *Colourless consolidant and water repellent: silicate acid ester with siloxanes: Keim-Silex H (KSH).*
- *TV-THL mix (TV+THL).*

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Porous network and microstructural analysis

The samples treated with consolidants KSOH and TV, the dual action (KSH) substance, and all the other products,

con el resto de los tratamientos, se detecta una disminución moderada de la porosidad total con respecto a las muestras sin tratar (MB) (Tabla 1). Con los tratamientos de consolidación hay una disminución significativa de la macroporosidad; y, por el contrario, un aumento de la microporosidad.

Las curvas y los histogramas de distribución de la porosidad en función de los tamaños de acceso a los poros (Figuras 1A, 1B, 1C, 1E y 1F) muestran una distribución bimodal en las muestras tratadas que es debida al aumento de la microporosidad (diámetro de poro <15 µm). Con el tratamiento THE (Figura 1D) los valores son similares a las muestras de referencia (Figura 1A).

Las observaciones mediante MEB muestran que el consolidante recubre la superficie de los granos de forma discontinua e irregular (Figura 2A) y se concentra principalmente en los estrechamientos de la red porosa formando meniscos, obstruyendo los accesos a los poros más pequeños (diámetro <10 µm) (Figuras 2B y 2C).

La polimerización preferente del consolidante en estos estrechamientos y la formación de la película que tiene un espesor de alrededor de 2 µm (Figura 2F) en las proximidades de las mismas, reduce el diámetro del poro principal y dificulta considerablemente la interconexión de la red porosa. Como consecuencia, hay una disminución de los diámetros de poros de (20-30 µm) que son los más abundantes en esta roca (Figuras 1A, 1B y 1C), aparecen poros de menor diámetro, comprendidos entre 18 y 10 µm, y se produce un aumento de la microporosidad.

El aumento del porcentaje de poros con diámetros entre 1 y 7 µm se puede atribuir a la aparición de microfisuras

showed a moderate decrease in total porosity compared to the untreated samples (MB) (Table 1). Macroporosity was observed to decrease significantly after consolidating treatments, whereas microporosity increased in these samples.

The pore size distribution curves and histograms (Figures 1A, 1B, 1C, 1E and 1F) exhibit a bimodal distribution in the treated samples due to the increase in microporosity (pore diameter <15 µm) generated by the consolidants. The values obtained after treatment with THE (Figure 1D) were similar to the results found for the controls (Figure 1A).

SEM observations showed that the consolidant film covered the grain surfaces discontinuously and irregularly (Figure 2A) and tended to accumulate primarily in the areas where the porous network narrowed, forming menisci and plugging the throats of the smallest pores (diameter <10 µm) (Figures 2B and 2C).

Consolidant polymerization, which took place preferably in these throats, and the formation of a 2 µm film in the vicinity (Figure 2F) substantially reduced the diameter of the main pore and obstructed pore network interconnections. Consequently, the 20-30 µm pores, the most common size in this rock, narrowed in diameter (Figures 1A, 1B and 1C) while microporosity increased concomitantly, with the appearance of these smaller diameter pores (18-10 µm).

The rise in the percentage of pores with diameters ranging from 1 to 7 µm may be attributed to consolidant

TABLA 1 / TABLE 1
Porosimetría de mercurio de las muestras tratadas y sin tratar (MB)
Mercury intrusion porosimetry in untreated (MB) and treated samples

Muestra <i>Sample</i>	Porosidad total <i>Total porosity</i> (%)	Macroporosidad <i>Macroporosity</i> (%)	Microporosidad <i>Microporosity</i> (*) (%)	Infraporosidad <i>Infraporosity</i> (**) (%)	Diámetro medio de poro <i>Average diameter</i> (µm)
MB	22.35	89.98	8.65	1.36	33.40
TV	18.99	69.61	29.06	1.42	31.93
KSOH	19.42	78.60	19.90	1.49	31.73
THE	20.07	91.98	6.91	1.10	32.21
KSH	18.85	83.42	14.91	1.65	30.14
TVHL	18.32	83.03	15.82	1.15	31.70

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

(**) Infraporosidad: Diámetro de poro < 0,1 µm / *Infraporosity: Pore diameter < 0.1 µm*

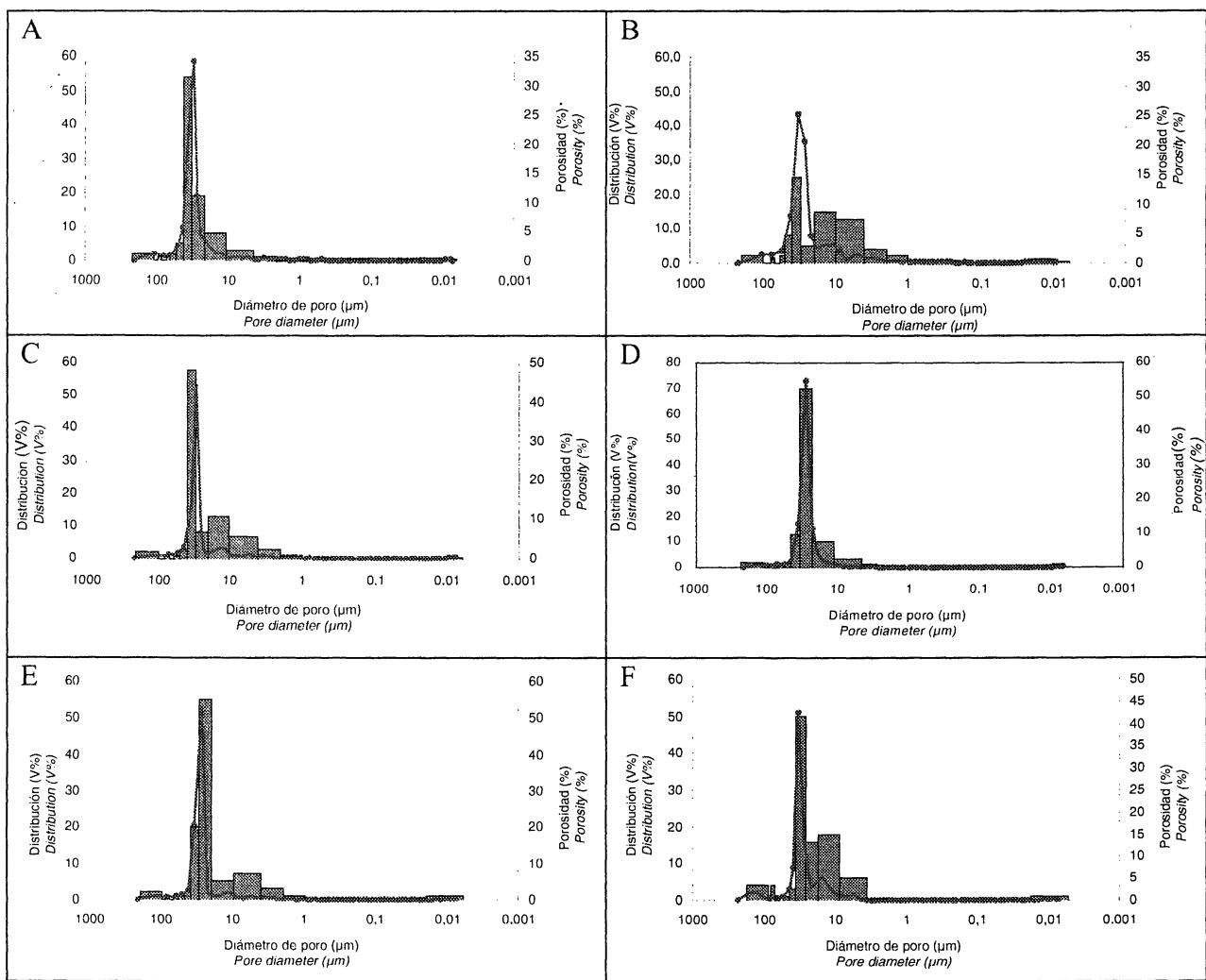


Figura 1.- Distribución del tamaño de poros (porosidad accesible al mercurio) de la arenisca sin tratar MB (A) y tratada con el consolidante TV (B), con el consolidante KSOH (C), con el hidrofugante THE (D) y con los consolidantes-hidrofugantes KSH (E) y TV+THL (F).

Figure 1.- Pore size distribution (mercury intrusion porosimetry) of (A) untreated sandstone samples (MB); and samples treated with: (B) consolidant TV; (C) consolidant KSOH; (D) water repellent THE; and the combination consolidant-water repellents (E) KSH; and (F) TV+THL.

en el consolidante a consecuencia de la evaporación del disolvente o del agua emulsionante del polímero (Figuras 2A, 2E y 2F).

Los resultados de las muestras tratadas con TV muestran que este consolidante crea más microporos que el KSOH (Tabla 1 y Figura 2B). Esta diferencia puede ser debida a una mayor fracturación del consolidante TV en el sistema poroso, tal como ha sido observado mediante microscopía electrónica.

Las muestras tratadas con el hidrofugante acuoso THE muestran escasos cambios en la distribución de poros (Figura 1D). Se ha producido una ligerísima disminución de los diámetros de los accesos a los poros y una pequeña disminución (1-2%) de la porosidad total y de la microporosidad. La curva de intrusión de mercurio sigue siendo unimodal y los histogramas muestran un despla-

microcracking, along with solvent evaporation or polymer dehydration (Figures 2A, 2E and 2F).

The results for the samples treated with TV show that this consolidant reduced porosity and created a larger quantity of micropores than KSOH, developments that went hand-in-hand with a significant decline in macroporosity (Table 1 and Figure 2B). The more extensive cracking of TV throughout the porous network -further to SEM observations- may account for the slight difference between the two consolidants.

The samples treated with the water repellent THE showed barely any change in pore size distribution (Figure 1D), with decreases recorded in the diameter of pore throats only. Slight declines (1-2%) were also found in total porosity and microporosity. The mercury intrusion curve

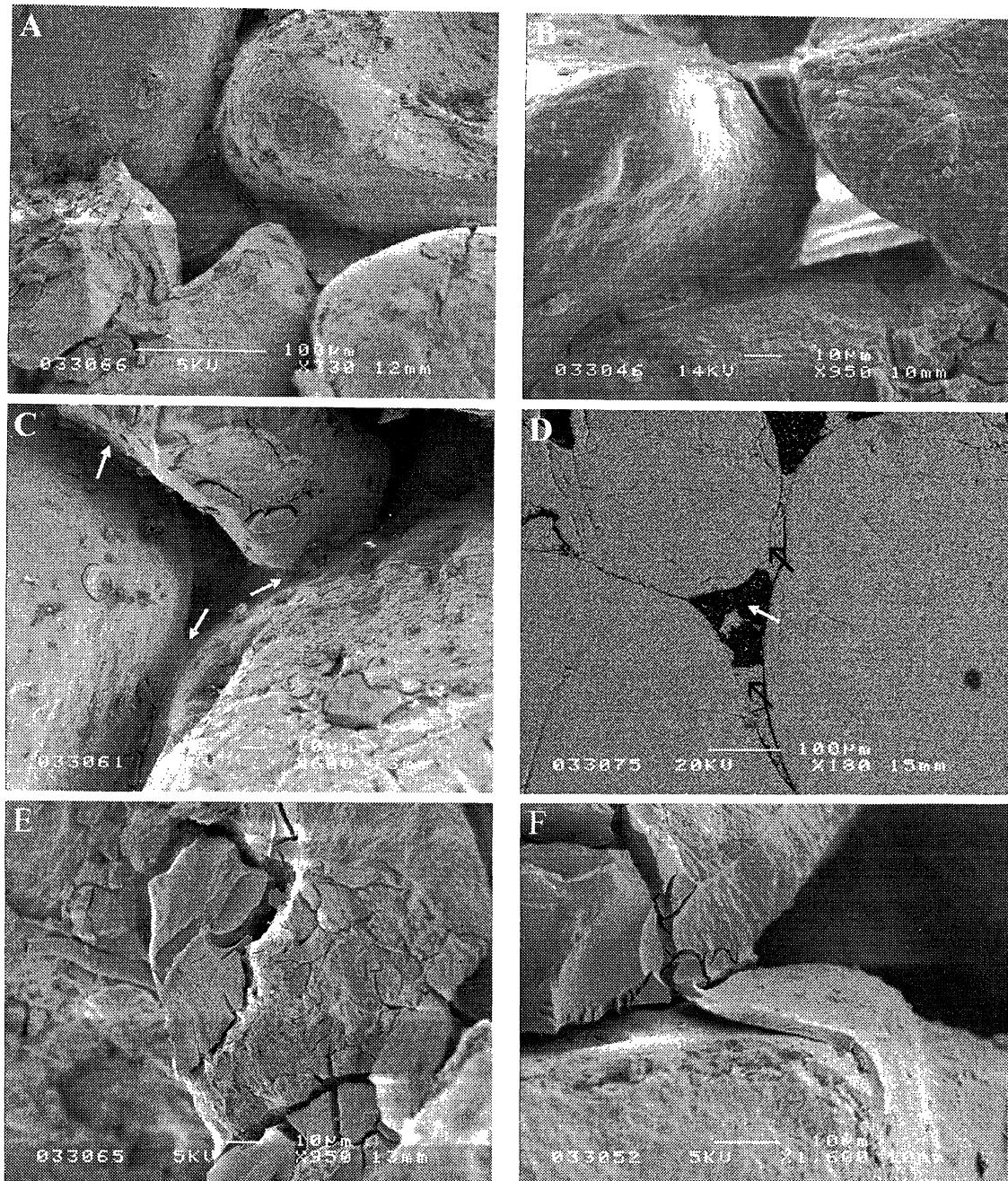


Figura. 2.- Aspecto de la arenisca tratada con productos consolidantes a base de silicato de etilo (TV y KSOH) por microscopía electrónica de barrido (MEB), incluyendo para su comparación una lámina delgada. (A) La mayor parte de la superficie de los granos de cuarzo está recubierta por una película de consolidante (KSOH) que presenta micro-fisuras. (B) Se observa cómo el consolidante (TV) cierra los accesos a los poros impidiendo la interconexión con la red porosa. (C) El consolidante (KSOH) se deposita en zonas de la estructura porosa con tamaños inferiores a 10 μm y reduce el diámetro del macroporo mediante la película que forma en la superficie de los granos. (D) Comparativamente se muestra en lámina delgada cómo el consolidante (KSOH) une los granos de cuarzo cerrando los accesos a los poros, que quedan aislados y se pierde la interconexión. (Flecha negra: consolidante; flecha blanca: poro aislado). (E) Detalle de las microfisuras del consolidante (KSOH). Estas microfisuras tienen un tamaño comprendido entre 1 y 7 μm . (F) Detalle del espesor de la película que ha formado el consolidante (TV) que puede llegar a 2 μm en las proximidades de las zonas de unión entre granos.

Figure. 2.- SEM images of sandstone treated with ethyl silicate consolidants (TV and KSOH) including a thin section preparation for comparison. (A) Most of the quartz grain surface covered by microcracked KSOH film. (B) Consolidant TV plugging pore throats and thus obstructing network interconnections. (C) Consolidant KSOH polymerising in throats with diameters <10 μm and reducing the diameter of the main pores with the film formed. (D) Thin section preparation illustrating the cementing of separate quartz grains by consolidant KSOH, which plugs the throats, isolating the pores and severing network interconnections. (Black arrow: consolidant; white arrow: isolated pore). (E) Detail of microcracks in consolidant KSOH, ranging in size from 1 to 7 μm . Detail of film formed by the consolidant TV, with a thickness of up to 2 μm around the areas where two grains meet.

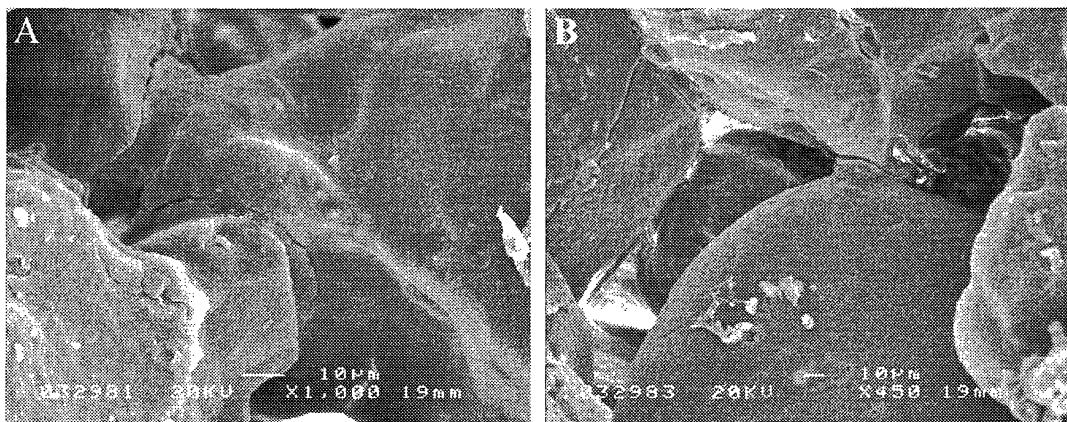


Figura 3.- Aspecto de la arenisca tratada con una emulsión acuosa de metilpolisiloxano (THE) como hidrofugante en el microscopio electrónico (MEB). (A) El hidrofugante (THE) forma una capa continua de recubrimiento. (B) La película de hidrofugante presenta buena adhesión a la superficie de los granos de cuarzo y forma puentes entre los más próximos ($< 3 \mu\text{m}$) sin afectar considerablemente al diámetro original del poro.

Figure. 3.- SEM images of sandstone treated with a water-based water repellent (demethylpolysiloxane TIIE). (A) Water repellent THE forming a continuous film. (B) Water repellent film adhering firmly to quartz grain surfaces and forming menisci in small interstices ($< 3 \mu\text{m}$) with no material effect on the original pore diameter.

zamiento de la moda del intervalo de 30-40 μm en la roca sin tratar (Figura 1A) hacia el intervalo 20-30 μm en la roca tratada. Esto es debido a que el hidrofugante forma una finísima película continua monomolecular (15) (Figura 3A) que recubre todos los granos, tapizando las paredes de los poros. Su pequeño espesor ha permitido que no se obstruyan los poros, ni que se vean reducidas significativamente sus dimensiones (Figura 3B). Por ello no se aprecian apenas cambios ni en la forma de la curva de su porosidad por intrusión de mercurio ni en los parámetros porométricos calculados. La disminución de la microporosidad se debe a que la película de hidrofugante cierra los poros inferiores a 3 μm .

En el caso de las muestras tratadas con el producto de doble efecto (KSM) y las tratadas mediante la aplicación sucesiva de consolidante más hidrofugante (TV+THL), los valores obtenidos son similares. En ambos casos, las variaciones observadas en relación con el sistema poroso son más parecidas a las obtenidas por los consolidantes puros, ya que el hidrofugante produce menos cambios en la red porosa.

3.2. Propiedades hídricas

Los parámetros más significativos que caracterizan el comportamiento hídrico de la roca (tratada y sin tratar) se presentan en la Tabla 2.

El contenido en agua crítico (W_c) de las muestras tratadas con silicato de etilo como consolidante (TV, KSOH) es bajo y similar al de la roca sin tratar (MB), lo que indica que tras el tratamiento de consolidación no se ha modificado de manera significativa la cinética de

was unimodal, whilst the histograms revealed a shift in the mode from 30-40 μm in the untreated samples (Figure 1A) to 20-30 μm in the samples treated with water repellent. The explanation for this shift is to be found in the monomolecular nature of the water repellent (15) (Figure 3A), which gives rise to a very thin, continuous film covering all the grains and lining the walls of the pores. This coat is too thin to plug the pores or even to significantly reduce their diameter (Figure 3B). As a result hardly any changes were detected in the shape of the mercury intrusion porosity curve or the porosimetric parameters calculated. Microporosity declined, on the contrary, because the water repellent filled the pores with diameters smaller than 3 μm .

The porosimetric variations recorded for the samples treated with the dual action KSH product and the specimens to which the water repellent THL was applied after treatment with consolidant TV were similar to one another as well as to the results found for the samples treated with consolidants only. This is because the water repellent component prompted less significant changes in the porous network, as noted above.

3.2. Hydric properties

Table 2 summarizes the chief parameters that characterise rock hydric behaviour.

The critical water content (W_c) of consolidant-treated samples (TV, KSOH) was low and similar to that obtained in the untreated samples (MB), confirming that rock desorption kinetics were not significantly modified by the

TABLA 2 / TABLE 2

Parámetros hídricos (valor medio) de la roca sin tratar y tratada con los diferentes productos consolidantes e hidrofugantes

Hydric parameters (mean value) obtained for untreated sandstone and sandstone treated with consolidants and water repellents

Muestra Sample	Ws (%)	Wc (%)	Se (%)	Si (%)	C.A.C. (W.A.C.) (Kg/m ² .s ^{1/2})	δ (10 ⁻⁹) (Kg/m.s.Pa)
MB	12.28	3.15	0.7	76.75	0.548	53.10
Desv. Est (Std. dev.)	0.87	1.23	0.66	6.75	0.21	12.3
TV	10.09	4.16	1.99	75.50	0.30	32.31
Desv. Est (Std. dev.)	0.86	1.31	0.88	5.09	0.11	8.22
KSOH	9.48	3.31	1.17	72.39	0.22	36.78
Desv. Est (Std. dev.)	0.68	1.10	0.58	3.61	0.16	6.42
THE	10.47	8.82	9.02	2.11	0.002	41.29
Desv. Est (Std. dev.)	1.16	1.35	1.31	0.49	0.0006	8.78
KSH	8.81	5.03	11.76	34.41	0.03	38.30
Desv. Est (Std. dev.)	0.90	0.54	0.87	1.80	0.01	1.51
TVTHL	9.24	6.38	11.33	4.57	0.003	30.69
Desv. Est (Std. dev.)	0.62	0.84	1.38	1.10	0.0005	5.64

Ws: contenido en agua a saturación obtenido al vacío / *Water saturation under vacuum*; Wc: Contenido en agua crítico / *Critical water content*; Se: Contenido en agua al final del proceso de desorción / *Final water content at the end of the dry process*; Si: Grado de saturación de agua obtenido por capilaridad / *Capillary saturation degree*; C.A.C.: Coeficiente de absorción capilar / *W.A.C.*: *Capillarity coefficient*; δ : Coeficiente de la permeabilidad al vapor de agua / *& Permeability coefficient*.

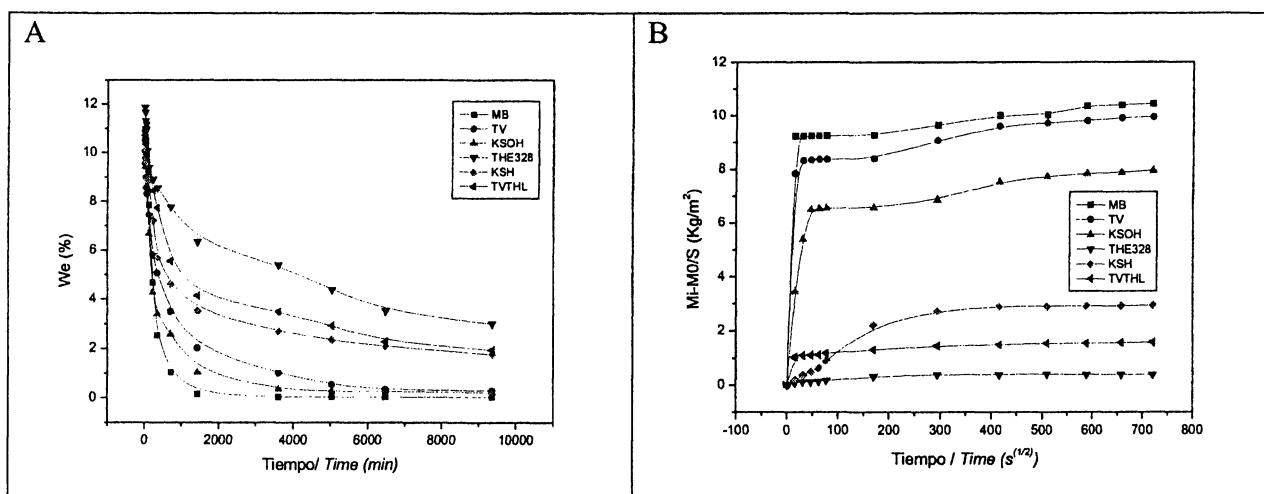


Figura 4.- Comparación de resultados de la roca sin tratar (MB) y tratada con cada producto. (A) Curvas de desorción. (B) Capilaridad (We: contenido en agua de la probeta).

Figure 4. Results for treated and untreated samples (MB). (A) Drying curves. (B) Capillarity curves (We: specimen water content).

desorción de la roca (Figura 4A). Esto se debe a que los consolidantes obstruyen los poros inferiores a 10 µm y la desorción sigue realizándose a favor de los macroporos. El incremento en la retención de agua (Se) se debe al aumento en la proporción de microporos.

El contenido en agua crítico (W_c) de las muestras tratadas con el hidrofugante THE es muy alto (8,82%) respecto a las muestras tratadas con los demás productos. Este valor corresponde al 85% de la cantidad de agua absorbida al vacío, que no ha podido llegar a la superficie, debido a la barrera química producida por el hidrofugante. Esta barrera rechaza el agua en forma líquida procedente del interior de la muestra, impidiendo así su llegada a la superficie de la roca y forzando la desorción del agua desde el interior en forma de vapor con una cinética mucho más lenta (Figura 5).

En el caso de la aplicación sucesiva del producto consolidante más el hidrofugante (TV+THL), el aumento significativo del W_c y de la retención de agua se debe, por un lado, al aumento de la microporosidad en la arenisca tratada respecto a la sin tratar, como consecuencia de la aplicación primera del consolidante y, por otro lado, a la barrera hidrorrepelente generada por la aplicación posterior del hidrofugante.

El contenido en agua crítico (W_c) de las muestras tratadas con el producto de doble efecto (KSH) es un poco más elevado que en las tratadas sólo con consolidante (Figura 4A). Este aumento es el resultado del efecto hidrofugante del producto, puesto que su distribución en el sistema poroso es muy similar a la de los consolidantes puros.

La disminución del coeficiente de absorción capilar (C.A.C.) en el caso de las muestras tratadas con silicato de etilo como consolidante, con respecto a las muestras sin tratar, se debe a la reducción de la porosidad total, al aumento de la microporosidad y a la disminución de la interconexión inicial del sistema poroso (Figura 2). En las muestras tratadas con KSH, la absorción de agua por capilaridad es más baja que en el caso de los consolidantes puros, ya que, se suman los dos efectos, la disminución de la porosidad y el carácter hidrorrepelente (Tabla 2 y Figura 4B).

Para las muestras tratadas con hidrofugante (THE) y con doble tratamiento de consolidación más hidrofugación (TV+THL), el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es muy bajo, con una absorción por capilaridad mínima (Figura 4B).

En cuanto a la permeabilidad al vapor se puede afirmar, que la aplicación de los tratamientos de consolidación con silicato de etilo y de hidrofugación con siloxanos disminuyen los valores de la arenisca sin tratar (Tabla 2). Los

consolidants (Figure 4A). This is because the consolidants, as discussed above, only plugged pores with diameters smaller than 10 µm, allowing drying to take place through the macropores, which remained essentially unchanged. The slight increase in water retention (Se) can be attributed to the micropores generated in the process.

Compared to samples treated with other products, the critical water content (W_c) of samples treated with water repellent THE was very high (8,82%), accounting for 85% of the water absorbed under vacuum conditions, i.e., the amount of water unable to penetrate the chemical barrier formed by the water repellent or, therefore, to reach the surface of the rock sample. This barrier repelled the liquid water migrating from the interior of the sample and prevented it from surfacing, thereby limiting the drying process to the -kinetically much slower- vapour phase (Figure 5).

Where samples were successively treated with a consolidant and a water repellent (TV+THL), the significant increase observed in W_c and water retention was due, on the one hand, to the enhanced microporosity of the treated compared to the untreated sandstone, and on the other to the water repellent barrier generated by the subsequent application of THL.

The critical water content (W_c) in the samples treated with KSH was slightly higher than in samples treated with consolidants only (Figure 4A). This may be attributed to the water repellent action of the product, since the distribution of this product in the pore network was similar to the distribution observed for the pure consolidants.

The application of ethyl silicate-based consolidants lowered capillary coefficient (W.A.C.) values due to the changes generated in the pore network: namely, the reduction of total porosity, the increase in microporosity and the loss of some of the initial interconnections in the pore network (Figure 2). Capillary absorption in the samples treated with KSH was lower than found for the specimens treated with consolidants alone, since KSH combines the effects of decreased porosity and reduced water influx (Table 2 and Figure 4B).

In samples treated with water repellent THE in conjunction with the consolidant (TV+THL), the capillary coefficient was very low, lower, in fact, than for any other treatment (Figure 4B).

The use of ethyl silicate consolidants and siloxane-based water repellents lowered the water vapour permeability coefficient with respect to the untreated samples. Consolidants KSOH and TV decreased vapour flows

consolidantes KSOH y TV aplicados rebajan el flujo de vapor (Tabla 2). En el caso del TV, esta disminución es algo mayor, sobre todo cuando se combina con el hidrofugante THL, debido a la mayor obstrucción de los poros producida por el consolidante. La mezcla KSH ha rebajado también el coeficiente de la permeabilidad al vapor pero en un grado algo menor al de los consolidantes. La aplicación de metilpolisiloxano en emulsión acuosa como hidrofugante (THE) ha mostrado los mejores resultados en los tratamientos estudiados, ya que, el coeficiente de la permeabilidad al vapor es el que sufre una disminución menor respecto al de las muestras sin tratar. Esto es debido al escaso cambio que produce este hidrofugante en la distribución de porosa de la roca (Figuras 2A y 2D).

3.3. Propiedades mecánicas

La variación de las propiedades mecánicas de las muestras tratadas con consolidantes y sin tratar se ha obtenido mediante la realización del ensayo de la resistencia a compresión y a la abrasión (Tabla 3).

Los resultados indican que las muestras tratadas con los productos consolidantes han adquirido, en general, una mayor resistencia a compresión y a la abrasión, debido al aumento de cohesión entre granos a causa de la polimerización del consolidante en la red porosa. Se puede observar que las muestras tratadas con el consolidante KSOH presentan los valores más altos de resistencia a compresión y a la abrasión. Valores similares, pero algo más bajos, se obtienen con el consolidante TV y, algo menores, con el producto KSH.

3.4. Alterabilidad

En el ensayo acelerado de cristalización de sales (9) de las muestras de arenisca con los consolidantes (KSOH y

(Table 2). The decrease was more acute in the case of TV, particularly when used in combination with water repellent THL, which plugged the pores. The KSH compound also lowered the water vapour permeability coefficient but not as drastically as the consolidants. The application of a water-based methylpolysiloxane emulsion (THE) yielded better results in this regard than any of the other treatments studied, inasmuch as the permeability coefficient under these conditions deviated less from the value of the coefficient for the untreated samples. This is due to the scant change induced by THE in both the pore size distribution and the porous network configuration of the rock (Figures 2A and 2D).

3.3. Mechanical properties

Compressive strength and abrasion resistance testing was deployed to measure the changes in the mechanical properties of the untreated and consolidant-treated samples (Table 3).

The results in Table 3 indicate that consolidant-treated samples attained higher compressive strength and abrasion resistance thanks to the greater stone cohesion generated by consolidant polymerisation in throats, which increased the number of inter-grain contacts. The highest compressive strength values were reached with consolidant KSOH, followed by TV and KSH in that order.

3.4. Durability

The consolidant-treated (KSOH and TV) sandstone samples underwent substantial weight loss in the salt

TABLA 3 / TABLE 3

Resistencia a la abrasión y a compresión de las muestras tratadas con diferentes consolidantes
(TV, KSOH y KSH) y sin tratar (MB)

*Mechanical properties of samples: untreated (MB) and treated with consolidants
(TV, KSOH and KSH)*

Propiedades mecánicas (Valor medio) <i>Mechanical properties (Mean value)</i>	MB	TV	KSOH	KSH
Desgaste lineal (mm) <i>Linear abrasion (mm)</i>	36.74	29.91	28.07	29.20
Desv. Est <i>Std. dev.</i>	1.74	0.91	0.87	1.24
Resistencia a compresión (MPa) <i>Compressive strength (MPa)</i>	19.85	33.65	37.58	28.95
Desv. Est <i>Std. dev.</i>	3.72	3.20	3.95	6.73

TV), la pérdida de volumen ha sido muy importante (Tabla 4). Esta pérdida de masa (ΔM), aunque es elevada, no obstante significa una mejoría importante con respecto a los resultados obtenidos con las muestras sin tratar, ya que, se desmoronaron por completo en el noveno ciclo (2).

Las diferencias de pérdida de peso entre el consolidante KSOH y el TV no son muy significativas debido a su similitud en la distribución en la red porosa y en su naturaleza química. Las muestras tratadas con estos consolidantes tienen la misma forma de alteración que la de las muestras sin tratar (arenización homogénea) (Figura 5A). Esto es debido a que los consolidantes no impiden totalmente la migración de la solución salina hacia la superficie a pesar de que haya una disminución general del tamaño de los poros y de la interconexión entre ellos, tal como indican los resultados de porosimetría de mercurio (Figura 1, Tabla 1) y los ensayos hídricos (Tabla 2). Cuando se aplica el producto de doble efecto (KSH) se observa una disminución importante en la pérdida de masa durante los ensayos con sales con respecto a las muestras sin tratar y a las tratadas con los consolidantes (Tabla 2).

crystallisation test (9) (Table 4). This loss of mass (ΔM), while high, nonetheless represented a significant improvement over the results obtained with untreated samples, most of which fell apart by the fourth cycle and all, even the most mechanically resistant specimens, disintegrated altogether at the end of the ninth cycle (2).

The differences in weight loss between the samples treated with KSOH and the specimens treated with TV were slight due to the similarities in their chemical nature and distribution within the pore network. The samples treated with these consolidants decayed in much the same way (homogeneous surface grain disintegration) as the untreated specimens (Figure 5A). The explanation for this behaviour is that they allowed the saline solution to migrate to the surface, despite the mercury intrusion porosimetry (Figure 1, Table 1) and hydric test (Table 2) findings that showed decreases in pore diameters and a loss of porous network interconnections. The weight loss in the KSH-treated samples, in turn, was smaller than in both the untreated samples and the specimens treated with other consolidants (Table 2). This may be due to the water

TABLA 4 / TABLE 4

Pérdida de masa (ΔM , %) (valor medio) en los cubos de arenisca tratados, después de nueve ciclos de cristalización de sales

Weight loss (ΔM ,%) (mean value) in treated sandstone after nine salt crystallization cycles

Muestras/ Sample	MB	TV	KSOH	THE	KSH	TV+THL
ΔM (%)	100	47.94	45.63	40.31	20.13	44.24
Desviación estándar Standard deviation	0.00	14.31	13.32	18.45	12.30	17.63

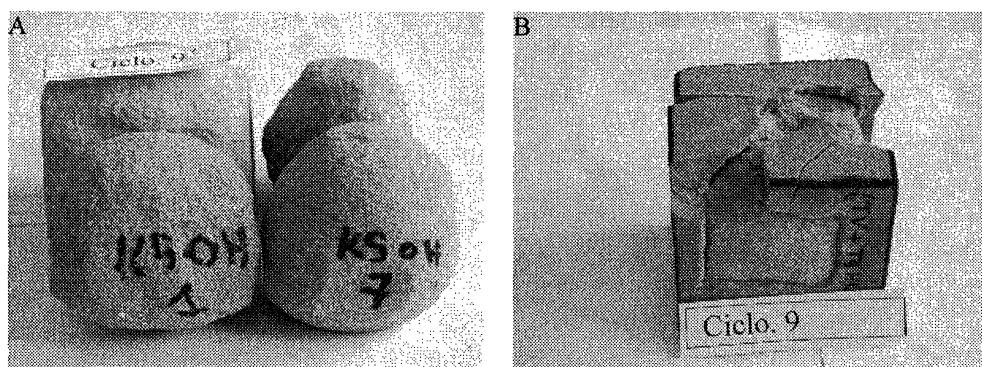


Figura 5.- Formas de alteración de la arenisca tratada con consolidante y consolidante + hidrofugante después de 9 ciclos de cristalización de sales. (A) Arenización (KSOH). (B) Desplacaciones (TV+THL).

Figure 5.- Forms of decay in sandstone treated with consolidant and with consolidant + water repellent after nine salt crystallization cycles. (A) Surface disintegration (KSOH). (B) Contour scaling (TV + THL).

Esto es debido a su efecto hidrofugante añadido, que limita la penetración de la solución salina en la roca. En este caso, la forma de alteración sigue siendo la arenización superficial (Figura 5A).

Las muestras tratadas con hidrofugantes, como el THE o con la combinación sucesiva de un consolidante más un hidrofugante (TV+THL), presentan otra forma de alteración tras el ensayo de cristalización de sales, consistente en la desplazación de las capas superficiales que contienen el tratamiento (Figura 5B) y según la profundidad de penetración alcanzada.

Esta capa externa tratada impide la difusión hacia la superficie de la fase líquida que contiene la solución salina y, aunque mantiene valores elevados en la permeabilidad al vapor (Tabla 2), éstos son menores respecto a la muestra sin tratar y a las zonas internas, donde no ha llegado el producto. Así, la solución salina tiende a concentrarse en la interfase muestra tratada / muestra sin tratar y al precipitar las sales se generan tensiones capaces de desprender esta capa externa.

Los valores de la resistencia mecánica a compresión de las muestras tratadas con consolidantes y alteradas artificialmente, mediante ciclos de cristalización de sales, muestran la falta de eficacia de los consolidantes ante este tipo de ataque salino (Tabla 5). A ello contribuyen dos efectos:

- La tensión interna generada por la cristalización de las sales solubles. Especialmente, en el caso del sulfato de sodio por su efecto disruptivo, puesto que es superior a la cohesión de los granos de la arenisca, conseguida por los consolidantes.
- La microporosidad generada por la aplicación de los consolidantes y su microfisuración (Tabla 1), que hace que la roca sea más vulnerable a la acción de las sales (16) y (17), por lo que el aumento obtenido en la resistencia mecánica se ve contrarrestado por este efecto negativo.

repellent component of this product, which restrains the uptake of the saline solution and therefore limits grain disintegration. In this case, decay also adopted the form of surface grain disintegration (Figure 5A).

In the samples treated with water repellents such as THE or the combination of a consolidant followed by a water repellent (TV+THL), decay consisted in contour scaling of the treated layers (Figure 5B), i.e., to a depth that depended on how deeply the product had penetrated the rock.

The water repellent-treated outer layer prevented the saline solution from rising to the surface, where permeability coefficient values, while high (Table 2), were nonetheless lower than observed in the untreated samples or the inner areas of the stone, likewise untouched by the product. As a result, the saline solution tended to accumulate and the salts to crystallise along the interface between the treated layer and the rest of the sample. The stress induced by subsequent salt hydration caused contour scaling.

The compressive strength values of consolidant-treated samples artificially aged by means of salt crystallisation cycles showed that the consolidants were unable to protect the stone from such saline attacks (Table 5). This was the result of two effects:

- The internal stress generated by salt -particularly sodium sulphate- crystallisation, whose degenerative effect outpaced the sandstone particle cohesion induced by the consolidant.*
- The microporosity generated by the consolidants (Table 1) that made the rock more vulnerable to salt action (16) and (17), offsetting the beneficial effect of enhanced mechanical strength.*

TABLA 5 / TABLE 5

Resistencia a compresión de las probetas de arenisca sin tratar (MB), con los tratamientos de consolidación (TV y KSOH) y consolidación e hidrofugación (KSH), tras el ensayo acelerado de cristalización de sales

Compressive strength of untreated (MB), consolidant-treated (TV and KSOH) and consolidant- plus water repellent-treated (KSH) samples after salt crystallization

Resistencia a compresión (MPa) <i>Compressive strength (MPa)</i>	MB	TV	KSOH	KSH
Muestras después del ensayo <i>Sample after testing</i>	8.98	12.64	11.95	14.65
Desviación estándar <i>Standard deviation</i>	0.78	1.79	0.18	0.80

4. CONCLUSIONES

Los tratamientos de la arenisca con productos organosilíicos consolidantes e hidrofugantes afectan a su estructura porosa, produciéndose, en todos los casos, una disminución de la porosidad total. Al aplicar los productos consolidantes, tipo silicato de etilo (TV, KSOH), o aquellos productos de doble efecto (consolidación e hidrofugación), como los siloxanos (KSH, TV+THL), se produce una disminución significativa de la macroporosidad (diámetro de poro $>15\text{ }\mu\text{m}$) y un incremento de la microporosidad (diámetro de poro $<15\text{ }\mu\text{m}$). Esto es debido a que el consolidante se distribuye sobre los granos de la arenisca de forma discontinua, produciéndose mayores concentraciones del mismo en los estrechamientos de la red porosa, lo que llega a obstruir el acceso a los poros de menor tamaño (diámetro de poro $<10\text{ }\mu\text{m}$). La aplicación de un tratamiento de hidrofugación con metilpolisiloxano en emulsión acuosa (THE) afecta en menor medida a la estructura porosa original de la arenisca, debido a que forma una fina capa, que tapiza la superficie de los granos, y que cierra los poros inferiores a $3\text{ }\mu\text{m}$, por lo que disminuye ligeramente la porosidad total y la microporosidad.

– Las muestras de arenisca tratadas con productos con efecto **consolidante** a base de silicato de etilo (TV y KSOH) mejoran sus prestaciones mecánicas (resistencia a la abrasión y resistencia a compresión), y proporcionan una moderada mejoría de la resistencia a la acción de las sales solubles. Con estos productos se rebaja la absorción de agua por capilaridad, sin afectar significativamente la cinética de la desorción de agua, y se reduce la permeabilidad al vapor en la arenisca tratada.

Los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre muestras tratadas con consolidantes, después de los ensayos acelerados con solución de sulfato de sodio, muestran que las muestras tratadas disminuyen notablemente su resistencia mecánica tal como ocurría con las muestras sin tratar, por lo que no se consigue conservar la mejora en la resistencia mecánica, adquirida inicialmente al aplicar el tratamiento de consolidación.

– El **hidrofugante** constituido por metilpolisiloxano en emulsión acuosa (THE) proporciona una buena protección contra la absorción de agua, disminuyendo la permeabilidad al vapor, en menor proporción, que el resto de los tratamientos, ya que este producto sólo modifica levemente la configuración de la red porosa de la arenisca. Sin embargo, los resultados obtenidos por el ensayo acelerado de cristalización de sales no son satisfactorios, ya que se producen fuertes desplazaciones.

– Al aplicar sucesivamente el **consolidante** y el **hidrofugante** (TV+THL), según las condiciones del ensayo acelerado, también se originan desplazaciones.

4. CONCLUSIONS

Organosilicate consolidants (KSOH, TV) and water repellents affect the porous network of sandstones, moderately reducing total porosity. Macroporosity (pore diameter $>15\text{ }\mu\text{m}$) declines significantly, while microporosity (pore diameter $<15\text{ }\mu\text{m}$) rises with the application of ethyl silicate-type consolidating substances (TV, KSOH) or dual action (consolidation and water repellence) products such as siloxane-based compounds (KSH, TV+THL). This is because the consolidant covers the grain surfaces discontinuously, with the film accumulating in and around the throats (when grains are very close) and plugging very small pores and throats (diameter $<10\text{ }\mu\text{m}$). The original configuration of the pore network is less impacted when the samples are treated with a water-based methylpolysiloxane (THE) water repellent, which forms a very thin, continuous film over the grains, plugging only the pores with diameters smaller than $3\text{ }\mu\text{m}$. The result is a slight decline in both total and micro-porosity.

*- KSOH and TV -ethyl silicate **consolidants**- improve mechanical strength (compressive strength and abrasion resistance) and also afford moderate protection from the action of soluble salts. These products lower capillarity absorption with no significant impact on drying process kinetics, while reducing vapour permeability in the treated sandstone.*

The results of the mechanical tests conducted on consolidant-treated samples after artificial ageing with sodium sulphate are similar to the values obtained for the untreated samples. In the presence of salts, therefore, these consolidants are unable to maintain the initial improvements in mechanical performance.

- Since the aqueous methylpolysiloxane (THE) water repellent does not modify the configuration of the porous system, it provides effective protection from water absorption with no adverse effect on the water vapour permeability coefficient of the stone, contrary to the behaviour observed for the other products tested. THE does not protect the stone from weathering, however, as the unsatisfactory results of the artificial ageing tests (contour scaling) attest.

*- The successive application of a **consolidant** and a **water repellent** (TV+THL) is likewise unable to afford protection from salt action, as contour scaling is also observed under these conditions.*

- El producto de doble efecto (KSH) con **consolidante** (silicato de etilo) e **hidrofugante** (siloxano) refuerza la resistencia mecánica de la roca de una manera similar a la conseguida por los consolidantes de silicato de etilo. Además, este producto proporciona una buena protección contra la absorción de agua y contra la acción de sales sin provocar desplazaciones, aunque se produce una gran pérdida de masa durante los ciclos de cristalización de sales. Sin embargo, se considera que la aplicación del KSH proporciona mejores resultados que la aplicación, por separado, de los otros consolidantes estudiados de composición similar (silicato de etilo) (KSOH, TV) o del hidrofugante (THE) con metilpolisiloxano.

La investigación realizada pone de manifiesto que los tratamientos aplicados a la arenisca, utilizada en la construcción de diversos monumentos del Patrimonio de Túnez, como el acueducto romano de Zaghouan-Cartago, son eficaces en su función de consolidantes e hidrofugantes. Sin embargo, no proporcionan durabilidad a la arenisca tratada cuando existe transporte y cristalización interna de sales, según las condiciones establecidas en el ensayo acelerado con sulfato de sodio propuesto por RILEM (9), produciéndose dos formas de alteración preferentes: desplazaciones, con los hidrofugantes y arenización superficial, con los consolidantes.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) D. Gómez-Gras, K. Zoghlami: *Procedencia de las arenas de la unidad superior de la Fm. Fortuna en el NE de Túnez*. Geotemas, 5 (2003), pp 109-111.
- (2) K. Zoghlami, D. Gómez-Gras, A. Álvarez, M.P. de Luxán: *Factores intrínsecos que condicionan el comportamiento físico y la alterabilidad de las arenas miocénicas utilizadas en la construcción del acueducto romano de Zaghouan-Cartago*. Mater Construcc, Vol. 54, n.º 276 (2004), pp. 29-41.
- (3) F. García Garmilla, I. Rodríguez-Maribona, M. Cano, M. Zalbide, J. A. Ibáñez-Gómez, E. Osa-Chans, S. Garin: *Comparación analítica de dos consolidantes comerciales aplicados en arenas eocenas de monumentos de los siglos XVI y XIX en San Sebastián (norte España)*. Mater Construcc, Vol. 52, n.º 266 (2002), pp. 5-18.
- (4) G. Wheeler: *Comparative strengthening of several consolidants on Wallace sandstone and India limestone*. Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration of Stone, Lisbon, Portugal, Vol. 3 (1992), pp. 1033-1042.
- (5) R. M. Esbert: *Utilización de protectores superficiales para la conservación de la piedra: situación actual en España*. Mater Construcc, Vol. 43, n.º 229 (1993), pp. 5-16.
- (6) R. Villegas Sánchez, J. F. Vale Parapar: *Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras de catedrales andaluzas. III.- Ensayo de alteración acelerada en atmósfera contaminada*. Mater Construcc, Vol. 43, n.º 232 (1993), pp. 25-38.
- (7) R. Villegas, L. Martín, J. F. Vale, M. A. Bello: *Caracterización y conservación de la piedra usada en la catedral de Granada, España*. Mater Construcc, Vol. 45, n.º 240 (1995), pp. 17-36.
- (8) T. Rivas, B. Silver y B. Prieto: *Medida de la eficacia de dos hidrofugantes aplicados a rocas graníticas*. Mater Construcc, Vol. 48, n.º 249 (1998), pp. 5-24.
- (9) RILEM 25-PEM: *Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement*. Matériaux et constructions, Vol. 13 (75), 1980, pp. 175-253.
- (10) NORMAL 11/85: *Assorbimento d'acqua per capillarità*. CNR-ICR. Roma, 1985.
- (11) NORMAL 29/88: *Misura dell'indice di asciugamento (drying index)*. CNR-ICR. Roma, 1988.
- (12) NORMAL 7/81: *Assorbimento per immersione totali. Capacità di imbibizione*. CNR-ICR. Roma, 1981.
- (13) Norma UNE-EN 1926, 1999: *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión*.
- (14) Norma UNE-EN ISO 10545-6, 1995: *Determinación de la resistencia a la abrasión*.
- (15) L. Lazzarini y M. Laurenzi Tabasso: *Il restauro della pietra*. p. 320, Ed. CEDAM. Padova, 1986.
- (16) W. H. Dukes: *Conservation of Stone: Chemical Treatments. The Architects' Journal Information Library* (1972), pp. 433-438.
- (17) P. P. Hudec: *Rock Weathering on the Molecular Level. Decay and Preservation of Stone*, Engineering Geology Case Histories, n.º 11 (1978), pp. 47-51. Winkler Ed. The Geological Society of America, Boulder.

- *The dual action (ethyl silicate consolidant and siloxane water repellent) product, KSH, induces much the same improvement in stone mechanical strength as the consolidants. And this product provides fairly good protection from salt attack, preventing contour scaling, although a significant loss of mass is recorded during the salt crystallisation process. It may be concluded, moreover, that applying KSH is more effective than the separate application of the other consolidants with a similar composition (ethyl silicate) (KSOH, TV) or the methylpolysiloxane water repellent studied.*

The survey reported here shows, finally, that the treatments applied to the sandstone used to build a number of Heritage Monuments in Tunisia, including the Roman aqueduct at Zaghouan-Carthage, are effective as consolidants and water repellents. They do not enhance the durability of the stone treated, however, in the presence of internal salt transport and crystallisation processes. Under the artificial ageing test conditions recommended by RILEM (9), two forms of decay are induced: contour scaling in water repellent-treated rock and surface disintegration in consolidant-protected stone.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Monográfico dedicado al VIDRIO EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (Nº 242/243) a un solo material: *El vidrio*.

Haciéndose eco del creciente interés que suscitan las investigaciones e innovaciones sobre los productos derivados del vidrio, este material se trata, por primera vez en la Revista, de forma monográfica, con la amplitud que permite un número especial.

Los distintos artículos que componen este número son muestra de la gran variedad de características, propiedades y aplicaciones bajo las que se presentan los derivados del vidrio. Entre sus usos más comunes se encuentran: elementos transparentes de cerramientos, materiales estructurales en las fachadas, aislamientos de muros y cubiertas, recubrimientos de pisos y paredes, componentes de refuerzo de placas,

paneles, morteros y hormigones, como material decorativo y estético. Hoy en día, el vidrio es un material indispensable en la construcción y su tecnología está en continua evolución para dar respuesta a la constante demanda de nuevos productos con carácter multifuncional.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos que cubren una temática muy diversa dentro de los materiales vítreos destinados o aplicados en construcción. Aparecen artículos relacionados con las vidrieras artísticas, los acristalamientos, los vidrios funcionales, las fibras de refuerzo, los vitrocerámicos y los porcelanatos. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en sus respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- Procesos de alteración de las vidrieras medievales. Estudio y tratamientos de protección.
(Alteration processes of medieval stained glass windows. Study and protection treatments).
J. Mª Fernández Navarro.
- El efecto de la corrosión en vidrieras coloreadas.
(The effect of corrosion of stained glass windows).
J. Leissner.
- Formulación de vidrios absorbentes del calor.
(Formulation of heat absorbing glasses).
P. Álvarez-Casariego y P. Mazón.
- Dimensionamiento de placas de acristalamiento para edificios mediante un modelo probabilístico de rotura.
(A probabilistic model for failure design of glass plates in building).
A. Fernández Canteli, I. Viña y A. Bernardo Sánchez.
- Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento obtenidas a partir de basaltos canarios.
(Characterization of fibers as rockwool for insulation obtained from canary islands basalts).
J. M. Cáceres, J. E. García Hernández y J. Mª Rincón.
- El GRC: Material compuesto de matriz inorgánica reforzado con fibras de vidrio AR.
(GRC: Composite material from an inorganic matrix reinforced with ar glass fibres).
P. I. Comino.
- Los materiales vitrocerámicos en la construcción.
(Glass-ceramic as building materials).
J. Mª Rincón y M. Romero.
- Gres porcelánico: Aplicaciones arquitectónicas, procesado y propiedades fisico-mecánicas.
(Porcelainized stoneware: Architectural, processing and physico-mechanical properties).
T. Manfredini, M. Romagnoli y J. Mª Rincón.

Venta de ejemplares: Distribución de Publicaciones
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
Serrano Galvache, s/n - 28033 Madrid.
Tfno.: (91) 302.04.40 - Fax: (91) 302.07.00