

Respuesta de diversos tratamientos de conservación en la arenisca del Real Monasterio de Santa María de Sijena, Huesca.

Efficacy of several organic products for the treatment of sandstone at the Real Monastery of Sijena (Huesca)

M.P. Lapuente Mercadál y L.F. Auqué Sanz

Departamento de Ciencias de la Tierra (Petrología y Geoquímica). Fac. Ciencias. Universidad de Zaragoza. 50.009 Zaragoza.

ABSTRACT

The aim of this paper is to test the effectiveness of certain methods of consolidation in sandstones of different grades of damage. Three organic silicon compounds in different concentrations were applied by spraying. Treated and untreated samples were examined by SEM in order to observe the products of polymerization. Laboratory tests were performed and a comparison of consolidated and original stone has shown that some physical properties have been improved, particularly the reduction of capillarity suction and water absorption. A crystallization test points out the efficacy of the treatments.

Key words: *Petrophysical properties, stone decay, stone conservation*

*Geogaceta, 34 (2003), 75-78
ISSN:0213683X*

Introducción

Este trabajo se enmarca en las investigaciones multidisciplinarias que se han realizado recientemente con objeto de proceder a la conservación y restauración del Real Monasterio de Santa María de Sijena (Huesca). Este conjunto se levantó, a finales del siglo XII, utilizando una piedra arenisca local como soporte de sus muros. Petrográficamente se trata de una litoarenita calcárea miocena (Ageniense-Aragoniense). El estado de conservación de este conjunto histórico es bastante ruinoso, en especial su claustro y dependencias anexas. Del análisis de las formas de alteración y del estudio de los procesos de interacción agua-roca se concluye que uno de los principales responsables de su degradación progresiva es la haloclastia. Las especiales características ambientales e hidrogeológicas del entorno, con un freático a escasos centímetros de la superficie, agravan los procesos asociados a la precipitación de sulfatos sódicos, causantes del marcado deterioro que afecta a los sillares del zócalo de los muros.

Con el objeto de proponer la actuación restauradora más adecuada se estudió la relación entre las propiedades físicas de las rocas y los fenómenos de alteración observados en ellas, realizando ensayos de caracterización petrofísica y de envejecimiento artificial acelerado (Esbert *et al*, 1984).

Metodología

Se elaboraron probetas cúbicas de 5 cm de arista, cilíndricas con un diámetro de testigo de 7 cm y otras paralelepípedas de altura variable entre 7 y 20 cm. En algunas de ellas se dejó, al menos, una cara con su superficie natural erosionada para observar su aspecto tras el ensayo correspondiente. Se rotularon todas las aristas, se midieron, pesaron, siglaron y fotografiaron todas las probetas antes y después de los ensayos. Se aplicaron diversos tratamientos de consolidación e impermeabilización.

Se utilizaron dos productos consolidantes: Tegovakon y Stone-C, además del hidrofugante Imperchem-P. Según la empresa que los comercializa el Tegovakon es un agente consolidante elaborado con un éster de sílice y metilsiloxano. Sus características técnicas son: densidad de 0.95 ± 0.02 g/cm³ a 25°C; color incoloro a ligeramente amarillo, transparente. Sus componentes son sustancias activas compatibles con los materiales de obra y es recomendado para rocas erosionadas con desprendimientos arenosos.

Stone-C es un producto consolidante de nueva generación de bajo peso molecular, óptimo para cualquier tipo de material mineral de construcción que sea absorbente.

Imperchem-P es un líquido incoloro basado en silanos/siloxanos destinado a la protección hidrófuga de edificios de piedra natural o artificial.

Se separaron tres grupos de probetas a las que se les aplicaron los tratamientos que denominamos A, B y C (en distintas proporciones) y otros dos grupos, uno sin ningún tipo de tratamiento (para realizar comparaciones) y otro al que solo se pulverizó con hidrofugante con objeto de comprobar su eficacia.

En el tratamiento A, las muestras se trataron con una solución del 16% de Tegovakon y 84% de disolvente (agua desionizada). Se realizaron, a intervalos de 30 minutos, tres aplicaciones con pulverizador a pistola, bajo campana extractora y, una vez secas, se aplicó el hidrofugante por pulverización.

En el tratamiento B se aplicó el mismo consolidante, pero con una mayor concentración, al 50%, y siguiendo las mismas pautas anteriores.

En el tratamiento C se utilizó el consolidante Stone-C en una proporción semejante al primer caso (16% del producto) y 84% de disolvente (agua destilada). Igualmente se dieron 3 aplicaciones con pulverizador a pistola y una última con el hidrofugante.

Se controló el cambio de color al realizar las aplicaciones anteriores y se comprobó el poder de penetración de los productos añadiendo, a una tanda de muestras, un tinte azul de metileno. Se tomaron fotografías de las probetas, antes y después de ser aplicados los productos, y se sacaron pequeñas muescas de una misma muestra tratada con los distintos productos, con objeto de ser observadas

al microscopio electrónico de barrido (MEB).

Los análisis de MEB se realizaron en el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Zaragoza con un equipo Jeol JSM 6400 con sistema de microanálisis por Rayos X (eXL-10) de LINK ANALYTICAL. Las muestras fueron cubiertas previamente con una película de Au, se usó un voltaje de aceleración de 20 kV y las imágenes se tomaron en modo SE (electrones secundarios).

Se realizaron dos tipos de ensayos petrofísicos: los necesarios para definir la estructura y propiedades hídricas (densidad, porosidad, capilaridad, capacidad de absorción de agua) y ensayos de alterabilidad o ciclos de envejecimiento artificial (humedad-sequedad y cristalización de sales) en los que se usaron probetas tanto sin tratar como con tratamientos distintos. Para el test de haloclastia se tomaron muestras de la parte inferior y superior de un mismo sillar, además de una muestra interna extraída mediante testigo. Se siguieron las normas sugeridas por el Comité de Estandarización de Ensayos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.

Cambios experimentados después de los tratamientos y previos a la realización de los ensayos

El color general de la roca varía en torno a un marrón amarillento (Munsell,

10YR 5/4). En general, las muestras tratadas con A no presentaron cambios de color significativos o solo se modificó hacia colores más puros (valor más alto de saturación). Con el tratamiento B se produjeron los cambios más acusados e incluso algunas muestras reaccionaron con el consolidante, dejando una película blanca adherida en la primera aplicación. El tratamiento C no indujo cambios o, como mucho, los tonos se hicieron ligeramente "más vivos". La aplicación del hidrofugante no modificó el color.

Tras los tratamientos A y C, las muestras en general están más consolidadas, aunque las que presentaban un avanzado estado de arenización siguen desprendiendo arena. Al aplicar el tratamiento B, la consolidación es total en todas ellas.

En cuanto al poder de penetración, tras la observación en corte fresco de las muestras tratadas con colorante, es similar con todos los tratamientos. Con las aplicaciones dadas y el sistema utilizado (pulverización manual a pistola) no supera el milímetro de espesor.

Cambios observados bajo microscopio electrónico de barrido (MEB)

Se evaluó el grado de penetración de los distintos tratamientos y se examinaron los productos de reacción entre los productos orgánicos añadidos y el soporte mineral de la roca. Para ello se tomaron

pequeñas porciones de una misma muestra (RMS-2) sometida a los distintos tratamientos.

En la figura 1 se han recogido diversas observaciones bajo MEB de la morfología superficial de las probetas tratadas y sin tratar. Su observación conjunta ayuda a comparar el desarrollo y distribución del consolidante en cada muestra. En la imagen 1 se observa la textura general de la roca sin ningún tratamiento, su porosidad, el relieve morfológico de los clastos, la matriz arcillo-micácea y los cristales de calcita del cemento. Las imágenes 2 y 3 muestran la misma roca con el tratamiento A. Se observa el producto de reacción en forma de agregados microgranulares que se desarrollan tapizando la mayoría de los granos y rellenando la porosidad. Los componentes elementales principales son Si, K y Ca.

Las imágenes 4, 5 y 6 corresponden a la misma muestra tratada con B. La mayor concentración de consolidante en la solución aplicada ha provocado el relleno casi completo de la porosidad de la roca y tan solo quedan algunos vestigios de clastos sin cubrir, como los cuarzos que se detallan en la imagen 4. El consolidante presenta una textura microporosa (imagen 5) y es el responsable de la coloración blanquecina que toma la muestra. El hidrofugante ha reaccionado sobre la superficie tratada desarrollando en algunas zonas incipientes cristales subsféricos (imagen 6).

PROPIEDAD	ARENISCA de SIJENA	PROPIEDAD	ARENISCA de SIJENA
Densidad real	2,378 g/cm ³	Índice de vacíos (Iv) a 1 hora	6,325 %
Densidad aparente	2,054 g/cm ³	Iv con tratamiento A	2,745 %
Porosidad abierta	13,6 %	Iv con tratamiento B	2,944 %
Porosidad total	13,6%	Iv con tratamiento C	0,729 %
Coefficiente C Capilaridad (media de 18')	7,874 kg/m ² xh ^{1/2}	Índice de absorción (W) a 48 h	6,395 %
Coefficiente C con hidrofugante (18')	0,226 kg/m ² xh ^{1/2}	W con tratamiento A	5,279 %
Coefficiente C con hidrofugante (1 semana)	0,867 kg/m ² xh ^{1/2}	W con tratamiento B	4,690 %
		W con tratamiento C	5,555 %
Coefficiente A de Penetración agua (18')	7,761 mm/min ^{1/2}	Índice de saturación (Is) a 192 horas	7,062 %
Coefficiente A con hidrofugante (18')	0,253 mm/min ^{1/2}	Is con tratamiento A	6,722 %
		Is con tratamiento B	5,888 %
		Is con tratamiento C	6,042 %
15 ciclos humedad-sequedad (%pérdida peso)	1,164 %	TESTIGO 4º Ciclo cristaliz. sales (%) peso	-0,72 %
15 ciclos con tratamiento A	0,42 %	TESTIGO con tratamiento A	-0,93 %
15 ciclos con tratamiento B	0,93 %	TESTIGO con tratamiento B	32,05%
15 ciclos con tratamiento C	0,755 %	TESTIGO con tratamiento C	-0,53 %
INF 4º Ciclo cristaliz. sales (%) peso balance	13,97 %	SUP 4º Ciclo cristaliz. sales (%) peso balance	-0,76 %
INF con tratamiento A	0,56 %	SUP con tratamiento A	0,53%
INF con tratamiento B	0,11 %	SUP con tratamiento B	0,07 %
INF con tratamiento C	1,72 %	SUP con tratamiento C	-1,19 %

Tabla I.- Resultados de los ensayos en las probetas tratadas y sin tratar

Table I.- Results of tests on treated and untreated samples

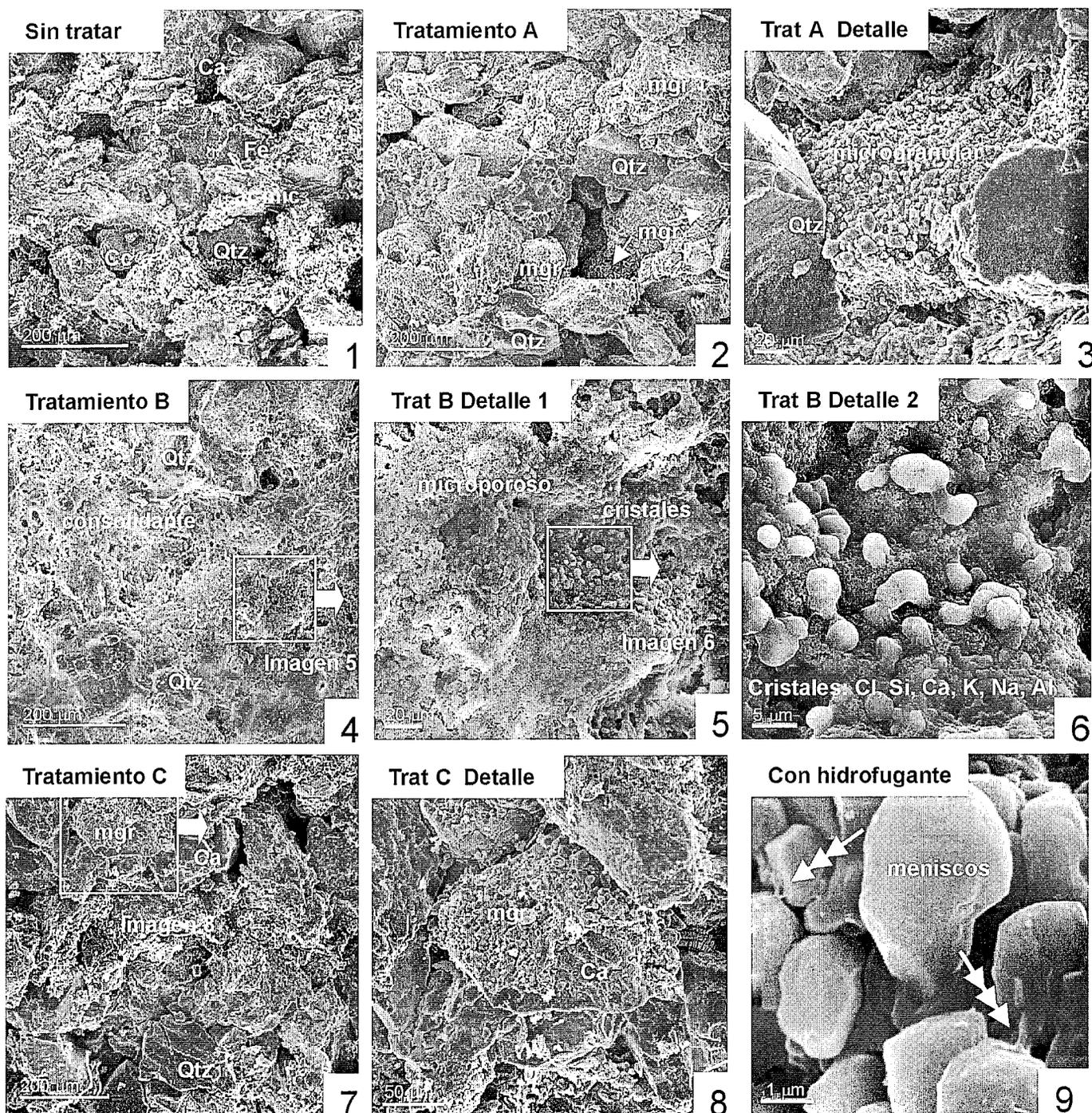


Fig. 1.- Imágenes de microscopio electrónico de barrido de la superficie de la muestra RMS-2 sin tratar y con diversos tratamientos. Cc: cemento de calcita; Ca: calcita detrítica; Qtz: clasto de cuarzo; Arc-mic: matriz arcillo micácea; Fe: óxidos de hierro; mgr: agregado microgranular.

Fig.1.- SEM images of untreated and treated surfaces from the RMS-2 sample. Cc: calcite cement; Ca: detrital calcite; Qtz: detrital quartz; Arc-mic: micaceous clay matrix; Fe: iron oxide; mgr: microgranular aggregate.

En las imágenes 7 y 8 se observa el aspecto de la muestra después de ser tratada con C. El aspecto morfológico es muy semejante al desarrollado con el tratamiento A, aunque el agregado microgranular no se distribuye tan uniformemente, dejando algunos clastos con zonas sin cubrir, como el que se muestra en la imagen 8.

La aplicación aislada del hidrofugante origina microagregados que coalescen

mediante la unión con meniscos como los que se muestran en la imagen 9.

De la comparación entre el aspecto de los tratamientos A, B y C cabe destacar la semejanza entre A y C en cuanto al grado de penetración y relleno de porosidad. A priori, por el grado de homogeneidad del producto de reacción, el tratamiento más efectivo podría ser el A, cuestión a verificar tras el resultado de los ensayos. En cuanto al hidrofugante parece quedar

bien impregnado y no presenta tampoco problemas de cambios de coloración.

Valoración de los ensayos de alterabilidad y respuesta de los distintos tratamientos de conservación aplicados

En la Tabla I se recogen los resultados de los ensayos petrofísicos realizados para la misma muestra.

El hidrofugante utilizado ha resultado ser muy eficaz especialmente frente a los problemas ocasionados por la succión por capilaridad, reduciéndose el valor de este Coeficiente C en torno al 71% y el del coeficiente A, de penetración de agua, en un 67%. Su eficacia ha sido probada a largo plazo, manteniéndose valores mínimos y muy estables, en el test de una semana.

En relación con el test de capacidad de absorción, las probetas sin tratar proporcionaron valores muy altos en su contenido en agua en una hora (en torno al 89%) en comparación con su índice de saturación; los mejores resultados los obtuvieron las muestras tratadas con C, especialmente porque se retarda la absorción rápida (test de 1 hora) de estas rocas, reduciendo el valor de I_v en torno al 90%. Sin embargo, ni con este tratamiento ni con los otros ensayados se logra disminuir su capacidad de absorción a largo plazo, ya que en el test a las 48 horas ya iban recuperando su poder de saturación, estabilizándose con una absorción lenta y reduciendo tan solo un 15% de su índice de saturación, tanto para las muestras tratadas con A como con C. Por otra parte, resulta interesante comprobar que aunque en las probetas tratadas se reduce la capacidad de absorción rápida de agua, presentan una recuperación en la tendencia a captarla, lo que indica la presencia de porosidad abierta, a pesar del consolidante utilizado.

Es destacable que la arenisca de Sijena no es muy vulnerable al ensayo cíclico de humedad-sequedad que apenas causa deterioro visible. Después de ensayar 15 ciclos con agua destilada, los porcentajes de pérdida en peso no llegan, ni en los casos más desfavorables, al 2%.

No obstante, con los tratamientos realizados se obtuvieron mejores resultados, mejorando un 64% con A y un 36% con C.

El test de envejecimiento por cristalización de sales resultó más espectacular, y puso de manifiesto, sin duda, cual es el principal agente de deterioro en las areniscas del Monasterio. Las probetas sometidas a este ensayo se desmoronan rápidamente, apreciándose los primeros indicios ya en los primeros ciclos. Las muestras no tratadas acentúan su deterioro original con el desarrollo de formas de alteración a favor de las discontinuidades e inhomogeneidades preexistentes.

Después del cuarto ciclo fue necesario finalizar el ensayo, sin poder proceder a eliminar las sales de las probetas, debido al avanzado estado de deterioro de algunas de ellas. En la misma muestra se ensayó con tres tipos de probetas: las correspondientes a la zona inferior del sillar (en avanzado estado erosivo), las de la zona superior (aparentemente en mejor estado de conservación) y las obtenidas de la parte interna del sillar mediante testigo. En la tabla 1 se recogen los valores obtenidos de porcentaje en peso de pérdida de material, con valores positivos y los de porcentaje de ganancia de peso, con valores negativos. Los procesos observados que implican pérdida de material se deben principalmente a la intensificación de la disgregación y arenización de las superficies erosivas. Las aplicaciones de los correspondientes tratamientos A y C han mejorado considerablemente el problema de cristalización de sales según puede observarse de los resultados de las probetas elaboradas correspondientes a la zona inferior del sillar, más deteriorada.

En la valoración cualitativa, a partir del aspecto de las probetas ensayadas, el tratamiento A fue el más efectivo corroborando las observaciones realizadas bajo el MEB.

A pesar de la mejora detectada en las probetas tratadas con A y C, ambas fue-

ron también afectadas por la presión de cristalización de las sales, especialmente en el último ciclo ensayado. Por ello, la aplicación de los consolidantes orgánicos utilizados ayudará a retardar el proceso de alteración, pero si el problema de la presencia de agua (en contacto directo con los sillares) no se elimina, la eficacia de los consolidantes se aminorará con el tiempo. En este supuesto sería necesario un seguimiento periódico en las zonas tratadas para mantener su eficacia.

En resumen, los tratamientos A y C no causan alteraciones ópticas importantes siempre que la mezcla con el disolvente esté bien homogeneizada. No se aconseja el uso del B porque reacciona con algunas muestras (las que mantienen más humedad) creando una película blanca superficial, además de ocluir excesivamente la porosidad de la roca.

La consolidación de las zonas más erosionadas con el tratamiento A presentó un mejor comportamiento frente a las distintas pruebas de envejecimiento. Sin embargo, su eficacia se pierde a largo plazo ya que, una vez que la roca ha comenzado el proceso erosivo, su velocidad se acelera exponencialmente por lo que se aconseja la reposición de los elementos con un alto grado de deterioro.

Agradecimientos

El Programa de Conservación del patrimonio Histórico Español de la Fundación Caja Madrid financió este proyecto. Agradecemos a Enrique Oliver la ayuda prestada en el laboratorio y al revisor anónimo, sus comentarios.

Referencias

- Esbert, R.M.; Ordaz, J.; Alfonso, F.J. y Valdeón, L. (1984). *I Congreso Esp. Geol.* 2, 921-931.