

Caracterización petrográfica y petrofísica de los sillares del "Puente Viejo" de Molina (Guadalajara), con vistas a su posterior restauración

M.C^o ANGEL (*)
B. MARTÍNEZ (**)
N. PRENDES (***)
J.M. RICO (****)
A. LÓPEZ (*****)

RESUMEN Se estudia la naturaleza petrográfica, características hídras y patología de los sillares del "Puente Viejo" de Molina de Aragón, con objeto de determinar la causalidad de su estado actual y aplicar medidas correctoras para una óptima restauración de dicho monumento.

Asimismo, se presenta una de las aplicaciones más significativas del tratamiento digital de imágenes, conectando el plano del puente a una base de datos con las propiedades, determinadas por otros medios e interpolándolas a mapas cartográficos, con distintos aspectos alteralógicos.

PETROGRAPHICAL AND PETROPHYSICAL DESCRIPTION OF THE ASHLARS OF THE "PUENTE VIEJO" IN MOLINA (GUADALAJARA) WITH A VIEW TO RESTORING IT AT SOME FUTURE DATE.

ABSTRACT In this paper it is studied the nature of petrographical components and the hydraulic properties and durability of rock materials belonging to the old bridge called "Puente Viejo" which is located in the village of Molina de Aragón in Spain. The objective of this study is to determine what is current state of the bridge, which have been the damaging causes and finally to identify and apply the corrective actions which enable to stop the deterioration and start the restoration of this monument.

In addition this paper also describes one of the most significant application based on image digital processing. This application connects the plane of the bridge to a database with their properties, which have been previously determined by other ways, interpolating with cartography maps with different alteration aspects.

Palabras clave: Alteration, Durability, Image digital processing, Petrography.

* NOTA PREVIA

Este artículo presenta las conclusiones más significativas del trabajo realizado para la empresa Consultores Técnicos Asociados S.A.L., con el título "Caracterización petrofísica de la arenisca ornamental de los monumentos de interés histórico-cultural de Molina de Aragón (Guadalajara); Exp. n.º 46.906 (II tomos) y en el que han colaborado el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), en la parte de tratamiento digital de imágenes y el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCyM), en la caracterización petrográfica y los ensayos correspondientes. Ambos organismos adscritos al CEDEX-MOPTMA.

- (*) L. Ciencias Geológicas, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
(**) Ingeniero C.C. y P. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
(***) Licenciado Ciencias Geológicas, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
(****) Licenciado Ciencias Geológicas, S.A.L.
(*****). Arquitecto. Ayuntamiento de Molina de Aragón.

1. INTRODUCCIÓN

El "Puente Viejo" de Molina de Aragón, presenta, en la actualidad, alteraciones notables, producidas esencialmente por el ataque de agentes contaminantes y medioambientales, que afectan de manera especial a algunos de sus sillares.

Una vez constatado su progresivo deterioro y decidida su restauración, surgió la necesidad de conocer en profundidad las características de los materiales constitutivos y los mecanismos por los que se produce la alteración de los mismos, todo ello con el propósito de explicar la causalidad de la patología existente y determinar las actuaciones más adecuadas para detener la alteración que viene sufriendo el monumento, o evitar, al menos, la aceleración de los procesos de degradación.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL MONUMENTO

Este puente, que cruza sobre el río Gallo, al SO de la localidad de Molina, es, junto al alcázar y la iglesia de Santa



FOTO 1. Aspecto general del puente de Molina o "Puente Viejo".

Clara, una de las obras de ingeniería más representativa del ilustre pasado molinés.

Tras su reconquista a los musulmanes (1129) y la posterior creación del señorío independiente de Molina de Aragón (1137-1139), se abordan una serie de obras encaminadas a la mejora de la infraestructura urbanística de la capital del mismo.

Por su tipología se encuadra en los puentes realizados en el gótico; algunos historiadores sitúan su construcción durante el mandato de la V señora de Molina, D^a Blanca Alfonso, que además concluyó el cerramiento exterior de la ciudad.

Las fuentes documentales, escasas y contradictorias, señalan una primera restauración de la mano de don Juan de Pontones, maestro de cantería (1640), "Cosas notables de esta noble y muy antigua leal villa de Molina" de Diego El-queta (1663), bajo los auspicios del rey Felipe IV, que estableció, temporalmente, su base de operaciones en Molina, con motivo de las campañas bélicas de la guerra de Cataluña.

Se encontraba este paso estratégicamente enfrentado a una de las principales puertas de acceso a la ciudad amurallada y consta de tres arcos escarzanos, que se apoyan en fustes y pilastras, triangulares aguas arriba (tajamares) y semicirculares aguas abajo.

Está construido, fundamentalmente, en arenisca roja y, en menor proporción, en arenisca blanco-amarillenta. Aparece rematado con petos de protección de piedra, de la misma naturaleza, edad y composición.

2. MARCO FÍSICO

2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El clima de Guadalajara es seco y de temperaturas extremas, con una considerable oscilación térmica.

El número medio anual de días de helada es de 40,8.

El valor total anual medio de la precipitación es bajo (349,9 mm), siendo secos los meses de enero (25,8 mm) y febrero (26,1 mm).

Al año se registran, por término medio, 75,5 días de lluvia, 3,5 de nieve y 2,4 de granizo o pedrisco.

En cuanto a las temperaturas, la insolación es moderada, con 2.329 horas de sol anuales, de promedio, correspondiendo el valor máximo a julio y el mínimo a diciembre.

Los valores de humedad oscilan entre el 82% en diciembre y el 44% en julio. Su valor medio anual es del 64%.

El viento es dominante en la dirección SO.

Climáticamente se considera una región árida, próxima a la "semiárida", de acuerdo con la clasificación climática de Köppen.

2.2. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS

Molina de Aragón está acotada por los meridianos de longitud 1°30' y 2°00' y los paralelos 41°00' y 40°30'. Con una altitud de 1.068 m., viene definida por los Montes de Ateca, depresión de Calatayud-Teruel, la Sierra de Albarracín, la meseta del Tago y la del Ebro.

2.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Molina de Aragón está enclavada en la parte central de la cordillera ibérica (rama aragonesa o cadenas hespéricas) y rodeada de materiales triásico-jurásicos (mesozoico), compuestos de series predominantemente detríticas (areniscas, conglomerados y margas) en estratos subhorizontales, con ligeros buzamientos en dirección SE.

Estratigráficamente el material usado como sillares se ha extraído de las areniscas del triásico inferior (buntsandstein), de color rojo y blanquecino.

Las canteras se localizan en los alrededores, en los pueblos de Rillo de Gallo y Castellar de la Muela, al NO y SE de Molina de Aragón, respectivamente.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la caracterización de los materiales de construcción del "Puente Viejo", en relación con sus propiedades hídras, petrofísicas y petrográficas.

Asimismo, se ha estudiado la eficacia de la aplicación de algunos productos de tratamiento y conservación de piedras, con el propósito de observar su comportamiento relativo y determinar cual de ellos es el más idóneo para detener, o cuanto menos retrasar, el proceso de alteración al que están sometidos dichos sillares.

4. METODOLOGÍA

Básicamente, es la siguiente:

- Caracterización petrográfica y petrofísica de los materiales.
- Cartografiado, por técnicas digitales de imágenes, con la identificación petrofísica de cada material.
- Valoración de los tratamientos aplicados.
- Conclusiones.

5. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y PETROFÍSICA DE LOS MATERIALES.

Uno de los principales agentes de alteración de los materiales lo constituye el agua, ya que, además de servir como transmisor de otros agentes agresivos (sales en disolución

en su seno, acidez, etc.), ejerce un importante efecto mecánico (disrupción) que determinará su circulación por el seno del material, con la consiguiente degradación de la roca.

Esta circulación va a estar condicionada por los espacios vacíos, red de microfisuración y porosidad, así como por la distribución de aquellas y su tamaño.

5.1. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Los sillares, aunque de distinto color, tienen una naturaleza muy similar; son areniscas (arceas y subarceas subordinadas), con escasa matriz arcillosa (<6%), con tamaño de grano grueso y una selección buena (0.35-0.5 phi). El tipo de contacto entre los clastos es puntual y, en algunas zonas, largo.

Mineralógicamente están constituidos por cuarzo (Q) como componente esencial (73%), monocristalino; feldespato potásico (ortosa) y bórico (hialofana) (19%), parcialmente alterados a illita e interstratificados illita-esmectitas, con recrecimientos en algunas zonas. Los fragmentos de roca son esquistos micáceos y metapizarra (3%). Las micas son moscovitas y biotitas subordinadas (2%). La matriz arcillosa, escasa, (3%) procede de la alteración de los feldespatos, con precipitaciones de caolinita-dickita como "pore-filling", con reemplazamientos sistemáticos de moscovita a caolinita-dickita.

Existe cementación, escasa, de tipo carbonatado y sulfatado (calcita y barita, principalmente), que cierran la mayor parte de la porosidad inicial (esta suele ser significativa, debido tanto a su selección mediana como al tipo de cementación, incompleta, que presenta).

Los minerales accesorios son rutilo, turmalinas y óxidos de hierro.

5.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Porosidad abierta, densidad real y aparente

Los ensayos se han realizado siguiendo las recomendaciones de la RILEM (1981), test No.I.1 (porosidad accesible al agua) y test No.I.2 (densidad aparente y real).

Estos materiales presentan, de acuerdo con la tabla 1, una porosidad accesible media (Farmer, 1968), siendo menor para la arenisca roja y máxima para la blanca.

A igualdad de las demás propiedades físicas, y para este tipo de materiales, cuanto menor sea la porosidad más cohesión tendrá y, por consiguiente, disminuirá la susceptibilidad al deterioro. Por ello, el mejor comportamiento, desde el punto de vista de la durabilidad, lo tendrá la arenisca roja.

Los valores de densidad aparente son coherentes con la porosidad, habiendo mayor proporción de huecos en las areniscas blanca y moteada que en el resto.

5.3. PROPIEDADES HÍDRICAS

Absorción, desorción libre de agua y capilaridad

Para su determinación se han seguido las recomendaciones de la RILEM (1980), test No.II.1.; test No.II.5 y test No.II.6.

La absorción libre es la capacidad de captación o imbibición de agua, en un tiempo determinado.

La capacidad de absorción de estas areniscas es, en general, muy rápida, no existiendo importantes diferencias entre sí, alcanzando el 80% del agua absorbida a la hora de comenzar el ensayo, (excepto la amarilla, que lo hace a las seis horas), estabilizándose en este punto, a partir del cual tiene lugar una progresiva disminución en su ritmo de absorción, pasando, gradualmente, a alcanzar valores de equilibrio, y tomando, estas curvas, por consiguiente, una forma asintótica hasta llegar al 95% del agua absorbida, a las 168 horas de comenzar el ensayo. El contenido en agua (W_c) de las muestras sigue una evolución similar, siendo para la arenisca roja (como era de esperar) el más bajo, y la blanca, el mayor. Estos datos son congruentes con los valores de porosidad accesibles al agua anteriormente determinados.

La desorción libre de agua es la capacidad de evaporación o pérdida de agua del material. Se tienen en cuenta las condiciones ambientales.

La cinética de desorción de agua es diferente, si bien al comienzo (durante la primera hora), el secado es lento, a partir de ese momento se produce un importante incremento en la velocidad de desorción, tomando la curva una función, más o menos, lineal con respecto al tiempo, hasta llegar a un "secado" del 50%, que necesitamos entre veinte y treinta y seis horas, (arenisca roja y blanca, respectivamente); a partir de aquí se produce una inflexión en la curva, disminuyendo, imperceptiblemente, la velocidad de desorción, alcanzando el 20% del secado a las 48 horas, aproximadamente, en que aquella se hace más suave aún; esto puede explicarse debido a que el agua ya no es transportada por los conductos del sistema poroso, sino que es secada por fuerzas capilares y, por tanto, su velocidad va a estar condicionada por el coeficiente de difusión de vapor de agua, tendiendo a una forma asintótica en los valores próximos al equilibrio. El que no se llegue a un secado total, lógicamente, va a estar condicionado bien por factores extrínsecos (humedad ambiente) y factores intrínsecos (higróscopia, presencia de minerales arcillosos, etc.), evidenciándose, en todas ellas una ligera retención de agua, menor, en cualquier caso, del 10%. Con todo, se necesitan períodos relativamente cortos (cuatro días) para llegar a un secado natural en condiciones ambientales. El contenido en agua (W_c), en este proceso, sigue una evolución muy similar, siendo la arenisca roja la que más rápidamente pierde su agua, con un contenido en agua (%), al final del ensayo, menor que el resto.

Estos materiales, por lo tanto, tienen una absorción moderadamente alta y una escasa capacidad de retención de agua, principalmente la arenisca roja, que es la que menos problemas de durabilidad presenta.

La capilaridad, o capacidad de succión vertical de agua por la roca, depende de las características de su sistema poroso.

MUESTRA	DEN. REAL (D.) (Kg/m ³)	DEN. AP. (D.) (Kg/m ³)	POROSIDAD n_p (%)
Arenisca Blanca	2.626	2.222	15.372
Arenisca Roja	2.736	2.442	10.554
Arenisca Amarilla	2.628	2.340	13.134
Arenisca Moteada	2.631	2.234	15.065

TABLA 1. Valores de densidad y porosidad de los probetas.

El coeficiente de capilaridad (c), no presenta importantes variaciones entre los distintos sillares estudiados, pudiendo considerarse, en todos los casos, como bajo, con una absorción lenta al principio, manteniéndose durante todo el ensayo; la menor capilaridad se corresponde con la arenisca amarilla, y la mayor, la arenisca moteada.

Cantera	Muestra	c (Kg/m ² s ^{1/2})
Ello de Gallo	Arenisca blanca	0.32
	Arenisca Roja	0.26
Castellar de la Muela	Arenisca Amarilla	0.18
	Arenisca Moteada	0.60

El que no exista una clara correlación entre los coeficientes de capilaridad (c) y las diferentes porosidades de la roca se debe, entre otras causas, a que el sistema poroso es muy

irregular, presentando oclusiones, detectadas por M.E.B., debidas a cementaciones de barita y calcita, tal y como se ilustra en la correspondiente lámina (lámina I).

6. ENSAYOS DE DURABILIDAD

Ensayos de carácter experimental que nos dan idea de la respuesta de la roca frente a determinados factores que actúan sobre ella.

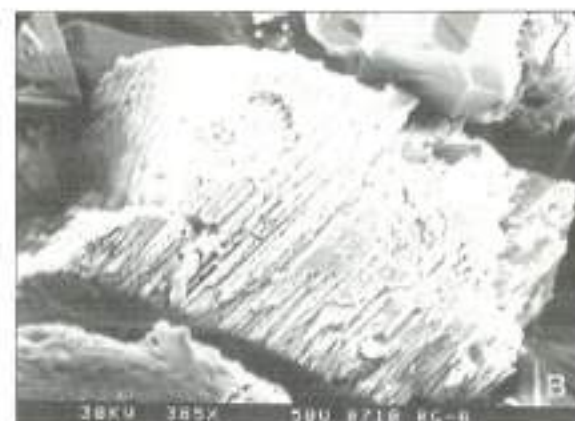
Para la realización de los ensayos se han seguido las recomendaciones de la RILEM (1980); test No.V.3 y test No.V.1a., estableciendo un número predeterminado de ciclos (25) y valorando los daños, al final, atendiendo a criterios morfológicos (aspecto, color, etc.) y estructurales (pérdida de peso, fisuraciones, etc.).

6.1. CICLOS DE HUMEDAD-SEQUEDAZ

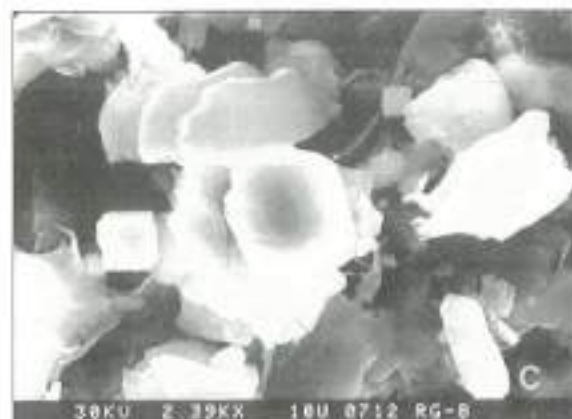
Ensayo que nos da información sobre la mayor o menor tendencia a la degradación de los materiales a causa de las fluctuaciones higras (variación del contenido en agua, Vos 1976).



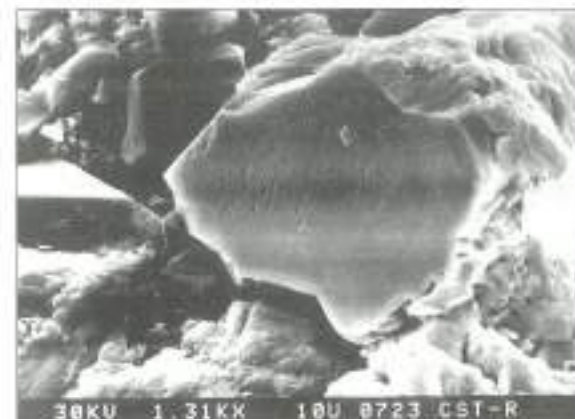
A. Cristal de hialofana ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2\text{Ba}$), idiomórfico, con disoluciones selectivas superficiales.



B. Ortoclasa ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{AlK}$), rodeada de cristales idiomórficos de cuarzo (Q), con alteraciones selectivas según sus planos de exfoliación.



C. Cristales perfectamente desarrollados de coalinita ($\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_4](\text{OH})_2$), formados a partir de la hidrólisis de los feldspatos.



D. Alteraciones, en los bordes de los cristales de hialofana, dando lugar a microporosidades en el contacto entre los granos.

LÁMINA I. Diferentes aspectos, por M.E.B., morfológicos y petrográficos, de la naturaleza mineralógica de las areniscas.

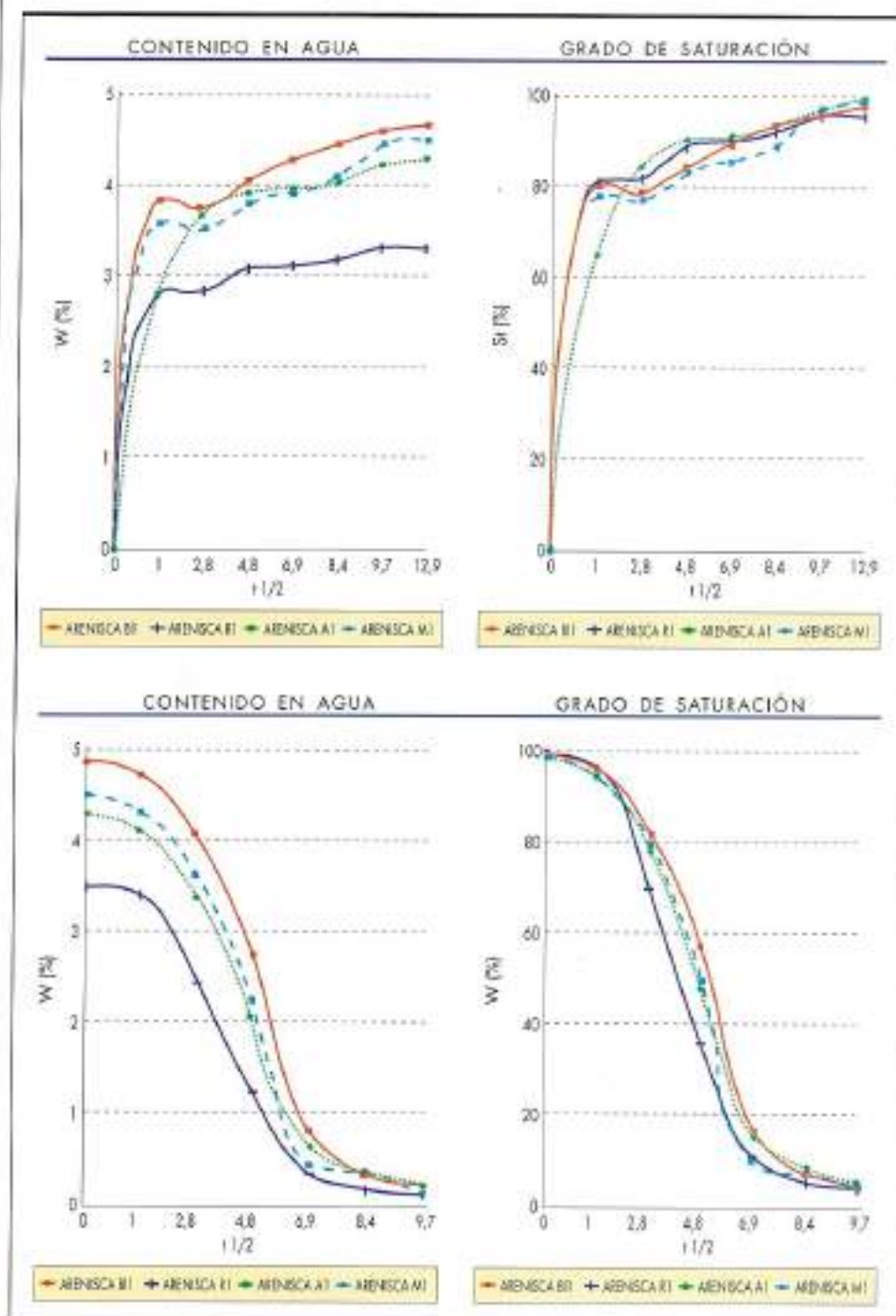


GRÁFICO 1. Función de absorción y desorción libre de agua para los diferentes sillares del puente.

No existen pérdidas significativas del material, siendo la más afectada la arenisca moteada (0.4%); el impacto más importante es el visual, con una decoloración general de las muestras.

6.2. CICLOS DE HELADICIDAD

Tiene por objeto evaluar la resistencia a las heladas de dicho material (Gerard, 1978).

Las variaciones observadas son mínimas, sin apenas pérdida de material por desagregación. A partir del ciclo

7 y 8, las areniscas roja y amarilla, respectivamente, comienzan a "ganar" peso, imputable a procesos disruptivos que aumentan la capacidad de absorción y retención de agua. Este mismo fenómeno sucede en las areniscas blanca y moteada, a partir del ciclo 14. Con todo, las variaciones son insignificantes, y siempre menores del 0.8%.

Al final del ensayo se han detectado pequeñas fracturas, normales a las aristas, aunque las muestras mantienen su cohesión interna.

6.3. CICLOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

Basados en el efecto disruptivo de las soluciones al cristalizar en el interior de los poros y fisuras. Este ensayo proporciona datos para una evaluación cuantitativa del comportamiento físico de la roca frente a las acciones destructivas de las sales solubles (Niesel, 1978).

Ensayo bastante agresivo, desagregándose la arenisca blanca a partir del sexto ciclo, perdiendo su morfología al final del ensayo, y producido, probablemente, por su falta de cohesividad interna.

El resto de las muestras, mantienen, más o menos, su coherencia interna, sobre todo la arenisca roja, que es, cuantitativa y cualitativamente, la más coherente, al finalizar dicho ensayo.

7. ALTEROGRAFÍA

Los tipos de alteración encontrados en el puente se han descrito utilizando los términos de Ordaz y Esbert (1988), los más importantes son:

Depósitos superficiales. Se han diferenciado dos tipos: **ENMUGRECIMIENTO (EN)**, de color oscuro, siendo un

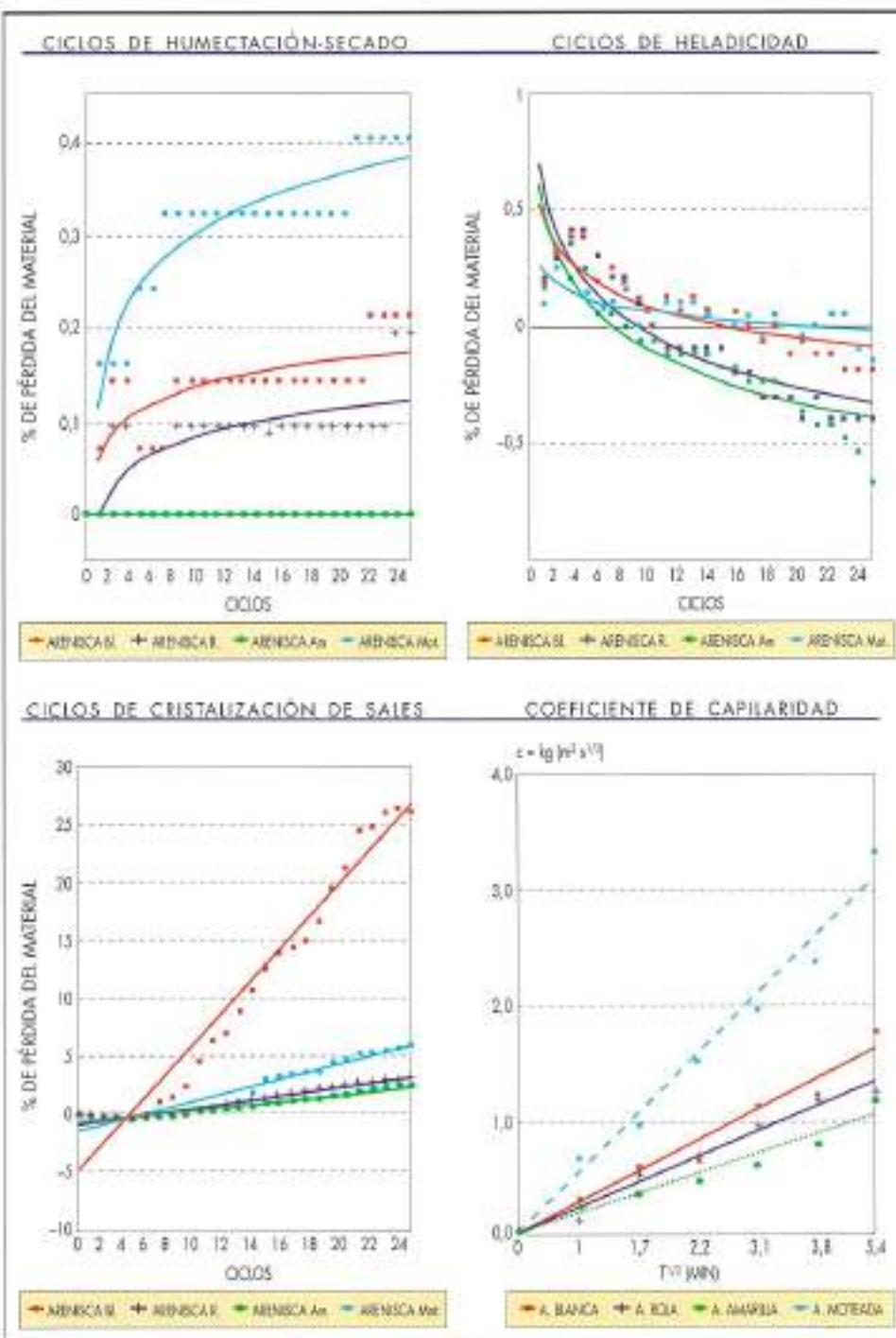


GRÁFICO 2. Comparación, en los distintos sillares, de los diferentes ciclos aplicados sobre ellos; así como la función de capilaridad de los sillares.



IMAGEN 1. Imagen digitalizada e integrada en un fichero único, conteniendo el puente y un plano del mismo, con los sillares correspondientes.

fenómeno aislado y localizándose en los sillares de la imposta, y todas en la arenisca roja; y la **PATINAS (PT)** superficiales, dando al material una tonalidad oscura y cambiando, consecuentemente, su aspecto; se localiza en algunos sillares de los petos, principalmente en la arenisca moteada y, en menor proporción, en la arenisca roja.

Erosiones. Se ha incluido a todos aquellos procesos físicos, químicos y biológicos que conllevan a un rebajamiento o pérdida de material. A su vez, hemos diferenciado **DESAGREGACIONES ARENOSAS (ARENIZACIÓN) (AR)**, evidenciada por un desprendimiento importante del material "grano a grano"; es un fenómeno localizado, normalmente, en las dovelas, tajamares y, en menor proporción, en los tímpanos del puente. Dentro de las dovelas, este fenómeno afecta, principalmente a los rifones, haciéndose más evidente en el arco central. Zonas de **ALVEOLIZACIÓN (AV)** y **PICADURAS (PI)**, denotadas, las primeras, por pequeñas oquedades o cavidades de aspecto globular, bastante típicas de las areniscas, y por pequeñas corrosiones puntiformes las segundas. Se localizan en las dovelas y tajamares, así como en los tímpanos del puente y, en menor proporción, en algunas areniscas moteadas de los petos. Zonas de **ESTRIADOS (ET)** y **ACANALADURAS (AC)**, dando al material un aspecto ondulado, distribuidas en algunos sillares del peto, de la imposta, tajamares y dovelas, así como en los tímpanos, los sillares tienen una marcada laminación que este fenómeno acusa aún más. Zonas de **DESPLACACIONES (DP)**, evidenciadas por levantamientos y separaciones en escamas paralelas a la superficie de la losa; se sitúan, principalmente, en los petos, sobre todo en el arco central e izquierdo (no hay cañoc); asimismo y sobre algún sillar del peto se han localizado algunas zonas de **EXCORIACIÓN** (muy aisladas). Zonas de **FISURAS (FS)**, entendiendo por tal a todas las discontinuidades de carácter planar, localizadas, esporádicamente, en algunos sillares de las dovelas y de los tajamares, aunque presentan un escaso desarrollo y no tienen continuidad más allá del sillar al que afectan.

8. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Técnica que consiste en digitizar una imagen y tratarla, para obtener información, integrada, de ella.

Las imágenes, en este caso, son el puente y un plano del mismo que, en una fase posterior, se utilizará como máscara para registrar los distintos niveles de información obtenidos en los anteriores procesos.

Del estudio del histograma de frecuencia de niveles de gris cogimos que la imagen original puede ser mejorada en su contraste, expandiendo linealmente aquel, hasta sus valores máximo (255) y mínimo (0), aplicando un algoritmo de normalización. El resultado es una imagen más contrastada y, por lo tanto, con una mejor diferenciación de los colores de cada sillar, además de facilitar la obtención de los umbrales de corte en el proceso de segmentación. Una vez normalizada se aplica sobre ella, un filtrado matricial tipo "realce de contornos", para lograr una mejor definición de la misma.

Tratada ya la imagen se procede a la identificación, litológica, de cada sillar; para ello se estudia, por una parte, el histograma resultante y, por otra, la distribución de niveles de gris que corresponden a cada litología, estableciendo los umbrales de corte para los diferentes sillares. Como se puede ver en el gráfico siguiente, si bien algunas litologías no presentan ningún problema de discriminación (por sus niveles de gris), otras tienen solapamientos que en la fase de segmentación nos van a plantear problemas. Para solucionarlo se ha tratado estadísticamente cada sillar (su distribución de niveles de gris), calculando su media, desviación estándar, etc., y segmentando, de acuerdo con los datos obtenidos en un canal, una litología, y otra, en otro diferente (La arenisca moteada, por ejemplo, en el rojo (R), y la arenisca amarillenta en el azul (B), señalando los puntos de conflicto (que, obviamente, corresponde a zonas comunes) mediante operadores booleanos, tipo AND, para que en una fase posterior se discriminen manualmente), el resultado se aprecia en la fig. 2 de la imagen digitalizada 2.

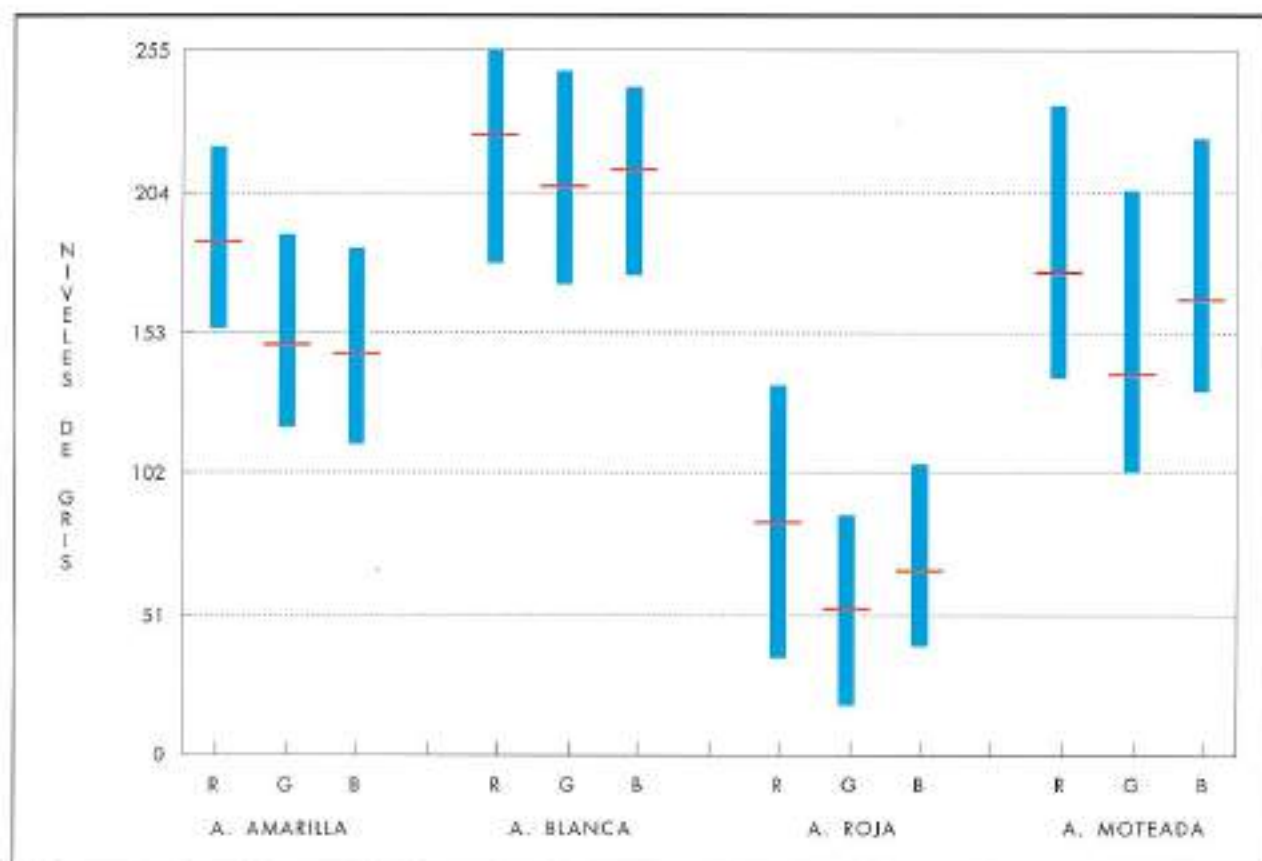


GRÁFICO 3. Rango de niveles de gris para los diferentes sillares del "Puente Viejo", a partir de la imagen digitalizada del puente.

En el caso que nos ocupa el grado de acierto, en cuanto a clasificación correcta de cada sillar, es del 80%, presentando los mayores problemas las zonas próximas a los tajamares (donde hay una degradación de los niveles de gris por sombreados), las zonas con procesos de alteración (pátinas de enmugrecimiento, alveolizaciones, etc.), así como en algunas litologías que, por su elevado grado de concordancia entre sus niveles de gris, se han clasificado incorrectamente. Para facilitar este proceso por técnicas digitales de la imagen, se han procurado ampliaciones y fotografías de detalle de las zonas conflictivas.

El siguiente proceso es identificar las alteraciones del puente y situarlas sobre su mapa correspondiente (fig. b de la lámina 2); concluido aquel, esta información la podemos superponer sobre el mapa litológico, determinando la frecuencia entre el tipo de litología, su posición, el puente y el tipo de alteración asociada.

A partir de la cartografía litológica y sobre la imagen del plano, digitizada en formato vectorial y posteriormente pasada a raster, se integra toda esta información y se conecta con una base de datos, cuya entrada es un código numérico, asimilable al color del píxel (o nivel de gris) en este recinto de la memoria. Esta base de datos contiene las propiedades anteriormente deducidas: petrofísicas, hídricas, etc.

Esto es interesante ya que, de cualquier sillar, podemos saber sus propiedades, además de evidenciar su morfología.

Asimismo, esta utilidad permite acotar valores (entrada por teclado) de un determinado parámetro (porosidad, absorción, capilaridad, etc.), almacenado en la base de datos y

pedir su representación en la imagen rasterizada; como puede intuirse, las posibilidades son muy amplias.

Sobre la imagen final, hemos cuantificado el porcentaje de cada litología presente en el puente y los sillares más afectados.

LITOLOGÍA	ÁREA DE CADA SILLAR (%)	FORMAS DE ALTERACIÓN									
		EN	PT	AR	AV	PI	ET	AC	DP	PS	
A. roja	44.07	X	X	X	X				X		
A. blanca	6.45			X		X					
A. amarilla	7.82			X	X	X	X	X			
A. moteada	32.86		X	X	X	X			X	X	
Mortero	3.23										
Sin clasificar	5.56			X							

Estos estudios nos llevan a la generación de mapas alterológicos (morfología, pérdidas del material, erosividades, etc.), estableciendo las correspondientes cartografías patológicas.

Estos mapas se han utilizado para orientarnos sobre que sillares pueden recuperarse y cuales no (fig. c de la imagen digitalizada 2). En este caso concreto se ha establecido el límite en el 45% del área superficial de pérdida de material para su sustitución por otros sillares nuevos (este criterio se

tomó de acuerdo con los valores deducidos de la caracterización petrofísica de los sillares).

De la información obtenida por técnicas de tratamiento digital de imágenes se concluye que son los sillares correspondientes a las areniscas blancas las que deben sustituirse, normalmente, sobre todo en los estribos, arcos del puente, y en su trasdós.

En las zonas de los tajamares, a la arenisca amarillenta se le debe procurar algún tipo de tratamiento para su con-

servación, así como a algunos sillares de arenisca moteada que el procesador señala como "muy alterados", principalmente en las zonas del muro de protección, por lo que se sugiere la protección de los mismos con tratamientos específicos.

Estos mapas de alteración superficiales presentan una gran concordancia con la distribución de los valores de porosidad y demás parámetros físicos, pudiendo detectarse zonas donde las alteraciones van a tener, a largo plazo, mayor

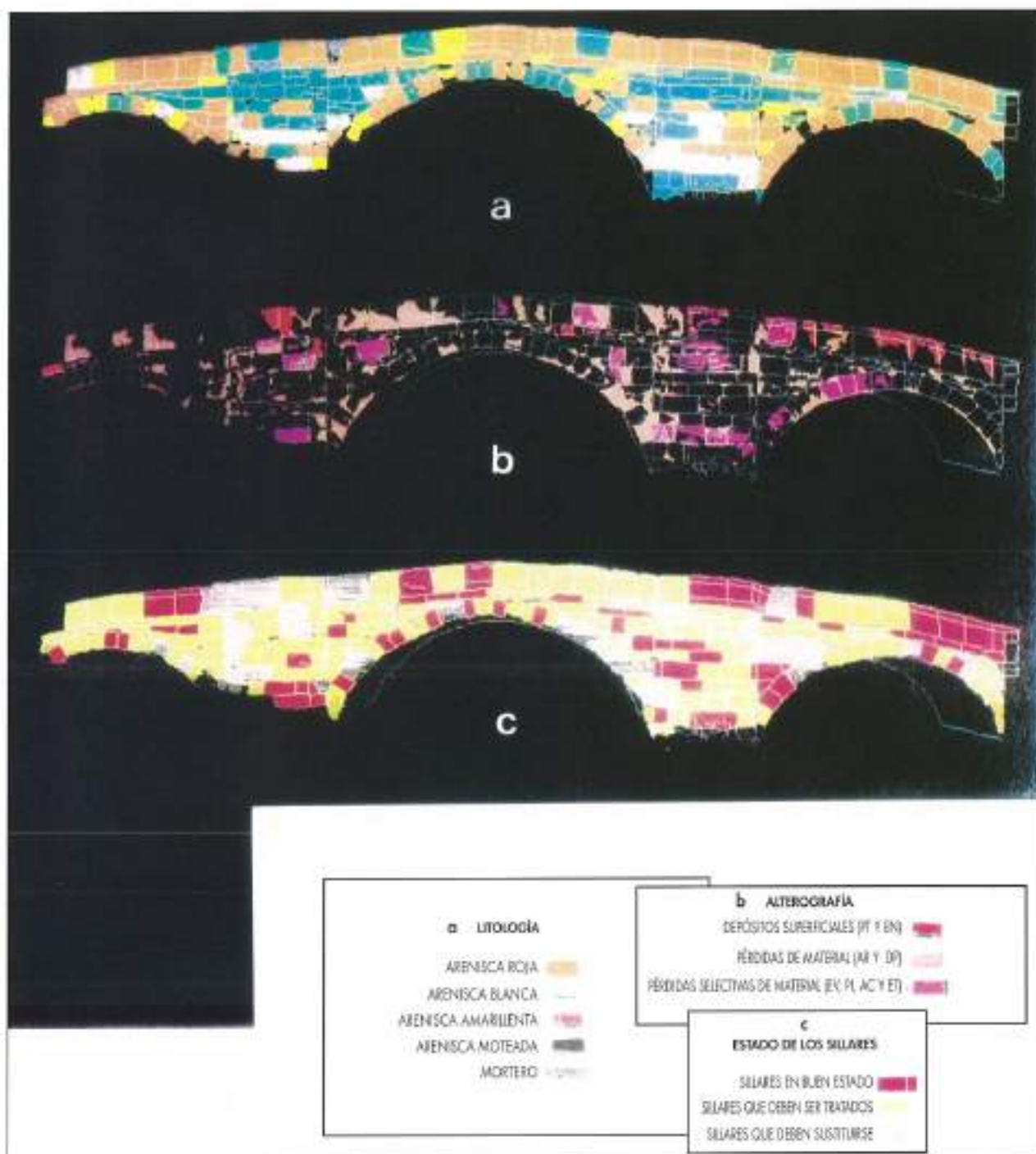


IMAGEN 2. Resultado de la clasificación digital para la litología [a], alterografía [b] y evaluación del estado de los sillares en el puente [c].

incidencia, lo que obligará a actuar, en las mismas, con especial cuidado.

9. TRATAMIENTO DE LA ROCA. VALORACIONES.

Una vez caracterizadas las propiedades de los materiales, se han realizado una serie de ensayos, con muestras idénticas y a las que hemos aplicado determinados tratamientos de consolidación y protección para estudiar su compor-

tamiento y proponer uno sólo en la siguiente fase de rehabilitación.

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales donde está situado el puente (una elevada humedad relativa), se ha optado por tres tratamientos, sugeridos por la empresa restauradora, de diferentes marcas comerciales y que se identifican, en este trabajo, como A, B y C. Cada uno de ellos consistente en aplicar dos productos, uno de efecto consolidante, que mejora la cohesión entre los com-

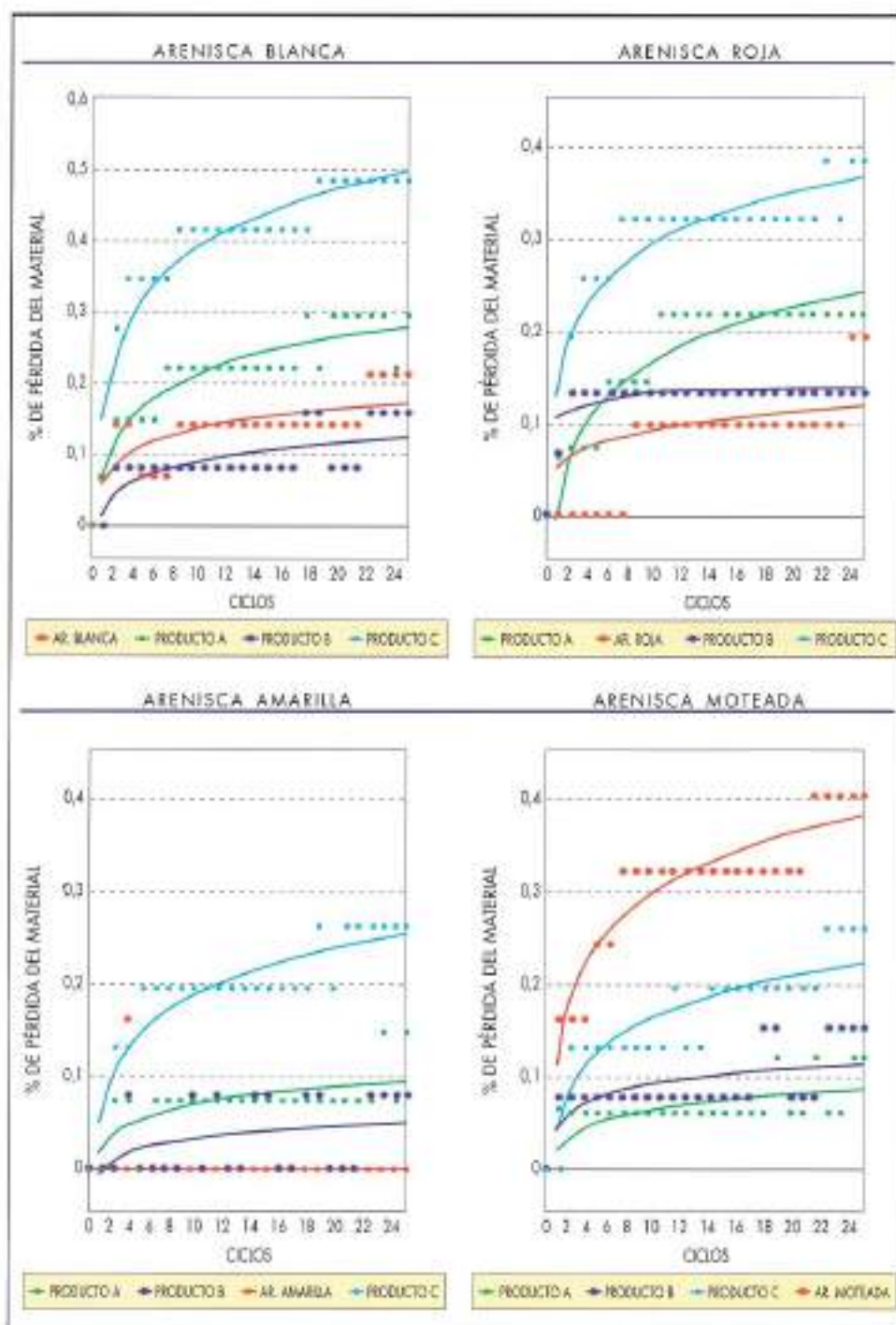


GRÁFICO 4. Incidencia de los ciclos de humectación secado, en los distintos sillares y con diferentes productos consolidantes.

ponentes minerales, así como la adhesión entre la parte más externa, y por lo tanto más deteriorada, y la más interna, y que, además, lleva a un cambio en la porosidad del material ya que aquel rellenará los espacios vacíos, pudiendo alterar los parámetros hídricos anteriormente deducidos y, por consiguiente, alterar los procesos de degradación relacionados con la cinética del agua dentro del material. De ahí la necesidad, como mínimo, de probar con varios productos y evaluar los resultados. Todos los

productos aplicados a estos materiales han sido de carácter orgánico.

El segundo producto, hidrofugante, le da al sillar un carácter hidrorrepelente, generando una "pantalla" entre el material y el ambiente, disminuyendo los fenómenos de alteración relacionados con la presencia de agua (disolución, cristalización de sales, gelificación, etc.). Los productos aquí utilizados son, también, orgánicos y sus características composicionales se encuentran en la tabla siguiente.

	PRODUCTO CONSOLIDANTE	PRODUCTO HIDROFUGANTE
TRATAMIENTO A	Monocomponente a base de éster de sílice y metilsiloxano	Siloxano modificado 100%. Exento de disolventes
TRATAMIENTO B	Componente de siléster de ácido silícico (75%), disolvente (25%)	Siloxano
TRATAMIENTO C	Ester orgánico de ácido silícico	Oligoxano de bajo peso molecular

FOTO 2. Incidencia de los ciclos de heladicidad sobre el material, véase el proceso de gelificación.

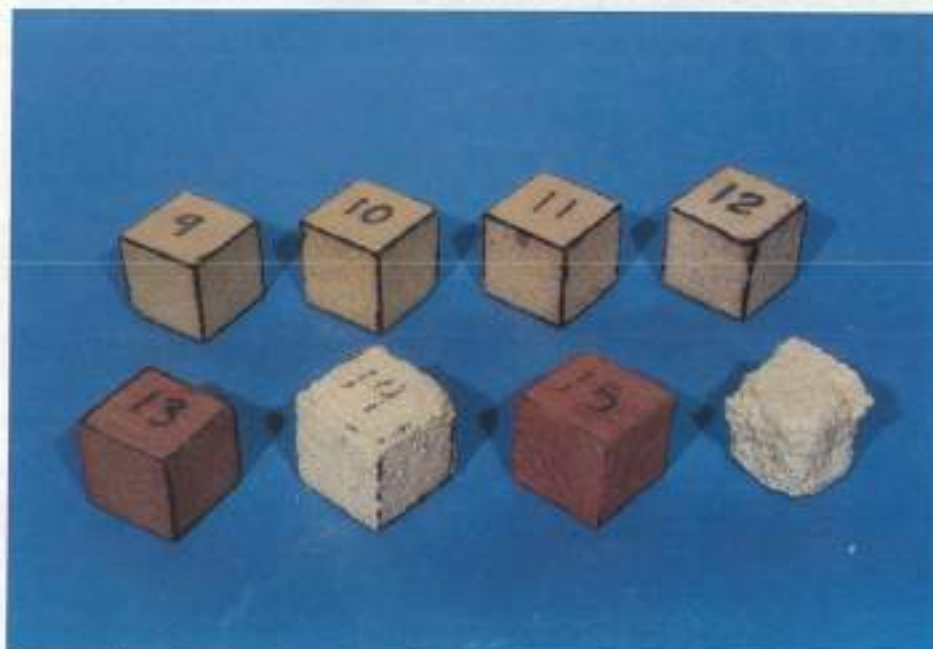
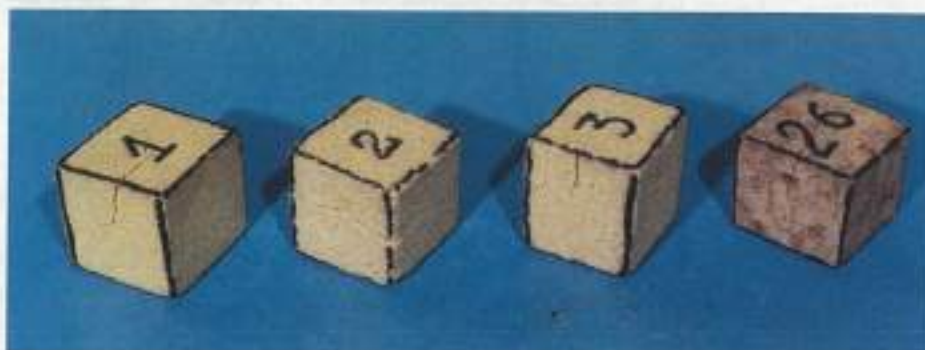


FOTO 3. Efecto de los ciclos de cristalización de sales, con la pérdida de material correspondiente.

La aplicación de dichos productos se ha hecho por recubrimiento superficial, mediante brocha, hasta impregnación total.

Los ensayos de envejecimiento acelerado han sido los mismos que para las muestras no tratadas, siguiéndose, en este caso, las recomendaciones de la RILEM (1980), test No.V.3 y test No.V.Lb

9.1. CICLOS DE HUMECTACIÓN

Se ha registrado el porcentaje de pérdida de peso de cada probeta.

La aplicación del tratamiento, en este caso, es bastante discutible; con todo, las pérdidas son insignificantes (y en ningún caso mayores del 0.5%). De acuerdo con los gráficos obtenidos, es el producto B el que mejores resultados proporciona, en su conjunto, detectándose, en algunas muestras, un ligero aumento en la pérdida de los materiales constituyentes debido, probablemente, a que aquel genera una película que es capaz de retener y atrapar agua, lo que facilita una cierta descohesión interna.

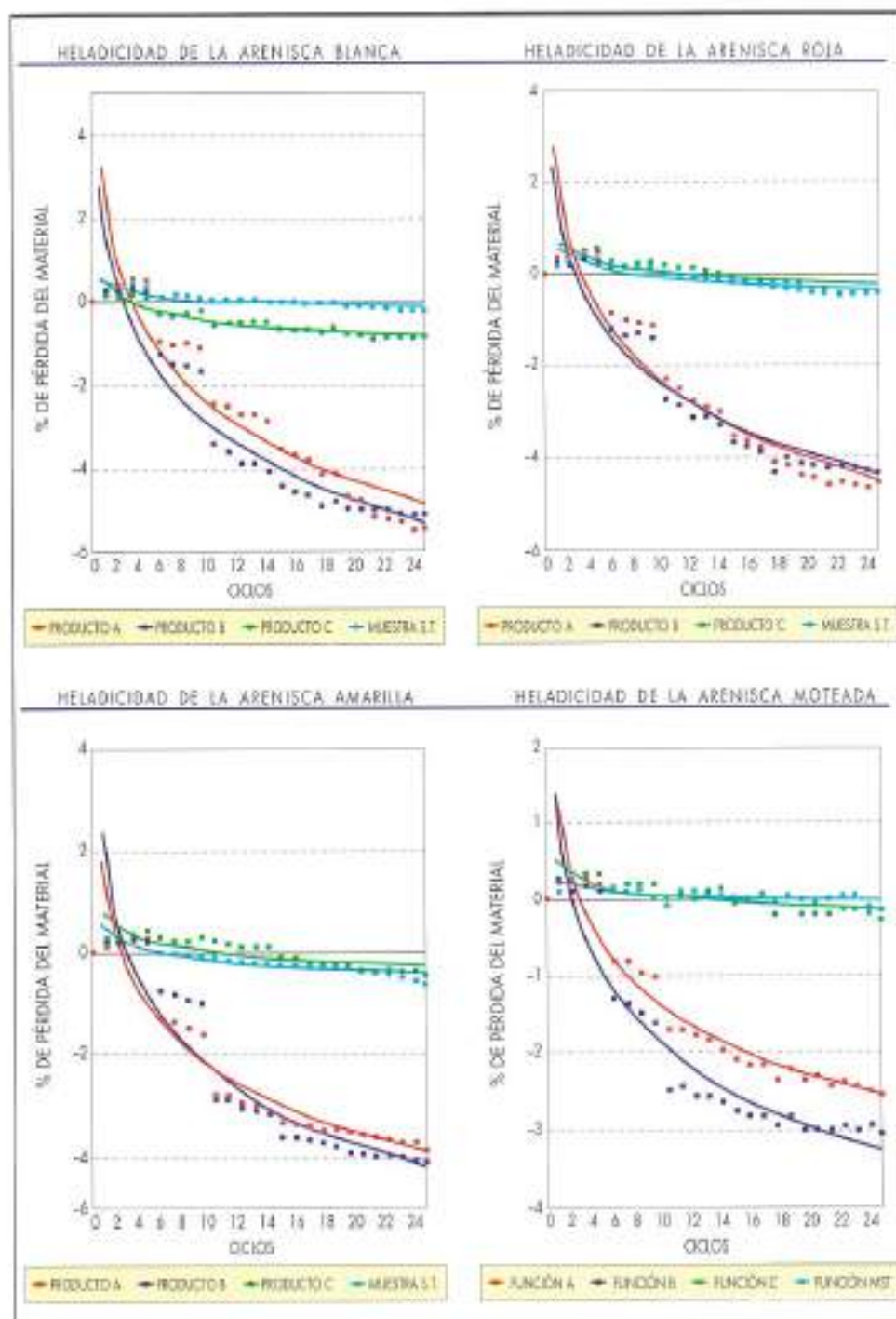


GRÁFICO 5. Incidencia de los ciclos de heladicidad, en los diferentes sillares y con diferentes productos consolidantes.

9.2. CICLOS DE HELADICIDAD

El tratamiento genera, en todos los casos, una "película" que recubre la textura y ocluye determinados tipos de poros y microfisuras, lo que procura una mayor retención de agua en el interior de las mismas. Aún así, se evidencia un mejor comportamiento con el producto C, que es el que deja "transpirar" la roca con mayor facilidad.

Con los productos aplicados, se detectan, asimismo, pequeñas microfisuraciones en el material, aunque de menor desarrollo, (fotografía 2).

9.3. CICLOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

La aplicación del tratamiento procura una buena protección a los materiales, disminuyendo, significativamente, su deterioramiento, sobre todo en el caso de la arenisca blanca (30%), en el mejor de los casos.

Todos los productos son bastante eficaces, denotándose, además, una inhibición en los procesos disruptivos, lo que a su vez condicionará los crecimientos salinos y los procesos de gelificación, todo ello se manifiesta por la disminución de microfisuras y el aumento de la coherencia del material.

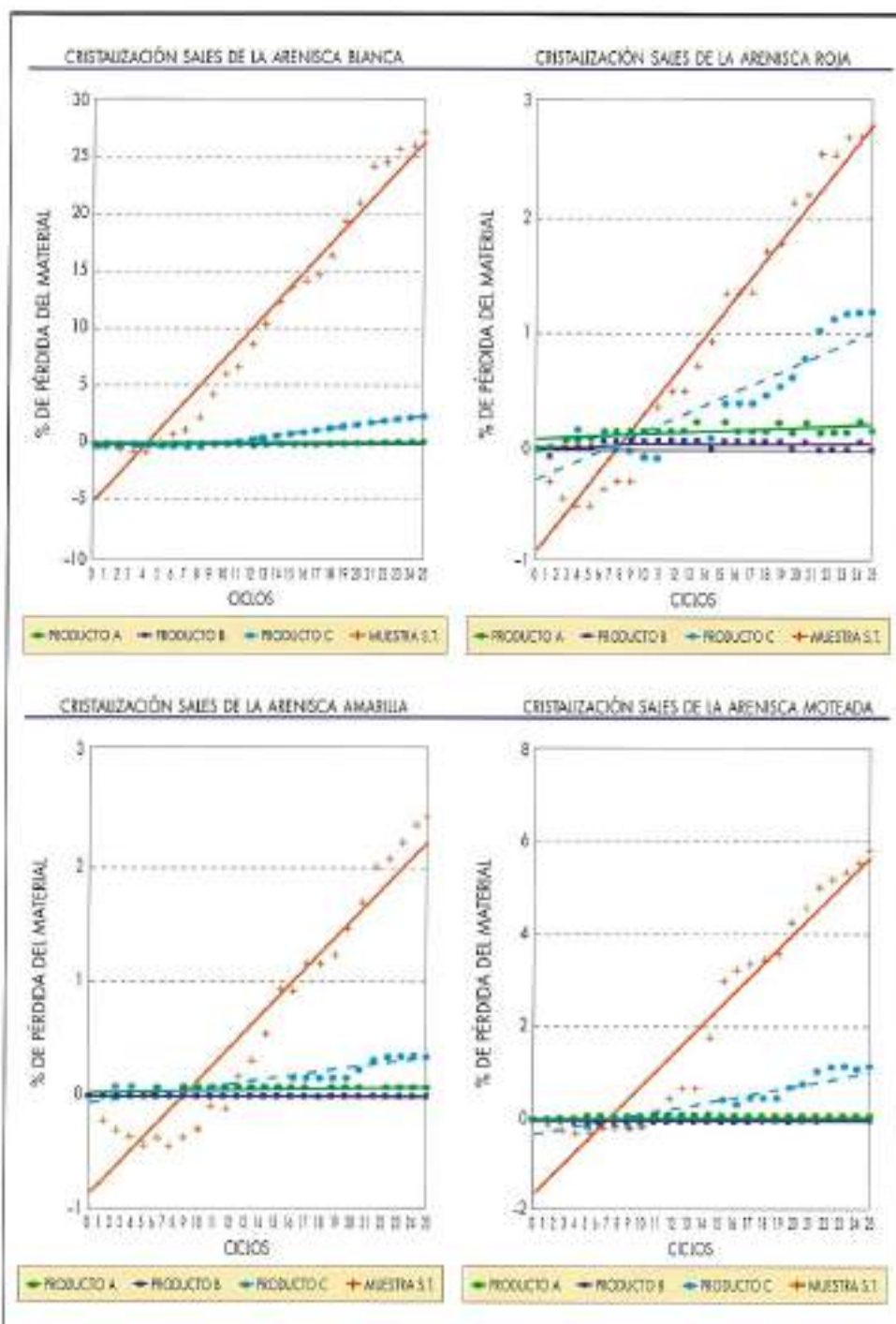
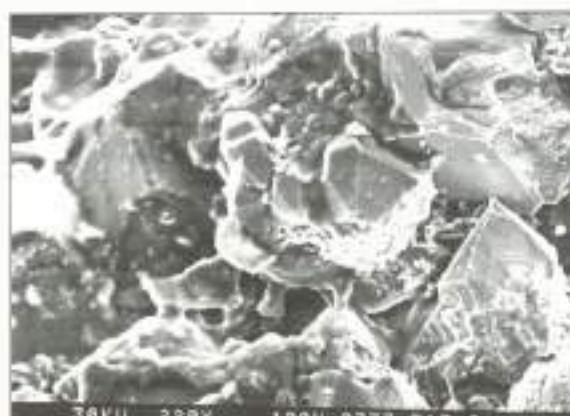
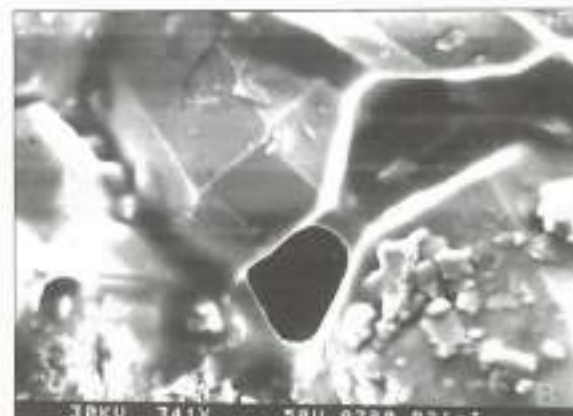


GRÁFICO 6. Incidencia de los ciclos de cristalización de sales, en los distintos sillares y con diferentes productos consolidantes.



A. Aspecto de la película protectora, generada por la aplicación de los productos de consolidación; se observa, además, como mantiene conductos o zonas de respiración en las muestras.



B. Protección, tras la aplicación del producto consolidante, del material. En zonas de determinados radios de acceso de poros (>30µ) este producto no los colma, permitiendo la movilidad de fluidos en su interior.



C. Frente de protección de la película consolidante; destaca su gran homogeneidad y continuidad.



D. Desarrollo, por cristalización de sales (SO_4Na_2), en el interior del material, sobre cristales de cuarzo, como se puede apreciar tienen una estructura esponjosa.

LÁMINA II. Penetración y recubrimiento de los productos consolidantes, aplicados sobre las muestras.

El producto más eficaz, de acuerdo con los gráficos obtenidos, es el identificado como B.

La probeta n° 14, correspondiente a la arenisca blanca, está tratada con el producto B, y presenta una alteración muy similar a la n° 15, que es de arenisca roja, sin tratar.

La probeta n° 13, del mismo material que la 15, está, sin embargo, tratada, observándose una menor alteración en la misma, (fotografía 3).

10. CONCLUSIONES

El estudio de las características petrográficas, hidricas y petrofísicas de las areniscas constituyentes de los sillares del monumento revela que existe una estrecha relación entre sus parámetros petrofísicos y la alteración observada, habiéndose determinado que son los procesos de cristalización de sales los que mayor incidencia tienen sobre el deterioro de los materiales, principalmente de la arenisca blanca, que es la menos coherente. Se ha observado, asimismo, que los

procesos de humectación y heladicidad tienen poca incidencia en la degradación de la piedra, pero facilitan vías de penetración del agua en el interior de las muestras.

La cartografía patológica realizada en el monumento permite discriminar aquellos sillares que deben ser, necesariamente, sustituidos y que otros pueden ser sometidos a un adecuado tratamiento que aminore la evolución de la degradación a medio y largo plazo.

La aplicación de todos los productos de consolidación e hidrofugación ensayados procuran una mayor cohesividad a los distintos tipos de sillares, mejorando aquellos hasta un 26%, como es el caso de la arenisca blanca, utilizando el mejor de los productos.

Se ha constatado que el producto B es el más adecuado ya que, además de procurar una gran coherencia a los sillares, permite su mejor transpiración, por lo que el agua retenida en el interior será, cuantitativamente, menor.

El tratamiento digital de imágenes posibilita la integración en una base de datos de toda la información deducida y

su representación en el mapa cartográfico, con la posibilidad del análisis de los distintos factores alterológicos y sus relaciones; con ello, y utilizando como apoyo los datos de los ensayos realizados sobre los sillares, podemos concluir que la arenisca blanca debe ser totalmente sustituida, bien por sillares de arenisca amarilla, previa aplicación del producto B, o, si se quiere mantener la "estética" del puente, por sillares de arenisca blanca, tratados, pero evitando que se pongan en las zonas más próximas al trasdós y la parte inferior, donde las humedades y los ataques por sulfatos son mayores.

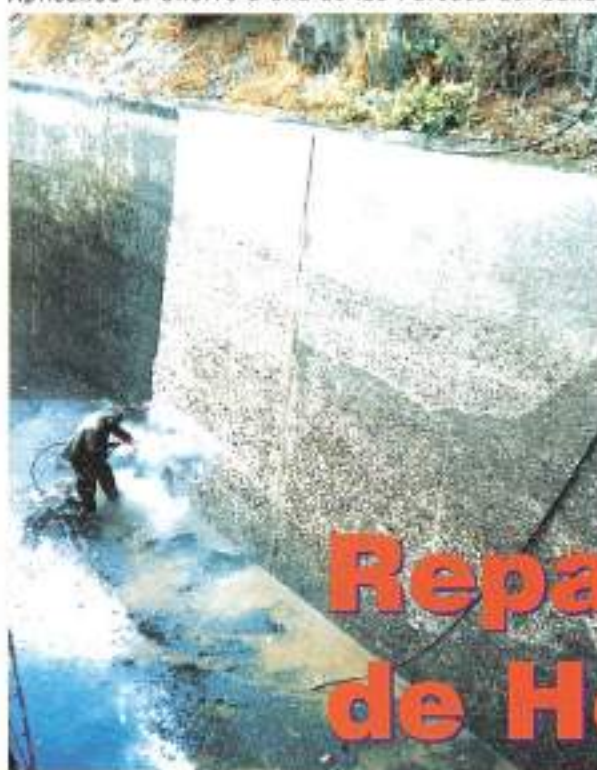
Los sillares que mejor comportamiento presentan son los de arenisca roja, a los que se deberá aplicar, a los más alterados, el producto recomendado.

Las arenisca amarillentas y moteadas, de comportamiento intermedio, deben protegerse con el mismo producto, no siendo recomendable su sustitución, excepto en las zonas inferiores de los tajamares que, dada la importante humedad y la presencia de sales, o bien pueden sustituirse por areniscas rojas o, si fuera necesario utilizar el mismo material, previamente debería estar impregnado con dicho consolidante.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, A.E.; NACKENZIE, N.S. and GUILFORD, C. (1977): Atlas of sedimentary rock under the microscope.
- BEL-LAN BALLESTER, A. (1984): Análisis de parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes. Tesis doctoral. UAM-IBM, 136 pp.
- BELIKOV, B.P.; ZALESKII, B.V.; ROZANOV, Y.A.; SANINA, E. y TIMCHEMKO, L.P. (1987): Methods of studying the physico-mechanical properties of rocks. En: B.V. Zaleskii (ed.). Physical and mechanical properties of rock, I.P.S.T., Jerusalem. pp. 1-58.
- ESBERT, R.M. & MARCOS, R.M. (1983): Las piedras de la catedral de Oviedo y su deterioración. Pub. Col. Of. de Ap. y Arg. Téc. de Asturias. Gráficas Summa. Oviedo, 143 pp.
- ESBERT, R.M. & MARCOS, R.M. (1984): "Incidencia de los factores ambientales en los mecanismos de alteración de las piedras de la catedral de Oviedo. I Con. Nac. de Geol. Segovia. T.II, pp. 635-809.
- ESBERT, R.M. et al. (1991): La piedra como material de construcción; durabilidad, deterioro y conservación. Mat. de Const. Vol. 41, n° 221. pp 61-71.
- FOLK, R.W. (1954): "The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature". J. Geol., T.62, pp.344-59.
- GERARD, R. (1978): Trois méthodes d'essai de gelivité récemment normalisées en Belgique. Proc. of the Int. Symp. on deterioration and Protection of Stone Monument, 1 (3,2), 18. Paris.
- I.T.G.E. Hojas de Molina de Aragón y Odón. (489 -24 19- y 490 -25-19-).
- MARCOS, R.M.; ESBERT, R.M.; ALONSO, F.J. y DÍAZ-PACHE, F. (1993): Características que condicionan el comportamiento de la caliza de Hontoria (Burgos) como piedra de edificación. Bol. Geol. y Min. Vol. 104, n° 5, pp. 123-133.
- MARFIL, R. & GÓMEZ, D. (1991): Relaciones entre el ambiente de sedimentación y los procesos diagenéticos en las areniscas del Buntsandstein el umbral de Ateca (Cordillera Ibérica). Bol. Geol. y Min. Vol. 101, n° 1, pp. 3-20.
- MATERIALS AND STRUCTURES. Research and testing 1980: May-june, n° 75. RILEM.
- MARTÍNEZ NISTAL, A. (1984): Diseño y operatividad de un sistema interactivo para el proceso digital de microfotografías petrográficas. Dep. de Petrología. Tesis de licenciatura. Univ. de Oviedo. Asturias. pp. 94.
- NIESEL, K. (1978): L'évolution de la diminution de la masse comme base par l'évaluation de l'essai de cristallisation. Proc. of the Int. Symp. on deterioration and Protection of Stone Monuments, 1 (3,2), 18. Paris. 1(3,6), 23 Paris.
- ORDAZ y ESBERT R.M. (1988): Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. Mat. de Const. Vol. 38, n° 209, pp. 39-44.
- PETTIJOHN, F.J. (1954): "Classification of sandstone". J. Geol. T. 62, 360-65.
- PRICE, C.A. (1978): The use of the sodium sulphate crystallisation test for determining the weathering resistance of untreated stone. Proc. of the Int. Symp. on deterioration and Protection of Stone Monuments. 1(3,6), 23. Paris.
- ROLDÁN FERNÁNDEZ, A. (1988): Notas para una climatología de Guadalajara. I.N.M. (K-36).
- ROSENFELD, A. & KAK, A. C. (1976): Digital picture processing. N.Y.: Academic Press.
- SÁNCHEZ MOYA, Y. et al. (1989): Arquitectura fluvial de las "Areniscas del río Arandilla". Triásico de Molina de Aragón (Guadalajara). Bol. Est. Geol. 45; pp. 195-204.
- TRIVIÑO VÁZQUEZ, F. et al. 1992: Oclusión de poros por tratamiento químico. Monografía 409. jun. I.C.C.E.T. (C.S.I.C.).
- VOS, B.H. (1976): Water absorption and drying of materials. The conservation of stone. I Proc. of the Int. Sym. pp. 679-694. C. Rossi Manaresi. Bologna (Italia).
- ZEZZA, F. (1990): Computerized analysis of stone decay in monuments. Adv. Workshop. "Analytical methodologies for the investigation of damage stones", Pavia, Italy. Ist. Geol. Ap. e Geot. Univ. di Bari. pp 163-68.

Aplicando el Chorro a una de las Paredes del Canal



Equipo Móvil Trabajando Dentro de un Canal



Reparación de Hormigones

En Canales: Chorreado de superficies a 600 bar, para eliminar musgos y hormigón degradado, y permitir la posterior reparación con morteros epoxi y revestimiento con resinas de poliuretano, con el fin de evitar fugas y disminuir el rozamiento, aumentando el caudal hasta en un 27%.

En Hormigón Armado: Chorreado a 800 bar, para eliminar en una sola operación el hormigón degradado por carbonatación y el óxido producido en las armaduras incluso en su lado oculto, y permitir el tratamiento de regeneración y revestimiento de protección del hormigón.



Estos procesos de chorreado con agua a alta presión eliminan y seleccionan el hormigón degradado, sin producir microfisuras por vibración en el adyacente, limpiando profundamente el soporte tratado.



Saneado de
Hormigón
Degradado por
Proceso de
Carbonatación.



APLICACIÓN DE PINTURAS

M A D R I D • B A R C E L O N A

Salamanca, 22 • 28020 Madrid
Tel. (91) 571 66 28*
Fax (91) 571 66 30

Mare de Déu de Montserrat 53-59
08930 - S. Adrián del Besós (Barcelona)
Tel. (93) 462 23 00 - Fax. (93) 381 70 91

DELEGACIONES: Sevilla Zaragoza Valencia
95 • 464 70 58 978 • 23 07 21 96 • 360 28 62