

ESTUDIO DE LA DEGRADACION DE LOS MATERIALES PETREOS DE LA IGLESIA DE SANTO DOMINGO (SORIA, ESPAÑA)⁽¹⁾

MONICA ALVAREZ DE BUERGO BALLESTER (*)

MIGUEL ANGEL GARCIA CALLEJA (**)

NICANOR PRENDES RUBIERA (***)

JESUS SORIANO CARRILLO (****)

RESUMEN. Se ha realizado la caracterización, en sus diferentes aspectos, de la arenisca utilizada como material de construcción en la fachada de la Iglesia de Santo Domingo, en Soria: mineralogía, petrografía y propiedades físicas (color, densidad, porosidad, absorción-desorción de agua, capilaridad). Asimismo, se han sometido las probetas a tres tratamientos diferentes de consolidación e hidrofugación, para, posteriormente, realizar ensayos de envejecimiento artificial acelerado y comprobar sus efectividades. Igualmente, se han definido las formas de alteración, y sus mecanismos, observadas en el monumento.

ABSTRACT. *Characterization of the sandstone, in its different aspects, used as building material in the Santo Domingo church facade, in Soria, has been carried out: mineralogy, petrography and physical properties (color, density, porosity, water absorption-desorption, capillarity). The test samples have also been subjected to three consolidation-hydrofugation treatments and after, aging tests have been done in order to verify their effectiveness. Alteration forms, and their mechanisms, observed in the monument have been also defined.*

1. INTRODUCCION

Del centro de la ciudad de Soria se sube por la cuesta de la Aduana Vieja. En lo alto, en la pequeña plaza que forma al converger con la calle de la Doctrina, está Santo Domingo (figura 1), que aún la gente de Soria llama Santo Tomé, pues ése fue su primitivo nombre. Un pequeño murete y una puerta baja de hierro acotan la pequeña plaza. El suelo con doble nivel y escalón está formado por cantos de río encuadrados por ampilas lo-

sas. Enfrente, la magnífica fachada orientada hacia poniente.

La fachada es más ancha que alta, y contribuyen a subrayar esa dimensión dos hileras de arcos ciegos, que, en dos órdenes, o dos pisos, prestan toda su finura y gracia a este conjunto.

En el centro, una gran portada con tímpano y arquivoltas muy labradas. Y en lo alto, centrando un frontón triangular, un magnífico rosetón que tiene de su diámetro la misma anchura que la portada. Una cruz tallada remata el piñón en lo más alto, y al fondo a la izquierda, orientación norte, asoma la torre de un campanario que está en segundo plano. Es una torre fuerte, también románica, trabajada en la misma arenisca que el hastial.

A primera vista, se advierte enseguida que estamos ante un monumento que rompe la línea general del románico español. Su ascendencia francesa es notoria. Soria cae fuera de la zona de expansión, al menos más inmediata, del camino de Santiago. Todo invita a creer que la influencia francesa es directa y que llegó en un impulso aislado a esta iglesia de Santo Domingo o Santo Tomé. Sin un escalón, sin una etapa por tierras españolas, surge de improviso una iglesia francesa en este

(1) Este trabajo forma parte del convenio realizado para la empresa CORESAL, S. L., con el título de «Estudio de la degradación de los materiales pétreos utilizados en la fachada principal de la iglesia de Santo Domingo en Soria», y que fue entregado en diciembre de 1990.

(*) Licenciada en Ciencias Geológicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

(**) Doctor en Ciencias Geológicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

(***) Licenciada en Ciencias Geológicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

(****) Doctor en Ciencias Geológicas. Productos Bituminosos, S. A. (PROBISA).



FIGURA 1. Aspecto general de la fachada de la iglesia de Santo Domingo (Soria).

extremo de la meseta castellana. Aunque justo es decir que en la fachada de Santo Domingo lo más ágil y gracioso del arte francés queda atemperado por la serena sobriedad del arte de Soria.

La iglesia de Santo Domingo fue creación del rey Alfonso VIII, «el de las Navas», y en la fachada se reflejan las nostalgias de su esposa doña Leonor de Aquitania.

En esta portada admirable hay dos estatuas, colocadas en lugar muy destacado, que si bien no rompen la unidad y armonía del conjunto, no son exigencia de su arquitectura. Están puestas ahí con una intención muy concreta: la de honrar a los patronos y promotores de su construcción. Son la efigie de ambos reyes, Don Alfonso y Doña Leonor.

La disposición del templo es de forma alargada, observándose en ella las distintas épocas de construcción. Viene a constar de una nave central de cuatro tramos, que concluye en una cabecera ancha a modo de crucero, que remata a su vez en un ábside oculto en su mayor parte por un gran retablo. El comienzo de la nave, en sus tres primeros tramos más dos de los laterales, responde sin duda a la misma construcción del hastial y hace presentir un excelente templo que no llegó a completarse.

Es imposible fijar la fecha de esta primera parte de la construcción, pero en todo caso podría oscilar entre los años finales del siglo XII y los comienzos del XIII.

Dividiremos, para su descripción, al hastial en dos partes: una superior de paramentos lisos y animada por el magnífico rosetón abocinado, y otra inferior, en for-

ma de rectángulo, que contiene dos series de arquerías ciegas a cada lado del pórtico.

En el centro del rosetón se encuentra un precioso florón del que salen ocho columnas con capiteles, soportando éstas sendos arquillos semicirculares orlados. Más el exterior encontramos tres círculos concéntricos, con mejor decoración que el central. A los lados se sitúan dos delgadas columnas que soportan un bocelón semicircular, y exterior a éste sobresale un semicirculo apoyado en ménsulas. Corona el vértice, como ya hemos indicado, una cruz florenzada calada.

Del rectángulo inferior, y tras la contemplación de los dos órdenes de arquerías ciegas a cada lado, de marcada influencia «poitevin», con interesantes capiteles en los arcos de abajo, resalta con innegable vigor el pórtico, maravilla de ornamentación iconográfica.

Se compone el tímpano de cuatro arquivoltas que descansan en sendas columnas, siendo dobles las más exteriores. En los capiteles de dichas columnas se aprecian escenas en su mayoría del Génesis. Las numerosas figurillas que forman las cuatro arquivoltas están dispuestas en sentido radial. En el primer arco se encuentra ocupando la dovela central un ángel y distribuidos a cada lado los veinticuatro ancianos del Apocalipsis, tocando diversos instrumentos. El segundo arco contiene escenas de la degollación de los Santos Inocentes. De extraordinaria riqueza y ornamentación es el tercero, con escenas de la vida de la Virgen y del Niño Dios, que se encuentran, salvo la Anunciación a los pastores, bajo arquerías románicas. El cuarto arco contiene primordialmente diversos momentos de la Pasión de Cristo.

Cierra este conjunto una estrecha arquivolta con decoración vegetal. Encima de ésta, una cornisa sobre canchales que se cierra en los extremos por las figuras de Don Alfonso y Doña Leonor, sentados ambos y bajo doseletes. El tímpano contiene la solemne figura del Padre Eterno, en el centro, que sostiene en sus rodillas al Hijo Niño bendiciendo, y sobre su cabeza coronada se encuentra la paloma del Espíritu Santo. A ambos lados se sitúan cuatro ángeles con los símbolos de los Evangelistas, y en los extremos, Isafas o San José y la Virgen María.

2. CONDICIONES CLIMATICAS

El clima de la comarca de Soria es de tipo mediterráneo templado, siendo los valores de sus variables, medidas en un período de treinta años, los siguientes:

- Temperatura media anual: 8,5-10,3 °C.
- Temperatura media del mes más frío: 1,3-2,7 °C.
- Temperatura media del mes más cálido: 18,0-19,0 °C.
- Duración del período libre de heladas disponible: 2,5-4,8 meses.
- Evapotranspiración potencial anual: 614-648 mm.
- Precipitación media anual: 542-603 mm.
- Duración del período seco: 3 meses.

Los vientos dominantes son del cuarto cuadrante, principalmente los del noroeste y norte, seguidos de los de componente oeste.

La insolación media anual es de 2.440 horas, siendo el número medio de días de precipitación anual de unos noventa.

3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

Los materiales rocosos empleados en la construcción de la fachada principal de la Iglesia de Santo Domingo proceden de explotaciones de canteras a cielo abierto, en las cercanías de la localidad de Valonsadero (Soria). El aspecto macroscópico de la piedra corresponde a una arenisca poco consolidada con estructuras masivas y estratificaciones cruzadas, indicando medios deposicionales de tipo playero. Las muestras de cantera ofrecen una estructura muy similar a la de los monumentos, encontrándose variaciones en la cantidad de feldespato potásico, por lo que los tipos petrológicos oscilan entre cuarzoarenitas y subarcosas.

El aspecto del material observado en lámina delgada mediante microscopía óptica es el de una piedra relativamente homogénea y masiva con cantidad variable de feldespatos y una matriz argilomícea rellenoando parcialmente zonas intersticiales entre granos de cuarzo y feldespato potásico. El color de los sillares del monumento es variable dentro de la gama de colores claros, siendo el amarillo, siena, ocre e incluso rojizo (óxidos de hierro) algunos de los colores que se observan.

Con respecto a la mineralogía de las muestras de monumento y de cantera se observa una gran seme-

	MONUMENTO (%)	CANTERA (%)
CUARZO	75-85	77
FELDSPATO POTÁSICO	15-20	20
BIOTITA	1-3	2
ACCES.: CAQUINITA, CLORITA, OPACOS, TURMALINA, CIRCON	0-1	1

TABLA 1.

janza y, por tanto, la proporción de los minerales constituyentes varía poco (tabla 1).

El cuarzo observado está constituido fundamentalmente por granos monocristalinos bien seleccionados, de centil 1 mm y tamaño medio 0,3 mm, encontrándose algunos granos de sílex y metacuarcita. Estos granos presentan cemento silíceo syntaxial en continuidad óptica con el cristal, que por un lado consolida la roca, aunque debido a la presencia del feldespato, alterado y lixiviado con neoformación de caolinitas tipo «face-to-face», la cohesión producida por el cemento silíceo queda disminuida por la alteración de dicho feldespato potásico.

Las pocas micas existentes (biotitas) se encuentran algo alteradas, fundamentalmente por procesos de clorización.

La matriz de las muestras de monumento es argilomícea y arcillosa, en masas irregularmente distribuidas, con un 2-4 % sobre el total de la muestra observada, encontrándose en posiciones intersticiales entre los granos minerales.

Otro rasgo importante en las muestras observadas es la presencia de óxidos de hierro constituyendo una patina de recubrimiento alrededor de los granos minerales. Estos óxidos de hierro singenéticos suelen disponerse siguiendo planos de estratificación y laminación cruzada.

La observación de las fotografías hechas con el microscopio electrónico de barrido (MEB), y de los análisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X, contribuyen a corroborar lo anteriormente visto mediante microscopía óptica.

En las muestras de cantera se han observado cristales de cuarzo y de feldespato potásico (constituyentes mayoritarios en estas areniscas), recubiertos de una matriz-cemento de filosilicatos. También es de resaltar la observación de cristales de feldespato potásico alterados.

En las muestras extraídas del monumento es frecuente la aparición de dos minerales de neoformación: la caolinita (con estructura «face-to-face») y el yeso, este último cristalizado entre granos de cuarzo y de feldespato.

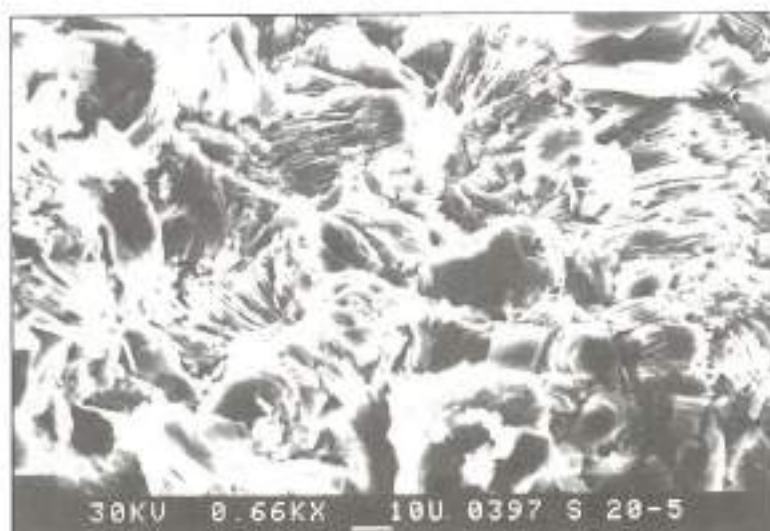


FIGURA 2. Disolución del cemento pozzolánico.

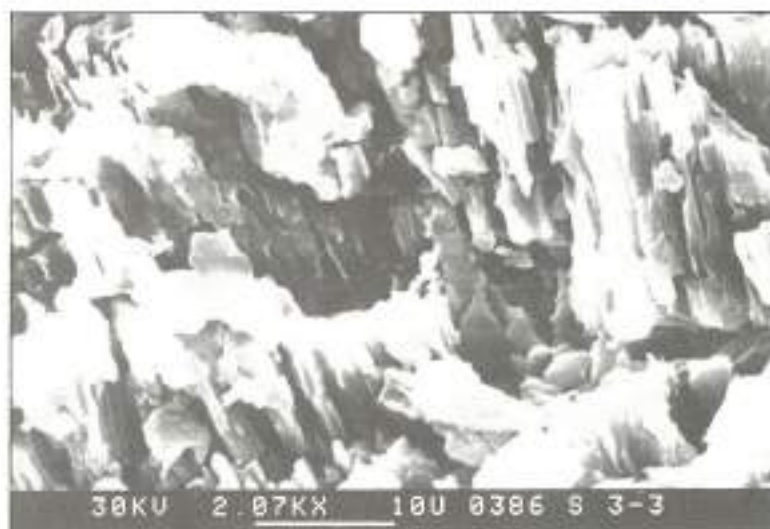


FIGURA 3. Disolución de feldespato potásico.



FIGURA 4. Proceso de orientación en cuarzo.

En algunos casos también se han visto procesos de disolución tanto del cemento filosilicatado, como de los feldespatos potásicos (figura 2-3).

Existen, además, procesos de crioturbación (procesos de hielo-deshielo), observados sobre cristales de cuarzo de las areniscas de la fachada de la iglesia de Santo Domingo, así como superficies carbonatadas sobre las mismas (figura 4).

Para finalizar, se han detectado sales como sulfatos (cristalizados sobre feldespatos) y cloruros.

4. FORMAS DE ALTERACION

Las formas de alteración que presentan las piedras de la fachada principal de la Iglesia de Santo Domingo, en Soria, están relacionadas fundamentalmente con los agentes atmosféricos de la región, sin faltar algunas debidas a la acción humana.

Las alteraciones debidas a los agentes atmosféricos son las que se presentan en mayor medida, siendo la arenización directa o inducida la más importante.

La figura 5 presenta un aspecto parcial de la fachada, en la que en conjunto pueden observarse algunas de

las formas de alteración. Se observan importantes pérdidas de material en la cornisa, arquivoltas y sillares situados bajo la pequeña marquesina de cristal instalada debajo del rosetón, con el fin de detener el importante lavado que allí se producía con la consiguiente arenización.

En la figura 6 tenemos un magnífico ejemplo de arenización; en ella se puede observar el lamentable estado en el que se encuentra la escultura de la Reina, que, observada de cerca, permite apreciar la pérdida de todo detalle que pudiera identificarla. También se observan descamaciones y migración de óxidos.

La figura 7 muestra un capitel de una de las columnas del pórtico, en el que se evidencia el importante deterioro ocasionado por procesos de hielo-deshielo que terminarán por disgregar el material.

Debidas a la acción humana se encuentran restauraciones relativamente recientes que confieren al aspecto general de la fachada una vista poco afortunada; así, en la figura 8 se observa en detalle la alteración y arenización de un mortero de restauración entre dos sillares de la fachada, que no es más que una muestra de los numerosos que se encuentran en igual o peor estado.



FIGURA 5. Aspecto parcial de la fachada de la iglesia de Santo Domingo (Soria).



FIGURA 6. Proceso de arenización, descamación y migración de óxidos. Escultura de la reina.



FIGURA 7. Procesos de helo-deshielo. Capitel de una de las columnas del pórtico.



FIGURA 8. Detalle de alteración y ornización de un mortero de restauración utilizado entre dos sillares de la fachada.



FIGURA 9. Detalle de exarriaciones, impactos y picaduras con pérdida de material.

Igualmente, y debido a la acción humana aunque en menor grado, aparecen a la altura de la influencia del hombre de a pie, excoriaciones, impactos y picaduras con pérdida de material, como puede apreciarse en la figura 9.

En conjunto no aparecen pátinas de ennegrecimiento importantes salvo en la parte inferior de la fachada, que presenta algunos sillares más oscuros y algunos de ellos con humedades y tonos ocres-rojizos relacionados posiblemente con migración de óxidos.

5. CARACTERIZACION PETROFISICA Y ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO

Para la determinación de las propiedades físicas, éstas se midieron sobre las probetas realizadas al efecto (cubos de $5 \times 5 \times 5$ cm, fig. 10), y siendo las propiedades determinadas las siguientes: color, densidad de la roca seca, porosidad abierta (accesible al agua) (tabla 2), contenido de agua en saturación, obteniendo las curvas de absorción y desorción libre de agua (figs. 11 y 12, respectivamente), y absorción bajo lámina de agua (ca-



FIGURA 10. Probeta impregnada con producto «A», que ha sido sometida a ciclos de cristalización de sales ligeros manchas blanqueadas.

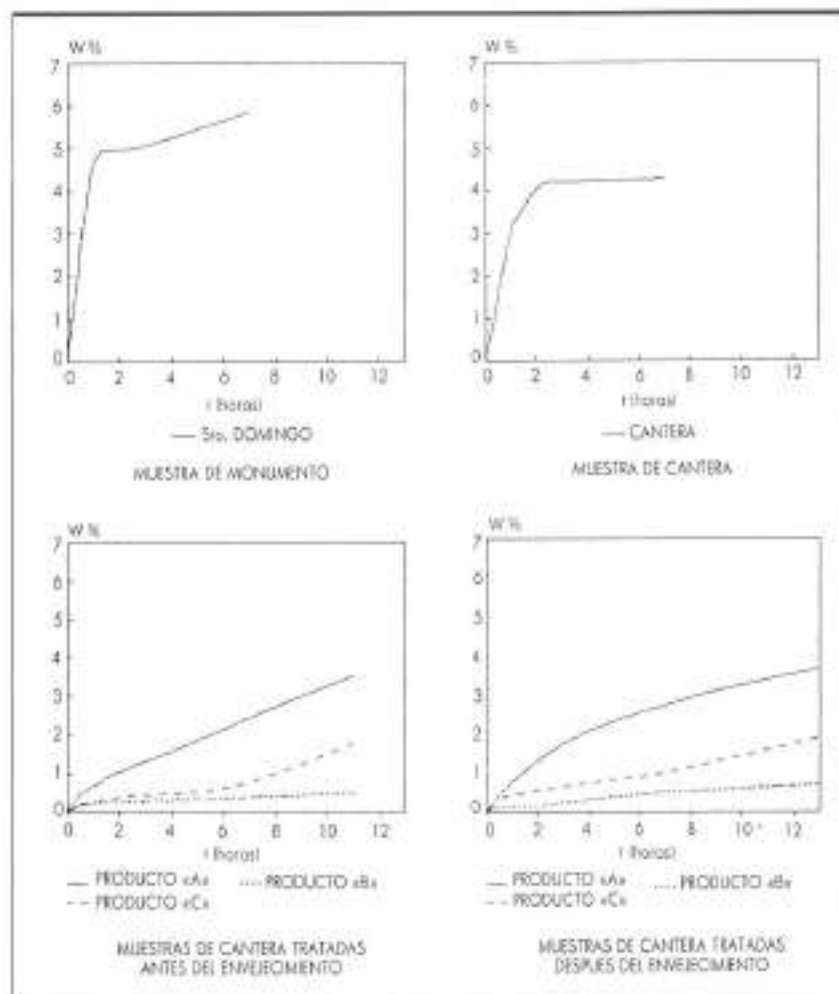


FIGURA 11. Ensayo de absorción libre de agua. Cantidad de agua W%/Tiempo.

	POROSIDAD ABIERTA (%)	DENSIDAD (g/cc)
MONUMENTO 1. STO. DOMINGO	11,79	2,12
CANtera 2. C-1	5,71	2,23
MUESTRAS IMPREGNADAS		
3. PRODUCTO A	3,67	2,47
4. PRODUCTO B	3,01	2,38
5. PRODUCTO C	3,58	2,39
MUESTRAS IMPREGNADAS Y ENSAYADAS		
6. PRODUCTO A	4,60	2,50
7. PRODUCTO B	3,50	2,26
8. PRODUCTO C	3,69	2,38

TABLA 2. Porosidad y densidad aparente.

pilaridad). Estas propiedades se midieron en tres ocasiones:

1. En la roca fresca de cantera.
2. Después de la aplicación de productos consolidantes e hidrofugantes sobre la misma.
3. Después de la realización de los ensayos de envejecimiento artificial acelerado (e.e.a.a.).

Respecto a los productos químicos se aplicaron tres tratamientos diferentes:

Tratamiento «A»:

Consolidante: ESTER DE SILICE/METILSILOXANO.

Hidrofugante: SILOXANO MODIFICADO.

Tratamiento «B»:

Consolidante: ESTER ETILICO DE ACIDO SILICICO.

Hidrofugante: ALKIL-ALKOXYLOXANO.

Tratamiento «C»:

Consolidante: RESINA ARTIFICIAL MODIFICADA.

Hidrofugante: ORGANOSILOXANO OLIGOMERICO.

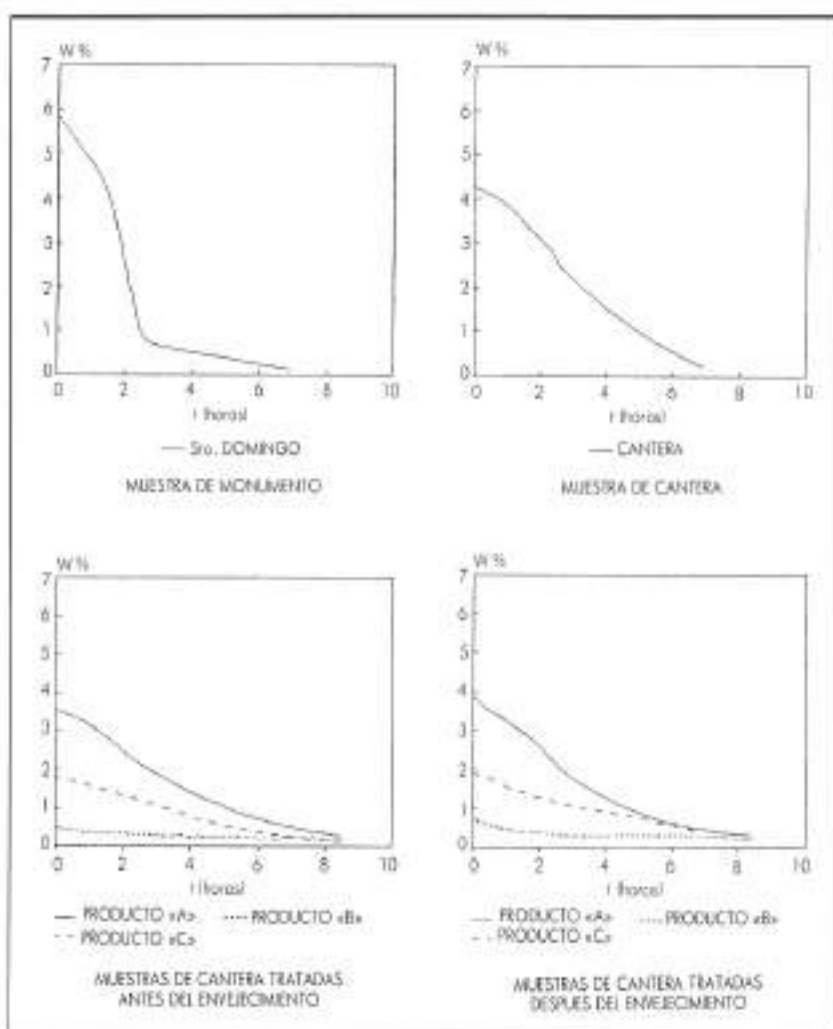


FIGURA 12. Ensayo de desorción libre de agua. Cantidad de agua W%/Tiempo.

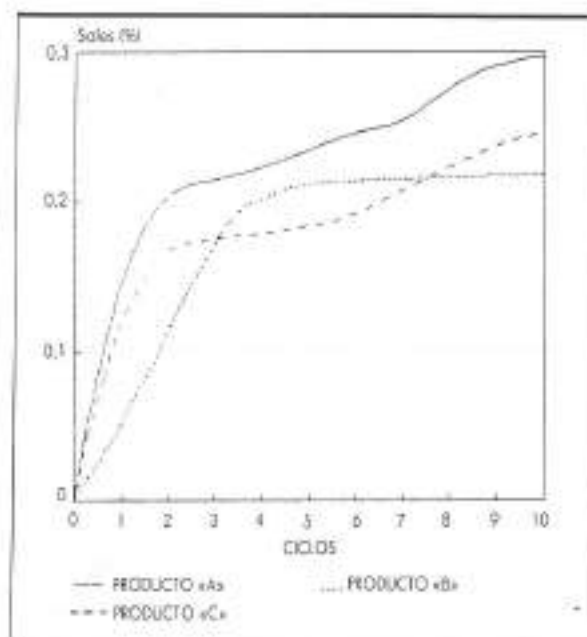


FIGURA 13. Ciclos de cristalización de sales.

Se sometieron las piedras a tres tipos de ensayos de envejecimiento artificial acelerado:

- Ciclos de cristalización de sales (fig. 13).
- Ciclos de heladicidad (hielo-deshielo) (fig. 14).
- Ciclos de exposición a la radiación ultravioleta.

Asimismo se efectuaron análisis de sales solubles sobre muestras rocosas (tabla 3). Estos análisis se realizaron sobre muestras de cantera y de monumento. Los cationes determinados fueron: Ca^{++} , Na^+ , K^+ y Mg^{++} ; los aniones determinados fueron: CO_3^{--} , HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- y NO_3^- .

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- Los cambios de color registrados con los tratamientos son mínimos, por lo que se considera que la apli-

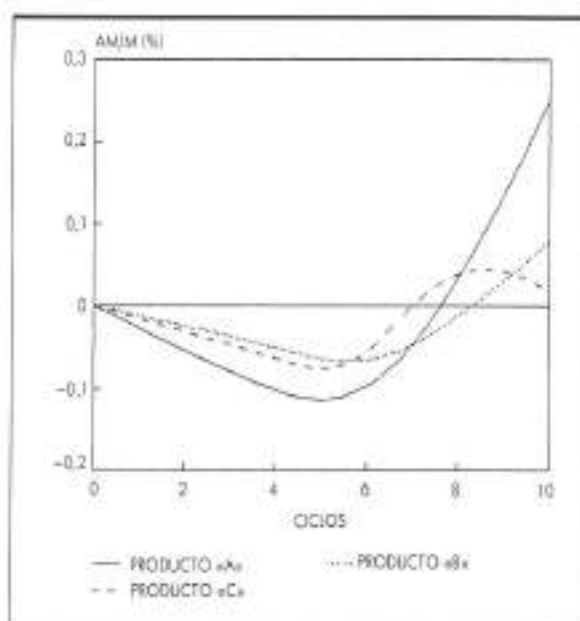


FIGURA 14. Ciclos de hielo-deshielo.

cación de cualquiera de los tres tratamientos, o incluso la sustitución de piedras del monumento por piedras de cantera, no produciría ningún impacto visual (no se puede asegurar a largo plazo).

- La porosidad de la piedra de Santo Domingo es de un 11,8 % y la de piedra de cantera es de un 5,7 %. Esta porosidad disminuye un 35-50 % tras la aplicación de los tratamientos, siendo el tratamiento B el más efectivo. Una vez realizados los e.e.a.a., estos valores aumentaron ligeramente, siendo las muestras impregnadas con tratamiento C las que menos variación experimentaron.
- Los valores de densidad se mantienen bastante constantes a lo largo del estudio, alrededor de 2,1-2,5 g/cm³.
- Durante los ensayos de absorción libre de agua, el tratamiento que parece que más reduce el contenido

MUESTRA	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
CANTERA C-1	9,3	30,6	248,8	10,4	—	138,6	—	331,6	—
STO. DOMINGO									
SI12,21	1.540	760	1.870	65	1.566	1.523	—	976	—
SI111,71	42	222	920	74	87	5.731	—	—	—
SI111,21	10	201	1.630	28	—	1.871	—	277	—
RENA	35	94	790	23	72	1.732	—	406	—
SI11,51	60	193	1.280	110	130	1.811	—	1.128	—
Ac14,Col	49	85	1.300	50	72	1.698	—	1.372	—

TABLA 3. Sales solubles (mg/l).

de agua es el B, aunque asimismo la pierde con gran dificultad.

- En los ensayos de desorción libre de agua, es de resaltar el comportamiento de las muestras sobre las que se aplicó el tratamiento A: a pesar de ser las muestras que mayor contenido en agua han absorbido, son las que más rápidamente la pierden.
- Respecto al ensayo de capilaridad, el tratamiento más efectivo fue el B, ya que al final del ensayo sólo absorbió un 0,15 % de contenido en agua.
- A la vista de los gráficos que reflejan el comportamiento de las muestras durante los e.e.a.a., se puede concluir que ninguno de los tres tipos de ciclos a los que se les ha sometido han producido un deterioro significativo, sin llegar a observarse cambios de visu. La pérdida de masa de las muestras sometidas a los ciclos de cristalización de sales fue de 0,13-0,21 %; en el caso de los ciclos de hielo-deshielo esta pérdida fue algo mayor, 0,19-0,30 %. En ambos casos el tratamiento B fue el que mejor se comportó. En el caso de los ciclos de exposición a la radiación U.V. no se apreció cambio de color alguno.
- Los análisis de sales solubles determinaron que el catión más abundante en las muestras de monumento es el calcio (valores de hasta 1.870 mg/l) y el anión cuantitativamente más importante es el sulfato (valores de hasta 5.731 mg/l).

BIBLIOGRAFIA

ARCHILLA, R. (1987). «Características climáticas y agrícolas de la provincia de Soria». Publ. Exema. Diputación Provincial de Soria. Soria, 63 pp.

CURSO DE METODOLOGIA Y TECNICAS DE ESTUDIO APLICADAS A LA CONSERVACION DE LAS ROCAS MONUMENTALES (OVIEDO 26-30 MARZO 1990). Departamento de Geología, Grupos de Petrofísica y Alteración, Universidad de Oviedo.

ESBERT, R. M., y MARCOS, R. M. (1988). «Las Piedras de la Catedral de Oviedo y su deterioración». Publ. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias, Oviedo, 144 pp.

ESBERT, R. M.; ORDAZ, J., y MONTOTO, M., et al. (1987). «Estado del deterioro de las piedras del frontón de la Biblioteca Nacional en vistas a su restauración». Departamento de Geología, Área de Petrología y Geoquímica, Universidad de Oviedo.

FARMER, I. W. (1968). «Engineering properties of rocks». E.F.N. Spon Ltd., London, 180 pp.

I.S.R.M. (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCKS MECHANICS) (1979). «Suggested methods for determining: Water content, porosity, density, absorption and related properties. Swelling and slake-durability index properties». Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 16(2), pp. 143-155.

JORNADAS SOBRE CONSERVACION Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA EN MONUMENTOS Y EN CONSTRUCCION (MADRID, 19-20 FEBRERO 1990). Escuela Superior de Ingenieros de Minas.

LOJENDIO, L. M. DE; RODRIGUEZ, A. (1979). Castilla/2, Soria, Segovia, Avila y Valladolid. Vol. 3. La España Románica. Ed. Encuentro, Madrid, 407 pp.

LOPEZ DEL AMO, J. L. (1983). «Toda Soria y su provincia». Ed. Eusebio de Oro, Barcelona, 96 pp.

ORDAZ, J., y ESBERT, R. M. (1988). «Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción». Materiales de Construcción, vol. 38, n.º 209, pp. 39-45.

RILEM, COMMISSION 25-PEM PROTECTION ET EROSION DES MONUMENTS (RECOMMANDATIONS PROVI-SOIRES) (1980). Materiaux et Constructions, 13 (75), pp. 175-253.