

Estudio del sistema poroso de la roca monumental de la ciudad de Zamora ⁽¹⁾

MONICA AÑORBE URMENETA (*)
FRANCISCO JAVIER SAINZ DE CUETO TORRES (**)
JOSE MARIA MARTIN POZAS (***)

RESUMEN. La ciudad de Zamora (España) tiene un importante patrimonio monumental, siendo su principal piedra de construcción conglomerados y areniscas silíceas del Paleógeno.

Estudios anteriores de caracterización de la piedra y de sus principales mecanismos de alteración nos han permitido conocer que la principal causa del deterioro, o agente de alteración, de la roca monumental de Zamora es la variación de volumen del agua con los cambios cíclicos de temperatura en el interior del sistema poroso de la roca ocasionando diversas modificaciones en él.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos, fundamentalmente con las técnicas de porosimetría de mercurio, microscopía electrónica de barrido y medida de la superficie específica, sobre las variaciones del sistema poroso en los litotipos de la roca de cantera, la misma sometida a procesos de envejecimiento artificial y la roca de los monumentos.

En este trabajo se reproducen los factores climáticos que dan lugar a cambios de humedad y temperatura actuando sobre la roca de cantera de forma que disminuyen sus propiedades resistentes. Se valora la incidencia de estos factores por los incrementos de peso de las probetas, por estimación visual de las mismas y por los cambios producidos en algunas de sus propiedades. Se concluye que el principal agente de alteración de la roca es el agua presente en su sistema poroso sometida a dilataciones térmicas y cambios de fase líquido-sólido.

STUDY OF THE POROUS SYSTEM OF THE MONUMENTAL ROCKS IN THE CITY OF ZAMORA (SPAIN)

ABSTRACT. *The City of Zamora (Spain) has an important monumental heritage, the principal type of stone used for construction being silicified sandstone and conglomerates of Paleogene age.*

Previous studies of the characterization of this kind of stone and the main mechanisms responsible for its weathering have allowed us to determine that the main causes of deterioration, or weathering agent, of the stone of the Zamoran monuments is the variation in the volume of water with the cyclic changes temperature in the porosity system of the stone, which leads to diverse alterations on it.

The present work reports on the results obtained, essentially with techniques of mercury porosimetry, scanning electron microscopy and specific surface, concerning the variations occurring in the porosity system in lithotypes from quarry rock, the same rock subjected to different processes of artificial aging and the rock from the monuments.

1. INTRODUCCION

Este trabajo pretende realizar un estudio profundo y detallado sobre el sistema poroso y las modificaciones o

mecanismos de alteración que en él se suceden para provocar una decohesión o disminución de las propiedades resistentes de la roca monumental de la ciudad de Zamora, desarrollando ésta diversas morfologías macroscópicas (Añorbe et al. 1991-a y 1992).

Mediante el envejecimiento artificial acelerado se comprobó que el agua presente en el sistema poroso de la roca, sometida a cambios cíclicos de humedad y temperatura, es el principal agente causante de la degradación de la roca ornamental de Zamora, dando lugar a la mayor parte de los indicadores visuales de alteración, y produciendo ligeras variaciones en las propiedades de estructura y más importantes en las hídricas. El volumen poroso total accesible al agua aumenta ligeramen-

(1) Este trabajo fue presentado en el «7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stones», celebrado en Lisboa (Portugal) del 15 al 18 de junio de 1992.

(*) Geóloga, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX-MOPT, Madrid.

(**) Doctor Ingeniero, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX-MOPT, Madrid.

(***) Doctor Químico, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca.

te y se produce un descenso grande en la capacidad de succión de agua por capilaridad. Se supone pues que se producen modificaciones en el sistema poroso que dan lugar a un aumento ligero de la intercomunicación entre los poros y un aumento claro del diámetro de éstos ya existentes y accesibles. Estas modificaciones son bastante superficiales en las probetas, observándose un aumento del diámetro de los poros en la superficie de éstas.

La roca monumental de la ciudad de Zamora es un conglomerado silíceo con cemento opalino. En la caracterización de esta roca se han destacado algunos aspectos como fundamentales en su durabilidad: la heterogeneidad del tamaño de los clastos, la diferente intensidad de la cementación según zonas y la variación de la cantidad de matriz arcillosa que aparece en el seno del cemento silíceo (Añorbe et al. 1991-b y c). La porosidad abierta o accesible al agua que presenta esta roca es una media del 16 %.

El origen del agua del sistema poroso es diferente en las distintas zonas del edificio, y distinto también su índice de saturación. Puede proceder de aguas del subsuelo que ascienden por capilaridad saturando la roca en las zonas inferiores de los edificios dependiendo de la época del año; otras procedencias pueden ser por lluvias, nieblas, condensación en la superficie de los sillares, etc.

2. METODOLOGIA

Para el estudio micromorfológico se han utilizado las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), con EDX incorporado (ISI DS-130, Kevex 7007).

La distribución porométrica se ha realizado por la

técnica de inyección de mercurio a diferentes presiones crecientes y decrecientes con fragmentos de la roca de tamaño «denteja» (Micromeritics Poresizer 9320). Se ha seleccionado para la comparación de la distribución porométrica la representación del logaritmo del volumen de mercurio intruido frente al diámetro de los poros que se considera la gráfica más representativa de la distribución cuantitativa del tamaño de los poros.

La superficie específica (Blaine) se ha determinado con el fin de valorar el aumento de la superficie porosa del volumen de huecos que depende del aumento de diámetro e intercomunicación entre poros que se supone se produce en la roca cuando está sometida a los agentes y factores externos de agresión.

Todas estas determinaciones se han realizado sobre roca de los monumentos, la roca sana de cantera y ésta misma sometida al envejecimiento experimental acelerado.

3. RESULTADOS

3.1. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO

Se ha realizado el estudio de diversas muestras por microscopía electrónica de barrido con microanálisis por energía dispersiva de rayos X.

Las muestras presentan un aspecto compacto y destaca la heterogeneidad del tamaño de los clastos que son fundamentalmente silíceos y se encuentran embebidos en una masa de cemento opalino. También se han podido identificar micas y feldespatos.

La observación por SEM nos permite apreciar zonas donde el cemento es muy homogéneo y otras regiones donde en el seno de este cemento aparecen dispersos minerales de desarrollo laminar (caolinitas y esmectitas).



FOTO 1.

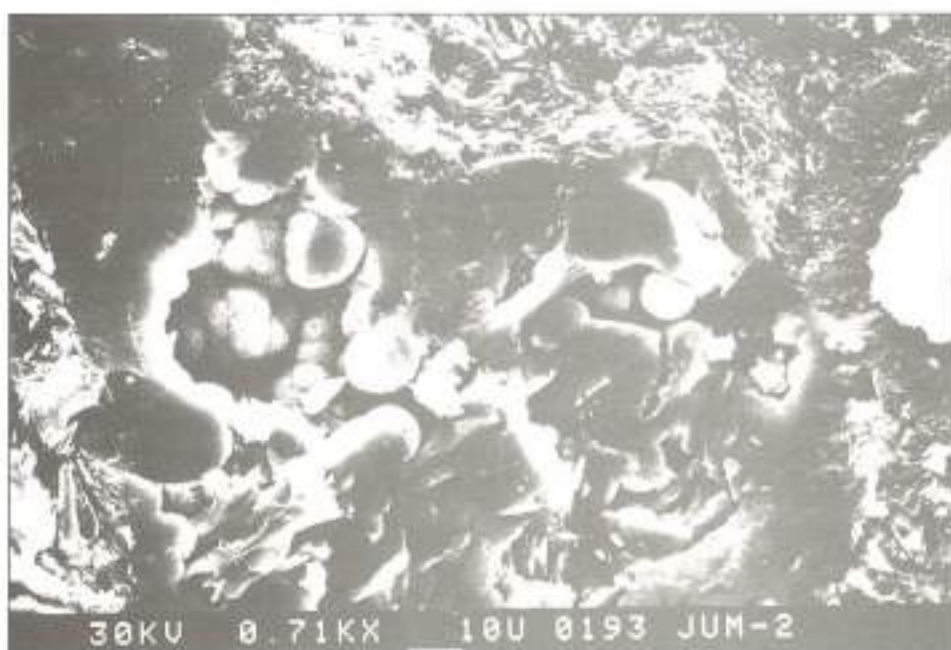


FOTO 2.

En general la roca es poco porosa, siendo estos poros de diferentes tamaños y formas, presentando todos ellos distintos tipos de superficies opalinas o morfologías del ópalo en su interior (fotos 1, 2, 3 y 4) que caracterizan su estructura.

Las distintas morfologías opalinas que se pueden distinguir son (Bustillo, 1976):

— **Masiva o compacta:** corresponde a las zonas de la roca que están más intensamente cementadas y donde no hay porosidad.

— **Esferoidal:** está constituida por esferas compactas de un diámetro medio de 15 μm aproximadamente y aparecen en los poros de la roca. De acuerdo con Floerke et al. (1972) puede tratarse de lepiesferas de ópalo CT intensamente cementadas. Según estos autores, la continua precipitación de sílice entre las lepiesferas iniciales de ópalo CT genera esferas de sílice estructuralmente densas o masivas. Estas esferas fusionadas entre sí dan lugar a estructuras que tabiculan los poros disminuyendo así su diámetro original.



FOTO 3.



FOTO 4.

— **Cristalina:** Se puede observar en los huecos de la roca que están parcialmente cementados, recubriendo la superficie de los poros, tubiquen y esferas. Son pequeñas placas de ópalo CT que constituyen tapizados de lepiesferas.

La roca sometida al envejecimiento artificial muestra cómo las distintas estructuras opalinas que se reconocen en los poros están deterioradas, dando lugar a pérdida de material y aumento del tamaño del poro.

3.2. POROSIMETRIA DE MERCURIO

La distribución cuantitativa del tamaño de los poros accesibles al mercurio que presentan tanto la roca de cantera (fig. A) como ésta sometida al envejecimiento artificial acelerado (30 ciclos del ensayo de heladicidad) es muy similar. El mayor volumen de huecos corresponde a aquellos cuyo diámetro es de $0,01 \mu\text{m}$ ($100 \text{ \AA}$) del rango de los mesoporos. El resto de los poros se distribuye en proporciones similares entre los diámetros de $100 \mu\text{m}$ ($0,1 \text{ mm}$) hasta el importante máximo registrado para los poros de diámetro de $0,01 \mu\text{m}$. La roca sometida al envejecimiento artificial (fig. B) muestra un ligero aumento del volumen poroso de diámetro mayor de $6 \mu\text{m}$.

En la roca del monumento (figs. C y D) la distribución de los diámetros varía sensiblemente y el volumen poroso total presenta un aumento. Al igual que en la roca de cantera, la mayor proporción de poros corresponden al diámetro de $0,01 \mu\text{m}$, aunque en mayor cantidad que en ella. En el rango de los macroporos, en aquellos que son mayores de $6 \mu\text{m}$ ($0,006 \text{ mm}$) de diámetro se produce un aumento del volumen poroso, es decir, hay más poros con estos diámetros. En la zona interme-

dia de diámetros de 6 hasta $0,01 \mu\text{m}$ la distribución y volumen de poros es similar a los de la roca de cantera.

3.3. SUPERFICIE ESPECIFICA

TIPO DE ROCA	SUPERFICIE ESPECIFICA (cm^2/g)
ROCA DE CANTERA	11,981
ROCA DE MONUMENTO	12,941

TABLA 1.

4. CONCLUSIONES

El estudio comparativo de los resultados descritos anteriormente, proporcionados por las distintas técnicas utilizadas, nos permite proponer un **mecanismo de alteración** de la roca monumental de Zamora sometida a la acción de la humedad y la temperatura como principales factores climáticos que inciden sobre ella.

La porosimetría de mercurio muestra cómo se produce un aumento en la cantidad de los macroporos mayores de $6 \mu\text{m}$ ($0,006 \text{ mm}$), lo que sucede a costa de otros más pequeños que aumentan su tamaño. Asimismo los poros de $0,01 \mu\text{m}$ ($100 \text{ \AA}$) de diámetro, que por sus dimensiones podrían responder a la propia estructura cristalina del ópalo CT, se ven incrementados en número y volumen poroso. Este hecho podría deberse al aumento de intercomunicación de huecos en el interior de la roca; dichos huecos existían aislados y no eran accesibles al mercurio. La acción continuada de los factores climáticos podrían ponerlos en contacto, permi-

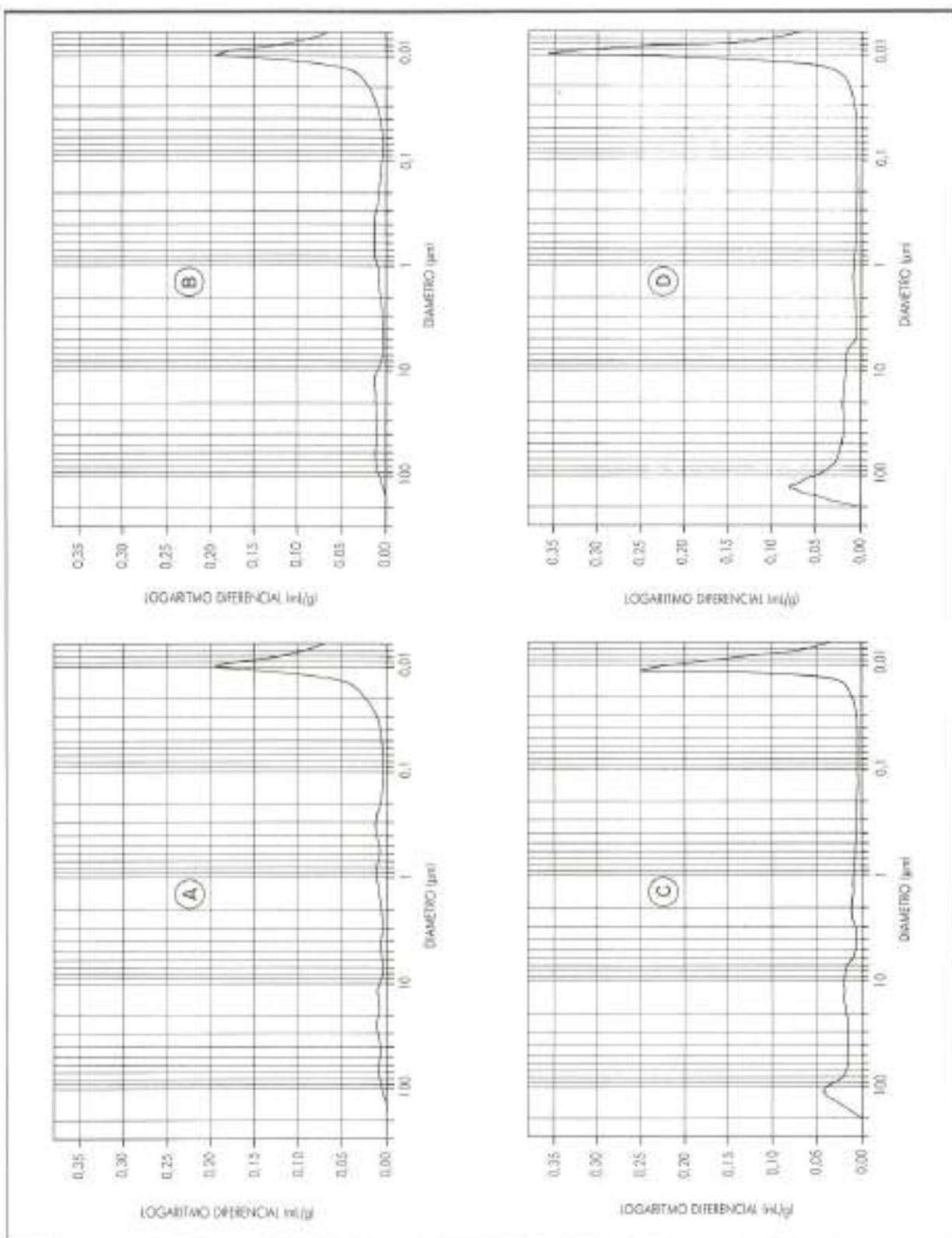


FIGURA 1.

tiendo así un aumento del volumen poroso correspondiente a ese diámetro.

Mediante la MEB se observa la existencia de estructuras opalinas que tabican los poros. En las épocas del año en las que el sistema poroso de la roca se encuentra saturado de agua y sometido a las variaciones de temperatura que provocan cambios de volumen por dilataciones térmicas o por cambios de fase líquido sólido fundamentalmente, estos procesos dan lugar a tensiones en el interior de los poros que pueden llegar a deteriorar, e incluso a romper a lo largo del tiempo, los tabiques opalinos y microfisurar los minerales constituyentes de la roca, aumentando así el tamaño de los poros o la intercomunicación entre ellos.

El estudio de la superficie específica (Blaine) de la roca corrobora estos resultados descritos mostrando cómo la superficie aumenta en la roca del monumento con respecto a la roca de cantera, lo que supone un aumento de la porosidad.

Es por esto que la intensidad de la cementación opalina es fundamental en la durabilidad de la roca. Las modificaciones progresivas del sistema poroso, por rotura de estructuras opalinas y microfisuración mineral, aumento del diámetro e intercomunicación de los poros, son producidas por la acción cíclica y continua de los cambios de volumen del agua en el seno del sistema poroso de la roca; y pueden dar lugar a lo largo del tiempo al deterioro incluso de las variedades menos porosas y más intensamente silicificadas.

A la vista de estos resultados se propone como prin-

cipal agente de alteración de la roca monumental de la ciudad de Zamora al agua presente en el sistema poroso de la roca, y como principal mecanismo de alteración a los cambios de volumen cíclicos que ésta sufre al ser sometida a la acción cíclica de los factores climáticos propios de la ciudad a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

- AÑORBE, M.; SUAREZ, M.; DIEZ TORRES, J. A.; NAVARRETE, J., y MARTIN POZAS, J. M. (1991-a). Patologías de la roca monumental de la Ciudad de Zamora. *Bol. Soc. Esp. Mine.*, vol. 14-1, pp. 1-2.
- AÑORBE, M.; DIEZ TORRES, J. A.; SUAREZ, M.; NAVARRETE, J., y MARTIN POZAS, J. M. (1991-b). Caracterización petrográfica y mineralógica de la roca monumental de la Ciudad de Zamora. *Bol. Soc. Esp. Mine.*, vol. 14-1, pp. 27-28.
- AÑORBE, M.; DIEZ TORRES, J. A.; SUAREZ, M.; NAVARRETE, J., y MARTIN POZAS, J. M. (1991-c). Caracterización de la piedra monumental de la Ciudad de Zamora (España). *Bol. Soc. Esp. Mine.* (en prensa).
- AÑORBE URMENTA, M.; SAINZ DE CUETO TORRES, F. J., y MARTIN POZAS, J. M. (1992). Indicadores visuales o formas macroscópicas de alteración de la piedra monumental de la Ciudad de Zamora. III Cong. Geol. de España (en prensa).
- BUSTILLO REVUELTA, M. A. (1976). Texturas de las rocas silíceas isorgánicas en ambiente continental y su significado genético. *Estudios geol.*, vol. 32, pp. 371-389.
- FLORKE, O. W.; HOLLMANN, K.; RAD, U., y RUSCH, H. (1972). Intergrowth and Twinning in Opal C-T Lepispheres. *Contrib. Mineral Petrol.*, vol. 58, pp. 235-242.