

Alteración experimental de la roca monumental de la ciudad de Zamora

MONICA AÑORBE URMENETA (*)

JUAN ANTONIO DIEZ TORRES (**)

MERCEDES SUAREZ BARRIOS (***)

JOSE MARIA MARTIN POZAS (****)

RESUMEN. 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.

EXPERIMENTAL CHANGES IN THE MONUMENTAL ROCKS IN THE CITY OF ZAMORA

ABSTRACT. In this paper are shown the climatic factors that generate humidity and temperature changes, acting on the quarry rock in such a way that its resistant quality is decreased. It's appraised the influence of these factors by means of the specimens weight increases, the visual valuation, and the estimated changes in several of their properties. It may be concluded that the main agent of the rock alteration is the water inclosed in the porosity system, subjected to thermal expansions and liquid-to-solid phase changes.

1. INTRODUCCION

La principal piedra monumental de la ciudad de Zamora procede de los afloramientos de conglomerados y areniscas silíceas de origen fluvial que constituyen el tramo superior de la Unidad Basal o Inferior del Paleógeno del borde oeste de la Cuenca del Duero.

Dichos materiales afloran en una estrecha franja de dirección norte-sur adosada al margen occidental de la cuenca y, por la consistencia que les confiere su cemento silíceo, dan lugar a un relieve característico que forma escarpes inclinados al oeste sobre los cuales se encuentra situada la propia ciudad de Zamora (foto 1).

Los condicionantes intrínsecos de la alteración de esta roca son debidos a su propia naturaleza, ya que presenta un amplio intervalo granulométrico en sus componentes clásticos, siendo éstos fundamentalmente de cuarzo mono y policristalino, apareciendo también fragmentos de rocas sobre todo cuarcitas y en menor

proporción rocas ígneas y metamórficas, además de moscovitas, feldeespatos, turmalinas, etc. (foto 2).

El cemento-matriz que aglomera los clastos cierra intensamente la porosidad de la roca. Dicho cemento es de naturaleza silícea y está constituido fundamentalmente por ópalo A y CT, y en menor medida por calcitonita, proporcionándole a la roca un color blanquecino. Sobreimpuesto a él aparece otro cemento ferruginoso de goethita y hematites que tinte a la piedra en manchas irregulares de colores amarillos y/o rojos y malvas respectivamente. La matriz arcillosa embebida en el seno del cemento silíceo está constituida por caolinita y esmectitas (Añorbe et al., 1991-a).

De la caracterización de la roca monumental de la ciudad de Zamora procedente de las canteras se puede concluir que presenta en todas sus propiedades de estructura e hidricas un amplio intervalo o dispersión de valores debido a la heterogeneidad de los clastos, a las variaciones locales en la intensidad de la cementación y a la mayor o menor proporción de matriz arcillosa en el seno del cemento silíceo (Añorbe et al., 1991-c), factores que condicionan su comportamiento ante los agentes de agresión externa dando lugar a una degradación diferencial de los sillares de los monumentos. Es por esto que no se pueden definir varios litotipos diferentes, sino un único litotipo que puede presentar distintas variedades.

(*) licenciada en Geología, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX-MOPT, Madrid.

(**) licenciada en Geología, Laboratorio de Geotecnia, CEDEX-MOPT, Madrid.

(***) licenciada en Geología, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca.

(****) licenciado en Ciencias Químicas, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca.



FOTO 1. Vista general del casco antiguo de la ciudad de Zamora que se asienta sobre los escarpes de la misma roca con la cual fue construida.

En este trabajo se ha pretendido reproducir los factores climáticos debidos a cambios de humedad y temperatura que influyen en la degradación de esta roca de cantera modificando sus propiedades, y valorar la incidencia de cada uno de dichos factores.

Asimismo, se han catalogado los indicadores visuales o formas macroscópicas de alteración que se observan en los sillares de los distintos monumentos de la ciudad. Para la unificación de términos se han consulta-

do los definidos por Ordaz y Esbert (1988), Alcalde (1989), Martín (1990) y NORMAL 1/80 (CNR-ICR). Dichas formas se repiten sistemáticamente en los sillares de todos los edificios, sea cual sea la variedad de esta roca que los constituye (foto 3). Pueden ser clasificados en tres tipos diferentes (Añorbe et al., 1991-b): **A) Modificaciones superficiales:** pátina de envejecimiento o patinatura, pátina de enmugrecimiento o tizne y pátina biológica o biocostra.

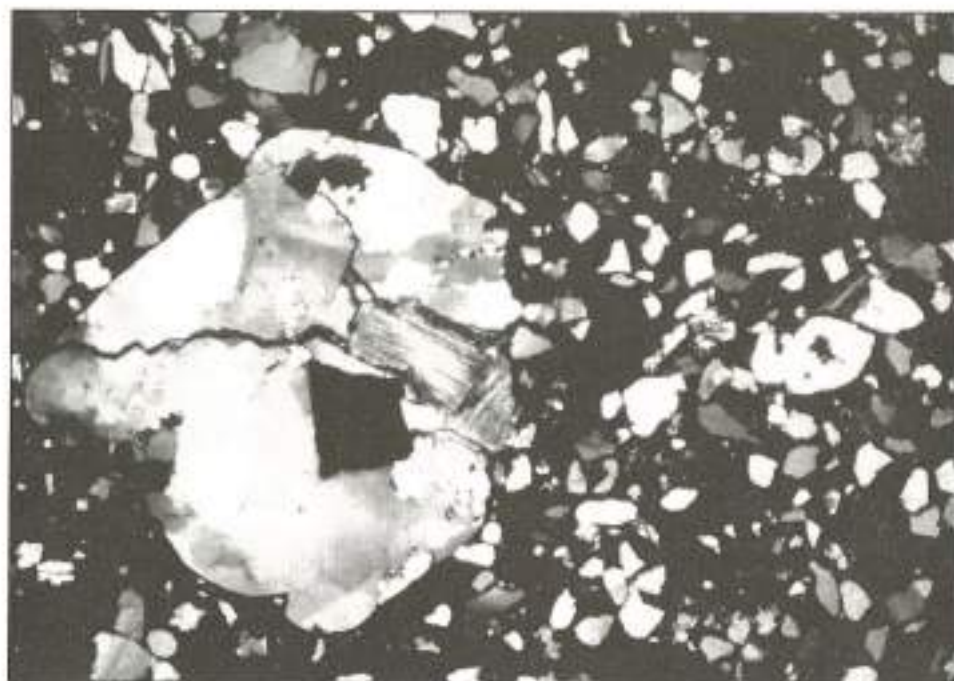


FOTO 2. (Diez aumentos-luz polarizada.) Microtextura característica de la roca que presenta un amplio intervalo granulométrico: es el tamaño de los clastos que son generalmente de cuarzo. El clasto de mayor tamaño es un fragmento de roca ígnea de textura granada. El cemento de ópalo gelatinoso engloba los clastos.



FOTO 3. Aspecto de un contrafuerte de la fachada sur de la Iglesia de la Magdalena donde se observan diversas formas de alteración que desarrolla la roca.

B) Eliminación o pérdida de materia: erosión, desagregación, descementación y arenización.

C) Rupturas (fisuras y grietas) y **disyunciones** (descamaciones y desplazaciones).

2. TECNICAS Y METODOLOGIA

Para el envejecimiento acelerado en el laboratorio o alteración experimental se han seleccionado los ensayos de humectación (ciclos de humedad-sequedad) y de heladicidad (ciclos de hielo-deshielo) que se han realizado sobre 18 muestras procedentes de 4 canteras elegidas, bien por estar reseñadas en bibliografía de tipo histórico, o bien por encontrarse en las confluencias de los afloramientos de la roca con las principales vías de acceso a la ciudad por el oeste, donde se pueden apreciar multitud de canteras, actualmente abandonadas, en las cuales el material es similar al de los monumentos.

Con el fin de conocer la incidencia en el sistema poroso de la roca de los factores climáticos que ocasionan los cambios de temperatura y humedad, es decir, que influyen en la durabilidad de esta piedra de construcción; y evaluar la resistencia o tendencia de la misma a debilitarse en sus propiedades, se han sometido a 16 probetas cúbicas (125 cc) de las distintas variedades de la roca a 30 ciclos de los ensayos de humectación y heladicidad.

La resistencia a la heladicidad y a los cambios de temperatura caracteriza el comportamiento del material cuando es sometido a ensayos sucesivos que tienden a estimar por simulación la durabilidad de la roca bajo condiciones climáticas naturales de humedad y temperatura.

Para seleccionar y definir los ciclos adecuados se han tenido en cuenta: los datos climáticos de un período de

50 años de la ciudad de Zamora proporcionados por el Centro Meteorológico Zonal del Duero (Valladolid), las recomendaciones provisionales de la Comisión PEN-25 (RILEM), y los trabajos de Ebert et al. (1985 y 1989). De esta manera los ensayos se han definido realizando los ciclos siguientes:

ENSAYO DE HUMEDAD-SEQUEDAZ. Ciclo tipo (2 días):

- 30 h de inmersión total de las muestras en agua desionizada.
- 16 h de secado en estufa a 103 °C.
- 2 h de enfriamiento en desecador.

ENSAYO DE HIELO-DESHIELO. Ciclo tipo (1 día):

- **Etapas de congelación:** 7 h en arca congelador con disminución progresiva de la temperatura desde 5° hasta 15 °C donde se mantiene durante 4 h.
- **Etapas de descongelación:** 17 h de inmersión total en agua desionizada.

Las distintas propiedades de estructura e hídras (tabla 1) determinadas han sido calculadas mediante los ensayos recomendados por la RILEM (1980): densidad real y aparente, porosidad abierta o accesible al agua, coeficiente e índice de saturación, y curvas y coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

3. RESULTADOS

La valoración de los resultados del envejecimiento artificial acelerado se realiza, a partir de los datos obtenidos en los dos ensayos de alteración experimental seleccionados, según los siguientes criterios:

A) Los incrementos de peso de las probetas a lo largo de los 30 ciclos de cada uno de los ensayos (tabla 2).

CONCEPTO-PARAMETRO	FORMULA	LEYENDA
DENSIDAD REAL (kg/m ³)	$D_R = M_1 / (M_2 - M_3)$	M_1 = Masa de la probeta seca antes de absorción bajo vacío (kg). M_2 = Masa hidrostática de la probeta saturada de agua bajo vacío (kg).
DENSIDAD APARENTE (kg/m ³)	$D_A = M_1 / (M_3 - M_2)$	M_3 = Masa de la probeta saturada en agua bajo vacío pesada al aire (kg).
POROSIDAD ABIERTA ACCESIBLE AL AGUA (%)	$n_v = (M_2 - M_1) / (M - M_1) \times 100$	P_1 = Peso de la muestra saturada en agua (kg). P = Peso de la muestra seca (kg).
CONTENIDO HUMEDAD DE SATURACIÓN (%)	$W_s = (P_1 - P) / P \times 100$	M = Masa de la probeta seca antes de absorción a presión atmosférica (kg). M_2 = Masa de la probeta en inmersión durante 48 horas (kg).
COEFICIENTE DE SATURACIÓN (%)	$S = (W_s - M) / (M_2 - M_1) \times 100$	m = Masa de agua absorbida por unidad de superficie (kg/m ²). t = Tiempo (s ^{0.5}).
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE AGUA (kg/m ² × s ^{0.5})	$A = m \sqrt{t}$	

TABLA 1. Propiedades de estructura e hídras.

ENSAYO	INTERVALO	MEDIA
HUMEDAD-SEQUEDAZ	(-6,98, +0,90)	+0,01
HELADICIDAD	(-15,27, +0,66)	+0,16

TABLA 2. Incrementos de peso (%).

Dichos incrementos no son muy significativos. Las variedades de la roca más compactas debido a la intensidad de su cementación silíceo y con pequeña proporción de minerales arcillosos en su seno, sufren en general un ligero aumento de peso a lo largo del ensayo. Esto puede ser debido a la retención de agua en poros de muy pequeño diámetro, o bien, por la formación de enlaces débiles de las moléculas polares de agua con la superficie libre del cemento opalino en los poros (García Hernández, 1981). Las probetas con mayor proporción de matriz arcillosa sufren pérdidas de peso ligeras, salvo alguna probeta cuya pérdida es importante debido a que presentaba alteración en la propia cantera.

B) La estimación visual de las modificaciones que se producen en la superficie de las probetas a lo largo de los ensayos. En general se aprecian en las distintas caras de las probetas ligeras pérdidas de material que afecta primero al cemento-matriz, y posteriormente ocasiona la pérdida o desprendimiento de granos. En la observación con lupa binocular la pérdida de material se manifiesta produciendo un aumento del tamaño de los poros en las superficies de las probetas. Las variedades de roca más intensamente cementadas no presentan modificaciones superficiales significativas a simple vis-

ta. La probeta de la muestra VR2, y otras probetas de aspecto menos compacto) sometidas al ensayo de heladicidad han desarrollado morfologías macroscópicas de alteración similares a las observadas en los sillares de los monumentos, siendo éstas: descementación, desagregación granular e incluso desmoronamiento, y descomposición y desplazación (fotos 4, 5 y 6).

C) La variación de propiedades de estructura e hídras de la roca de cantera, calculadas según las normas RILEM (1986), antes y después de ser sometida al envejecimiento artificial. Los resultados obtenidos en las variaciones de las propiedades de la roca muestran que son similares en los dos ensayos realizados, aunque son sensiblemente superiores los daños sufridos por las probetas sometidas al ensayo de heladicidad por ser éste más agresivo:

Densidad real: las variedades con mayor proporción de ópalo presentan las menores densidades en todas las probetas debido a que la densidad del ópalo es inferior a la del cuarzo. En todo caso las densidades calculadas de todas las probetas son muy similares y no varían significativamente al ser sometidas a los ensayos dado el carácter superficial de la alteración que producen estos ensayos en las probetas a lo largo de 30 ciclos (fig. 1).

Densidad aparente: es más elevada en las variedades más silíceas por estar más intensamente cementadas y presentar por lo tanto menor volumen de poros; por el contrario las variedades con mayor proporción de matriz arcillosa presentan menor densidad aparente. Asimismo, los ensayos de envejecimiento no varían prácticamente la densidad aparente excepto en el caso de alguna muestra que presentaba alteración en la cantera (fig. 1).



FOTO 4. Detalle de un sillar de la fachada este de la Catedral gravemente deteriorado por desmenución y desagregación granular.

Porosidad abierta o accesible al agua: supone la diferencia entre las densidades real y aparente de manera que no se modifica significativamente, aunque se puede señalar una tendencia a aumentar la diferencia, lo que indicaría un ligero incremento en el volumen poroso que se debe al aumento del diámetro e intercomunicación de los poros en las zonas exteriores de las probetas (fig. 1).

El contenido en humedad de saturación es ligeramente más elevado tras el envejecimiento, ya que el

peso de agua que hay en la probeta saturada con respecto al peso total de la probeta seca es mayor después de los ensayos de alteración artificial al alojarse más cantidad de agua en los poros de la zona superficial de las probetas (fig. 2).

Por el mismo motivo, el **coeficiente de saturación** es mayor que en la roca sana ya que el porcentaje de llenado de la porosidad aumenta al incrementarse el diámetro de los poros (fig. 3).

El **coeficiente de capilaridad** sufre una clara dis-



FOTO 5. Detalle de un sillar de la fachada sur de la Iglesia de la Magdalena que ha desarrollado diversas morfologías de alteración: desmenución, descamación, etc.

FOTO 6. Probeta de la muestra VR2 sometida al ensayo de heladicidad. En ella se pueden observar morfologías de alteración similares a las observadas en los sillares de los monumentos: descementación, desagregación granular, desplazación, etc., e incluso desmoronamiento.



minución con respecto a la roca sana, lo que pone de manifiesto de nuevo que el diámetro de los poros ha aumentado, disminuyendo así su capacidad de absorber o succionar agua por capilaridad (fig. 4). Las figuras 5 y 6 muestran la variación de las curvas de absorción de agua por capilaridad de dos probetas con el ensayo de Heladicidad (H) y de Humedad-Sequedad (HS). La muestra JUN4 está intensamente cementada y no alcanza la saturación total. La muestra VA4, con abundante matriz arcillosa y menos cemento silíceo, sufre un mayor descenso en la capacidad de succión de agua por

capilaridad, no llegando en el tiempo de ensayo de heladicidad a saturación total.

4. DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

— El agua embebida en el sistema poroso de la principal roca monumental de la ciudad de Zamora, sometida a cambios cíclicos de temperatura en el ensayo de heladicidad como **factor extrínseco** de alteración, constituye el **agente principal** de alteración de la roca, produciendo en ella tensiones mecánicas en

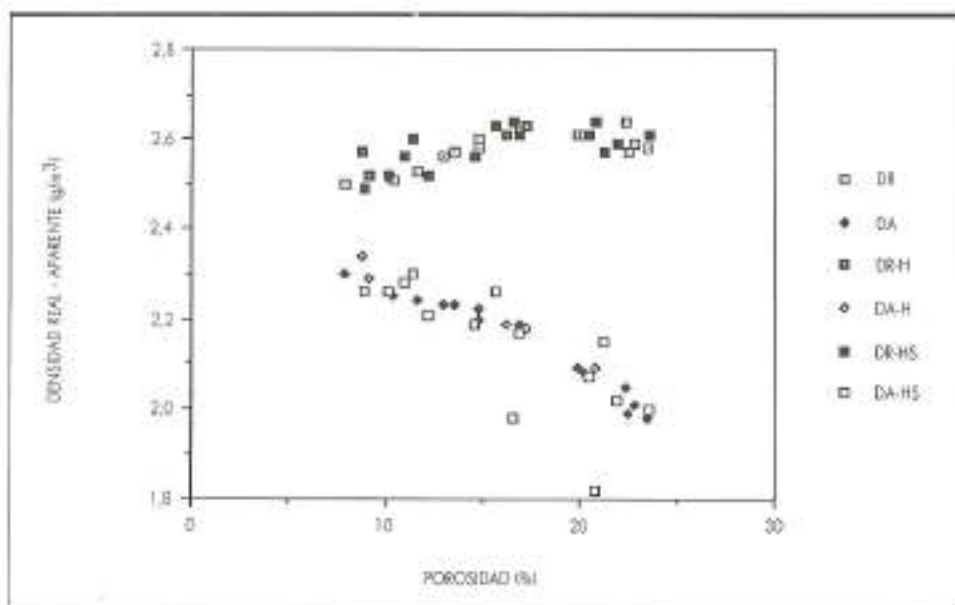


FIGURA 1.

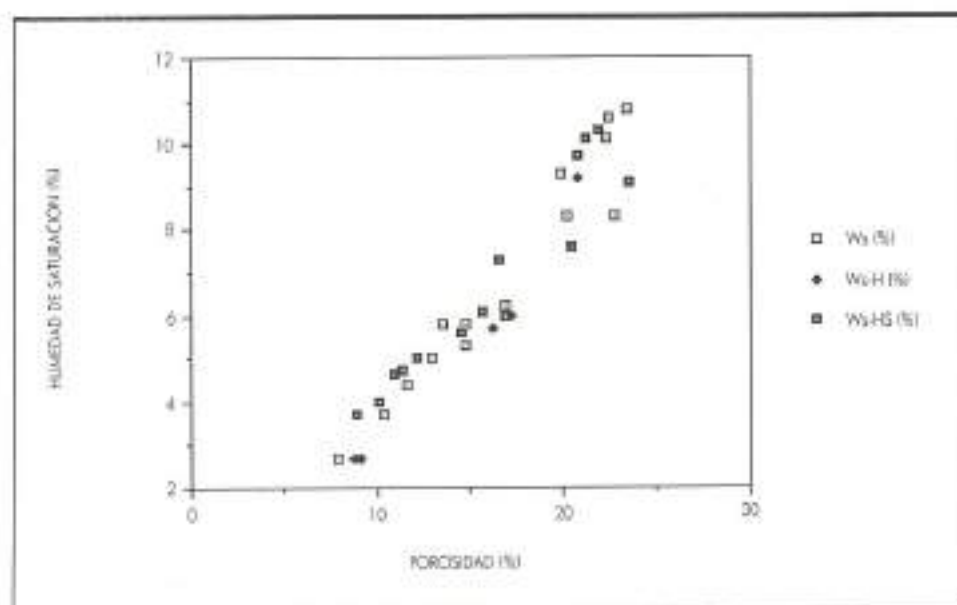


FIGURA 2.

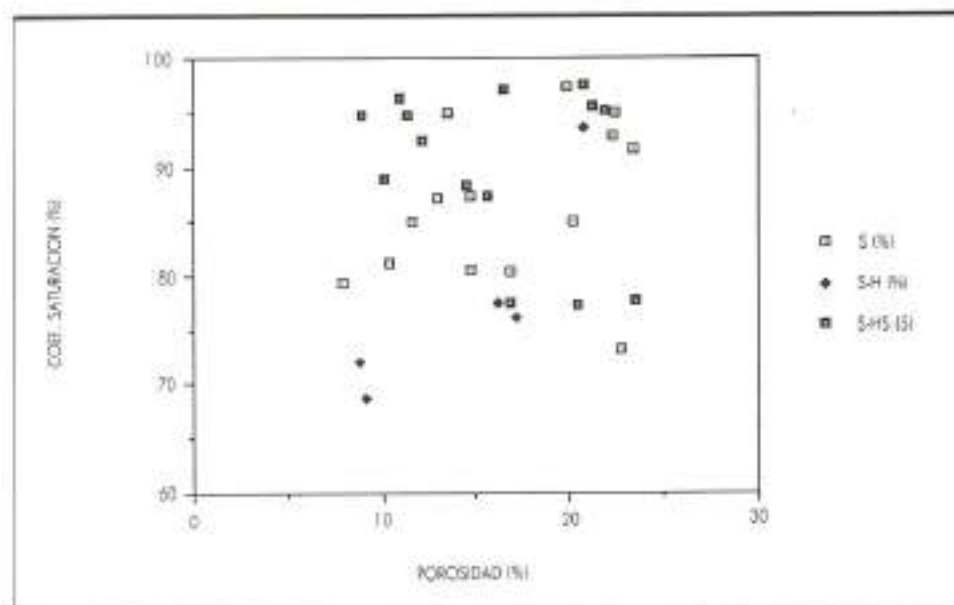


FIGURA 3.

sus cambios de fase sólido-líquido que producen microfisuraciones como proceso o **mecanismo de alteración**, dando lugar a un aumento e intercomunicación de los poros con las consiguientes variaciones en las propiedades de la roca. La influencia de la dilatación térmica del agua, debido a la acción de los ciclos de humedad-sequedad, puede dar lugar a los mismos mecanismos de degradación pero con menor incidencia o agresividad.

- Las acciones cíclicas del hielo-deshielo y la humedad-sequedad combinadas producen en la roca modificaciones superficiales que se manifiestan como

morfologías de alteración similares a algunos indicadores macroscópicos reconocidos en los monumentos de la ciudad de Zamora (fotos 4, 5 y 6) y anteriormente mencionados:

- Pérdida de material: descementación, arenización y desagregación granular.
- Roturas y disyunciones: descamación y desplazación.

Como condicionante o **factor intrínseco** del deterioro se puede concluir que las variedades más intensamente cementadas por ópalo y con menor proporción de matriz arcillosa embebida en el seno del cemento síliceo