

Hexahidrita-epsomita en el deterioro de piedra dolomítica del patrimonio arquitectónico

R. FORT (1), M.J. VARAS (2), E. PÉREZ-MONSERRAT (2), C. VÁZQUEZ-CALVO (1)

(1) Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM), Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid.

(2) Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis 2, 28040 Madrid.

INTRODUCCIÓN

Uno de los agentes de deterioro que produce más daños en la piedra de construcción utilizada en el patrimonio arquitectónico es la presencia de sales. El Monasterio de Uclés (Cuenca), presenta en su Claustro eflorescencias salinas localizadas en su entablamento y zócalo que generan descamación y pulverización de la superficie de los sillares con redondeamientos de sus formas ornamentales. El 7 de Mayo de 1529 se inició la construcción del Monasterio, finalizando su fachada Este a mitad de este siglo y la Iglesia, situada al Norte, en 1598. El resto de las fachadas exteriores y las del Claustro interior se terminaron a lo largo del siglo XVII. La portada principal del Monasterio (fachada Sur) fue concluida en 1735.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La piedra de construcción utilizada en el Monasterio es principalmente pelmicritas dolomitizadas/dolopelmicritas, donde existen variedades con mayor o menor contenido en terrígenos. Otro tipo de piedra es una caliza de naturaleza micrítica. Los morteros del siglo XV son de cal con áridos de cuarzo y en menor proporción de caliza y dolomía. En actuaciones más recientes se ha detectado la presencia de morteros de cal y yeso. En la cubierta se han realizado intervenciones de restauración en donde se ha utilizado morteros de yeso. Sobre estos materiales se aplicó un tratamiento de protección (pátina artificial) que en las fachadas más antiguas era de cal, mientras que en las del siglo XVII y XVIII era de cal y yeso o solo de yeso (Álvarez de Buergo et al., 2004).

CARACTERÍSTICAS PETROFÍSICAS DE LA DOLOMÍA

La dolopelmicrita del entablamento del Claustro presenta una porosidad accesible al agua del $25,7 \pm 2,1$ % y una densidad aparente de $2,10 \text{ g/cm}^3$, aunque ambos parámetros cambian hacia el interior de la pie-

dra tendiendo a aumentar su densidad y disminuir su porosidad accesible. Igual ocurre con la velocidad de propagación de ultrasonidos, en donde los valores más altos se alcanza en zonas internas del sillar, indicando un grado de alteración menor. El índice de anisotropía (ΔM) es de 40 % en las zonas externas del sillar y con un grado de deterioro más elevado, mientras que la piedra sin alterar tiene un valor de 3,5 %. Esto nos indica la presencia de fisuras paralelas a la superficie de la piedra. La sorción de agua es rápida alcanzando grados de saturación cercanos al 60 % a los 10 minutos, siendo mayor en las zonas exteriores de la piedra que se encuentran más degradadas. La succión capilar es también muy rápida. La distribución de tamaños de poro queda modificada por acción de la cristalización de sales con un incremento general del tamaño medio de poro y de su porosidad.

CARACTERIZACIÓN DE LAS SALES

Las sales aparecen principalmente en el entablamento y en el zócalo del claustro con definición de frentes de avance y retroceso de la línea de cristalización. Las principales fases minerales que aparecen en las eflorescencias salinas son los sulfatos del tipo hexahidrita-epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), y en menor medida rozonita-melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Otras sales minerales que se detectan son: halita (NaCl) e hidromosilita ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), niter (KNO_3) y newberyita ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es muy escaso (Fig. 1).

La hexahidrita-epsomita es la fase mineral dominante dentro de la piedra. Presenta un hábito cristalino de tipo prismático-hojoso (Fig. 2) y se concentra principalmente cerca de la superficie donde aparece como subeflorescencia salina (Fig. 3). Forma capas de hasta $500 \mu\text{m}$ de espesor y a una profundidad de entre 300 y $600 \mu\text{m}$. Estas capas presentan un grado de compactación variable y son zonas de frecuente rotura con la consiguiente pérdida tanto de parte de esta capa como de la parte superficial de la piedra. Esta sería la causa principal del proceso de descamado y pulverización que presenta esta sillería.

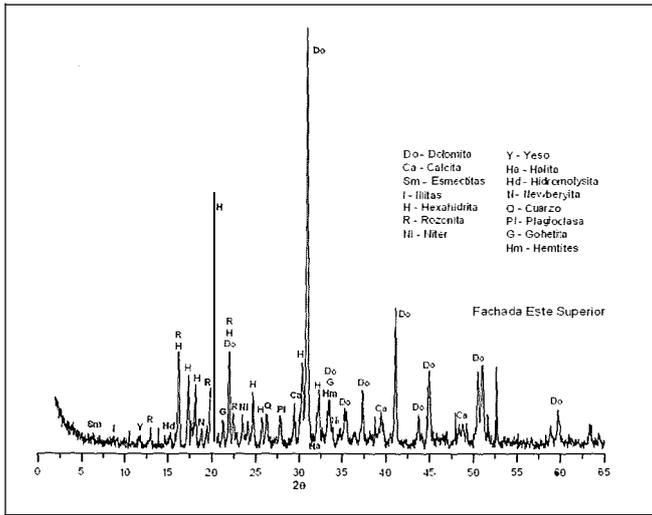


FIGURA 1. Difractograma de rayos X de las eflorescencias salinas.

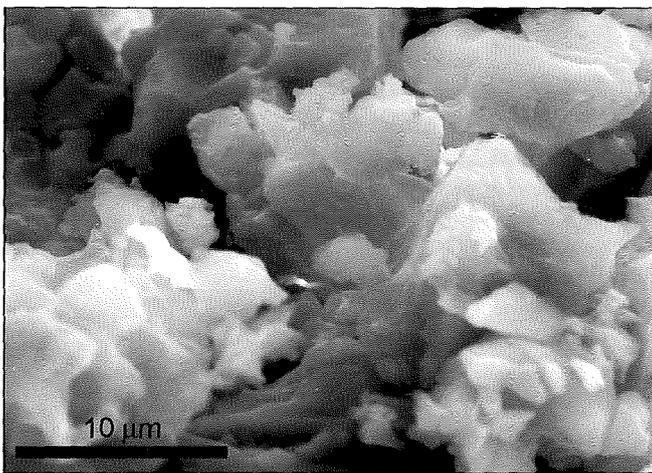


FIGURA 2. Fotomicrografía al MEB del hábito cristalino del sulfato magnésico.

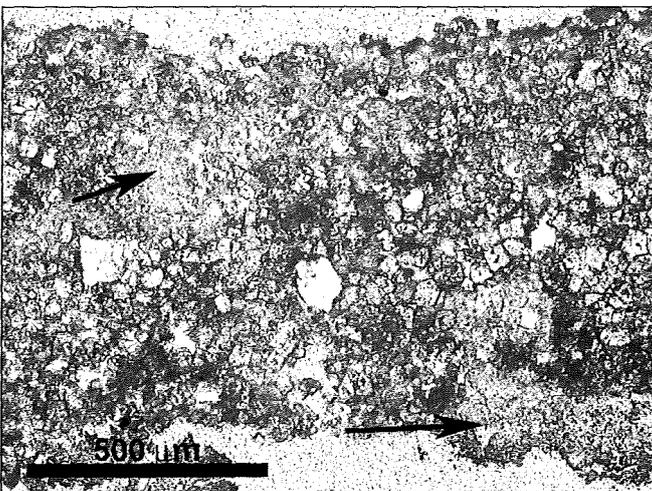


FIGURA 3. Subeflorescencia de sulfatos cerca de la superficie de la piedra que provoca la caída escamas de hasta 1 mm de espesor (a). Dentro de la escama también hay sulfatos (b).

ORIGEN DE LAS EFLORESCENCIAS

Teniendo en cuenta que en el siglo XVII, fecha en que se construyó el Claustro, se utilizaron morteros de rejuntado y de relleno de tipo bastardo (cal y yeso) y que en actuaciones recientes de intervenciones en la cubierta se utilizó el yeso), puede decirse que estas son las fuentes principales de aporte de sulfatos (SO_4^{2-}) para la formación de las subeflorescencias y eflorescencias salinas que aparecen principalmente en el zócalo y en entablamento del Claustro. Las posibles pátinas que debieron de existir en las fachadas del Claustro, y actualmente desaparecidas, también pudieron aportar parte de este sulfato al estar formadas por yeso. El magnesio (Mg) y el hierro (Fe) proceden de la misma dolomía, no pudiendo descartar la incorporación de hierro de estructuras internas de los muros y principalmente de la cubierta.

La presencia de cloruros, fosfatos y nitratos en las parte altas del edificio puede deberse a la contaminación de las filtraciones de aguas de lluvia por la palomina de las aves existentes en el tejado y canalones (Gómez-Heras et al., 2004). En las zonas bajas, su presencia también se debería a la contaminación, en muchos casos por excrementos de diverso origen pero facilitado por el ascenso de agua capilar.

CAUSAS DEL DETERIORO

El sulfato de magnesio (epsomita) tiene un solubilidad muy alta (71 mg/100 ml de agua a 20°C), que disminuye según el grado de hidratación del mineral (Winkler, 1997). Esto hace que esta sal, junto a los cloruros y nitratos, también muy solubles, generen, por el avance y retrocesos del frente de humedad-sequedad de la piedra, continuos deterioros en la piedra, con la consiguiente pérdida de material superficial.

El agua de lluvia penetra con facilidad en la piedra, ya que tiene una porosidad accesible al agua superior al 25 % y un coeficiente capilar alto. Procesos de condensación por debajo de las cornisas pueden también producirse. Han sido frecuentes las filtraciones de agua a través de las cubiertas que motivaron en su día un arreglo de las cubiertas. Aunque existe una recogida del agua de lluvia por medio de canalones, su capacidad de desagüe por las bajantes es pequeño por lo que produce el desbordamiento de los canalones, favorecido también por la acumulación de restos de palomina, plumas, ramas, etc.

La epsomita es un mineral criófilo e hidrófilo por lo que las variaciones de temperatura y humedad afectan directamente a su estabilidad transformándose a fases más deshidratadas como la hexahidrita. La humedad de estabilidad de la epsomita es de 90 % a 20°C, pero en fases menos hidratadas como la hexahidrita o la kieserita la humedad de estabilidad es de 65 % (Arnold y Zehnder, 1990; Winkler, 1997). Igualmente ocurre con los procesos de hidratación y deshidratación por el

aumento de temperatura. La transición de epsomita a hexahidrita se produce a temperaturas superiores a 28 °C (García-Guinea et al., 2000). La cristalización de estas sales genera presiones intersticiales que provocan la ruptura y disgregación de la piedra. Estas transformaciones pueden ser cíclicas generando una mayor fatiga en el interior del material por las presiones de cristalización que ocasionan. Las sales cristalizan tanto en la superficie de la piedra (eflorescencias), como a escasos milímetros de profundidad (subeflorescencias). Cuando esto ocurre en el interior de la piedra, las subeflorescencias tienden a generar desplazados y descamados que pueden perderse dejando a la vista las sales.

CONCLUSIONES

El deterioro de la piedra dolomítica del Claustro del Monasterio de Uclés es debido a procesos de cristalización de hexahidrita-epsomita en el interior del sistema poroso de la piedra generando subeflorescencias. La gran capacidad de absorción de agua y su rápido proceso de secado favorece que se formen frentes de cristalización que aceleran el proceso de deterioro. Las condiciones microclimáticas existentes en el entablamento, con una mayor ciclicidad en las variaciones de

temperatura y humedad hacen que el deterioro sea muy patente en esta zona.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto (BIA2003-0473) y por una beca Predoctora I3P de uno de los autores. Agradecemos a Javier Contreras, arquitecto, y a la empresa Restaura, las facilidades dadas para realizar el trabajo.

REFERENCIAS

- Álvarez de Buergo, M., R. Fort González, Gómez-Heras, M. (2004). *Materiales de construcción* 54 (275); 5-22.
- Arnold, A., Zehnder K. (1990). «Sal weathering on monuments». *Advanced Workshop: Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*. Pavía (Italy) 31-47.
- García-Guinea, J, Abella R, Sánchez-Moral S, Benito, R. Martín-Ramos, D. (2000). *Journal of Sedimentary Research* 70 (4): 964-967.
- Gómez-Heras, M., D. Benavente, Álvarez de Buergo, M., R. Fort. (2004). *European Journal of Mineralogy* 16 (3): 505-509.
- Winkler E.M. (1997). *Stone in Architecture: Properties, Durability*, Springer-Verlag, Berlin 313 p.