

Degradación de las rocas carbonáticas del Claustro de Santa María La Real de Nieva (Segovia)

Degradation of carbonic rocks in the cloister of Santa María La Real de Nieva (Segovia)

R. Fort González (*) y J. Rodríguez Blanco (**)

(*) Instituto de Geología Económica. C.S.I.C. 28040 Madrid.

(**) Dpto. Petrología y Geoquímica. Fac. C.C. Geológicas. U.C.M. 28040 Madrid

ABSTRACT

The cloister of Santa María (Segovia, Spain) is mainly built of dolomicrite and dolomitized pelmicrite. After exposure to similar environmental conditions, there are distinctive indicators, namely alveolar decay of pelmicrites, of the alteration of these materials. The development of pathological features in pelmicrites is due to the combination of intrinsic factors, specially texture, and the chemical action of water. The hydric behaviour of pelmicrites, their specific surface, their low contact angle with water and the wind action, favour moisture-dryness processes causing typical alveolar pathology.

Key Words: *Petrophysics, dolostones, monuments, alteration, alveolar decay.*

*Geogaceta, 20 (5) (1996), 1232-1235
ISN:0213683X*

Introducción

El material pétreo utilizado en la construcción del Claustro de Santa María la Real de Nieva es mayoritariamente de naturaleza carbonática. Existen dos facies características: pelmicritas dolomitizadas y dolomicritas. En general, se puede decir que la mayoría de las basas y capiteles están labrados en dolomicritas, al igual que el zócalo. Los ábacos de los capiteles y la mayoría de los fustes y arcos están trabajados en pelmicritas dolomitizadas. Junto a estas rocas carbonáticas existen también rocas graníticas (granodioritas y monzogranitos), aunque éstas se encuentran relegadas, principalmente, en las zonas de contrafuertes y en sillares de las zonas bajas del zócalo y en una columna del Claustro.

Este Claustro de inicios del siglo XV está formado por 87 columnas dobles, distribuidas en 17 arcadas. Fue declarado Monumento Nacional el 19 de Junio de 1920.

Caracterización petrográfica

La composición mineralógica principal de los materiales carbonáticos es dolomítica. En función de la textura y componentes principales de la roca se pueden diferenciar dos facies características:

1- Pelmicritas dolomitizadas: El aspecto petrográfico más característico de

estas rocas es la presencia de abundantes peloides que llegan a constituir el 99 % de los aloquímicos de la roca. El tamaño medio de estos peloides es de 0,25 mm, con morfologías subsféricas. La selección de su tamaño es regular. La distribución de estos aloquímicos es irregular observando variaciones, no sólo en muestras de columnas distintas sino en la misma preparación petrográfica. El resto de aloquímicos están constituidos por restos fosilíferos, formados principalmente por bivalvos que están parcialmente cementados por carbonatos cálcicos.

La matriz de la roca está formada por cristales más grandes que los que constituyen los peloides y con un grado de dolomitización parcial.

La porosidad que se aprecia es de tipo interpartícula, intrapartícula e intercristalina. El diámetro medio de estos poros es de 0,22 mm, aunque en algunas muestras existe una porosidad de disolución de tipo "vug", que llega a tener un tamaño de 0,75 mm. Esta porosidad está parcialmente rellena de cemento cálcico de textura poiquilotópica y principalmente en mosaico. Los cristales son inequigranulares y de forma subhedral. La cementación se ha producido en los primeros estadios del proceso diagenético, ya que se observa cementación entre los peloides, los cuales presentan signos claros de una débil compactación mecánica con contactos puntuales y largos, producidos durante el enterramiento.

2- Dolomicritas: Esta facies está formada mayoritariamente por matriz dolomitizada con un porcentaje bajo de aloquímicos, del orden de 1-5 %. Estos aloquímicos están constituidos en su totalidad por fósiles, entre los que destacan fragmentos de moluscos, gasterópodos, foraminíferos (miliólidos), ostrácos, calpionelas y algas cianofíceas (dasicladáceas). Los cristales de la matriz tienen un tamaño que no supera los 4 µm. Tienen procesos de corrosión en los bordes en contacto con los aloquímicos. También se presentan de forma aislada algunos granos de cuarzo.

La relación matriz/cemento de la roca es del 90/10. La cementación es fundamentalmente esparítica con textura en mosaico; y cristales equigranulares y subeuhedrales. La cementación rellena las cámaras de los restos fosilíferos. También es frecuente la presencia de grietas de gran longitud, que afectan a toda la preparación y que de "visu" pueden medir varias decenas de centímetros. Estas grietas están totalmente cementadas por calcita.

La porosidad de esta facies es muy alta, superior a la de las pelmicritas y está constituida por poros intercristalinos de tamaño medio de 0,23 mm y móldica de 1,35 mm. También existe una porosidad importante de tipo vug y en canal con tamaño de poros superiores.

Patologías de la piedra del Claustro

Las piedras del Claustro de Santa María la Real de Nieva, presentan un grado de deterioro importante. Las patologías que se observan en la piedra son muy variadas y se deben a diferentes causas. Igualmente, estas patologías se manifiestan de forma diferente en los materiales, según la naturaleza pétreo de los elementos arquitectónicos.

Los materiales pétreos del Claustro presentan importantes procesos de disolución en las zonas externas de las columnas, afectando principalmente a los fustes. La disolución parcial de la superficie de la piedra y posterior precipitación en zonas adyacentes, da lugar a concreciones.

Existen alteraciones cromáticas, con un contraste entre las zonas externas, más lavadas y las zonas laterales de los fustes. En las zonas internas tanto de capiteles como de fustes y basas, se aprecia un ennegrecimiento importante, que contrasta con el resto de la columna. Existen también tinciones, producidas por óxidos de hierro, localizadas en casi todos los fustes.

La degradación biológica es pequeña, producida por las raíces de plantas superiores, y sobre todo por la presencia de hongos y líquenes, que producen también una alteración cromática y un aumento de los procesos de disolución y formación de depósitos superficiales.

También es muy generalizado en todo el Claustro el modelado de las superficies, que dan lugar a formas redondeadas en las basas y algunos capiteles, principalmente en su ábaco. Esto da lugar a pérdida de las formas originales. Este proceso está relacionado con la disolución de materiales, así como con la acción erosiva del viento. Otra patología relacionada con esta acción eólica es el picoteado, principalmente en los fustes, y en las basas, generada por el impacto de partículas transportadas por el viento.

Existen cavernas en algunos fustes asociadas, en este caso a grietas, donde existe un proceso importante de disolución y formación de depósitos internos pulverulentos.

Una de las patologías más importantes existentes en toda la arquería del Claustro es la presencia de fisuras, que afectan tanto a las basas, como a fustes y capiteles. El grado de fisuras es diferente y pueden dar lugar a fragmentaciones importantes, con pérdida de material, principalmente localizadas en las esquinas de basas y capiteles.

Las pérdidas más importantes de ma-

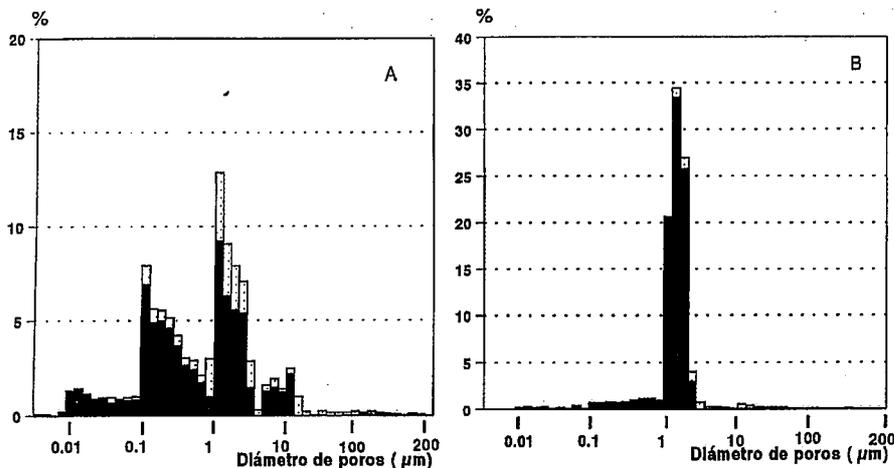


Fig. 1.- Distribución de tamaños de poro. A: Pelmicrita dolomitizada; B: Dolomicrita. Negro: Porosidad atrapada Punteado: Porosidad circulante

Fig. 1.- Porometric distribution. A: Dolomitized pelmicrite; B: Dolomicrite. Black: Trapped porosity Dotted: Free porosity

terial, por fragmentación, se localizan en las esquinas de los ábacos, principalmente en las zonas externas de la galería, en donde la acción del agua y de la heladicidad es mayor, produciendo la disyunción de estos materiales. Las basas también tienen pérdidas importantes de material, que pueden superar el 50 %. Se localizan tanto en esquinas externas como en zonas internas. En estas basas también existen fracturas debidas no a la acción del hielo, sino a sobrecargas que generan fracturas subverticales que dividen la basa en dos mitades. Por lo general estas fracturas tienen una orientación paralela a la galería, aunque son las perpendiculares las que dan lugar a una pérdida importante de material. Igual ocurre con los capiteles, aunque en estos predominan fracturas de sobrecarga, que llegan a ser en algunos capiteles numerosas, afectando al capitel de arriba a abajo.

Existe una relación muy directa entre las patologías que se observan y la facies petrológica sobre la que se generan.

En las dolomicritas es más abundante la presencia de fracturas, desconchados y desplazados subverticales de los fustes. En los fustes aparecen también fracturas importantes que suelen ser subverticales y dan como resultado el desplazado del fuste, perdiendo su morfología circular y

dando planos orientados perpendicularmente a la galería, es decir, afecta a los laterales no expuestos al exterior ni interior de la galería. Estos desplazados producen un aspecto de desconchaduras en la superficie afectada.

Otra patología muy importante, que afecta a algunos fustes de la arquería son los procesos de alveolización. Este proceso es muy acusado en algunos de los fustes, dando un aspecto de ruina. La alveolización se puede observar en todas las galerías del Claustro, localizada en la zona media-inferior de fustes trabajados en pelmicritas dolomitizadas y siempre en el lateral derecho de los fustes, si tomamos como punto de observación el jardín del Claustro.

Causas de la degradación alveolar

Evans (1970), Torraca (1982), Rodríguez y Navascués (1982), Rossi-Manaresi y Tucci (1989), interpretan la formación de morfologías alveolares como un indicador de alteración ligado directamente con la cristalización de sales solubles en el interior de rocas con elevada porosidad; a lo que se suma la acción mecánica del viento como factor modelador de la alteración.

El análisis químico de la roca total no detecta cantidades importantes de sulfatos y cloruros para ambos tipos de facies dolomíticas. Pauly (1975) expone una relación de casos en los que se han generado alveolización es en piedras situadas en ambientes costeros, por lo tanto cargadas en sales procedentes de los aerosoles marinos, con contenidos por encima, en todos los casos, del 1,17% en sulfatos. En estas piedras los contenidos en sulfatos

	PELMICRITAS	DOLOMICRITAS
SULFATOS	52	465
NITRATOS	75	530
CLORUROS	173	650

Tabla 1.- Contenido en aniones de las aguas de lixiviado (mg/l).

Table 1.-Content of anions in lixiviated waters (mg/l).

	PELMICRITA DOLOMITIZADA	DOLOMICRITA	
Densidad real (Kg/m ³)	2.826	2.789	
Densidad aparente (Kg/m ³)	2.175	2.120	
Porosidad Accesible (%)	23,0	24,0	
% Saturación	10,11	11,73	
Porosidad total	23,0	32,1	
SORCION LIBRE			
Sorción rápida (minutos)	21	21	
Grado Saturación (%)	Rápida	68,48	67,12
	1 hora	70,28	68,97
	24 h	76,47	73,64
	48 h	79,25	75,76
DESORCION			
% Pérdida 1 hora	3,20	2,57	
24 h	69,90	71,82	
7 días	78,07	80,93	
ABSORCION CAPILAR			
Coef. capilar (Kg/m ² h ^{1/2})	2,09	5,38	
Coef. penetración (m/h ^{1/2})	0,016	0,023	
Porosidad accesible capilar (%)	16,35	12,01	
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA			
Coefficiente (g/m ² .24h mmHg)	0,47	0,86	
ANGULO DE CONTACTO			
	19	40	
VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/s)			
	4.042	4.335	
PÉRDIDA POR HELADICIDAD (%)			
	0,00	0,25	
INDICE DE DURABILIDAD			
	11,6	6,2	

Tabla 2- Características petrofísicas de la rocas dolomíticas

Table 2- Petrophysic characteristics of the dolomitic rocks

no superan el 0,05% y es mayor el contenido de este anion en la litofacies dolomícrita, que no presenta la patología alveolar.

Por otra parte, se procedió al lavado de las rocas con agua bidestilada en un circuito cerrado, completando dieciocho ciclos. El análisis de estas aguas de lixiviado dió como resultado (Tabla 1) unos contenidos en sulfatos, cloruros y nitratos más altos en las dolomicritas, por lo que es de suponer que tiene que incidir otro factor condicionante, distinto de la cristalización de fases salinas, para el desarrollo del proceso de alveolización.

La alterabilidad o susceptibilidad de un material a degradarse está controlada, fundamentalmente, por factores intrínsecos de la piedra (Torraca, 1986). Mainguet (1972) explica la génesis del fenómeno alveolar desde posiciones que consideran los aspectos texturales. Desde

este punto de vista las rocas homogéneas, granudas y no muy cementadas, características que se ajustan a las pelmicritas, son susceptibles de sufrir este tipo de alteración. Quayle (1992) indica que la degradación alveolar se debe a procesos de disolución favorecidos por variaciones de humedad-sequedad, relacionada con las propiedades petrofísicas del material, y a la acción del viento.

En la Tabla 2 se muestran las características petrofísicas de las rocas dolomíticas estudiadas. Las diferencias principales vienen dadas en el porcentaje de la porosidad total. La dolomicrita tienen una porosidad total mucho más alta que las pelmicritas, aunque para ambas, la porosidad accesible al agua es similar. Igualmente, el tamaño de los poros, medidos por intrusión de mercurio, indica que las pelmicritas tienen un tamaño de poros

más pequeños con una mediana de 1,05 μm y un Tm de 0,22 μm, mientras que en las dolomicritas es de 2,67 μm y 1,02 μm respectivamente.

En la Figura 1 se muestra el espectro porométrico de las pelmicritas dolomitizadas y las dolomicritas. La distribución de las pelmicritas es bimodal en los intervalos 1-2 μm y 0,1-0,2 μm. Las dolomicritas tienen una distribución diferente caracterizada por una única moda en el intervalo 1-3 μm que alcanza el 80 % de la porosidad total de la roca.

Otra diferencia es que las pelmicritas tienen una superficie específica más alta (1,91 m²/g) que las dolomicritas (0,63 m²/g). Todo esto hace que el comportamiento de ambos tipos de piedra ante los agentes degradantes sea diferente.

La cinemática de absorción de agua para ambas facies dolomíticas es similar, con una absorción rápida de agua que dura 21 minutos, absorbiendo un 68-67 % de todo el agua que puede contener la piedra. Aunque la cantidad de agua que contienen en su interior las dolomicritas es mayor que las pelmicritas, la dinámica de absorción con el tiempo es menor que en las pelmicritas. Así, el grado de saturación a 48 horas es de 75,76 %, mientras que en las pelmicritas es de 79,25 %.

También las dolomicritas son más sensibles a la acción de succionar, por fuerzas capilares, agua del subsuelo o de zonas donde se pueda acumular. El coeficiente de capilaridad para las dolomicritas es de 5,38 Kg/m² h^{1/2}. En las pelmicritas este coeficiente es de 2,09 Kg/m² h^{1/2}.

Ambos tipos de dolomías tienen un comportamiento malo ante la evaporación puesto que pasados siete, días el contenido de agua que permanece en el interior de la piedra es muy alto, próximo al 20%. Pero de las dos facies, son las pelmicritas las que van a ser más sensibles a los procesos de degradación química por acción del agua, puesto que en estas facies el agua se mantiene en su interior durante más tiempo.

Por el contrario, aunque las dolomicritas absorben más cantidad de agua, el proceso de sorción-desorción se estabiliza a las 48 horas por lo que este agua permanece menos tiempo en el interior de la piedra y por lo tanto el tiempo de reacción del agua sobre los componentes de la piedra es menor. Además esta roca tiene una textura que no facilita la desagregación de sus componentes.

La permeabilidad al vapor de agua es mayor en las dolomicritas (Tabla 2) lo que coincide con un comportamiento más rápido en el proceso de evaporación en los tiempos largos donde el proceso de seca-

do se realiza en estado gaseoso.

La incorporación del agua a las piedras del monumento se realiza fundamentalmente por absorción a través de los poros capilares. La porosidad accesible capilar es más alta en las pelmicritas, con una distribución de tamaños de poros que facilita un mayor contacto entre el sólido y el líquido, tal como lo indica su mayor superficie específica, aunque el volumen de agua que penetra es menor que en las dolomicritas.

Richardson, 1991, introduce un factor de durabilidad de los materiales que relaciona el fenómeno de incorporación de agua en la piedra, en nuestro caso en forma capilar, con la porosidad accesible capilar. Cuanto menor es el valor de este índice, mayor es la durabilidad. En Santa María las pelmicritas tienen un grado de alterabilidad mayor que las dolomicritas.

La medida del ángulo de contacto ha dado como resultado unos valores muy bajos, en pelmicritas (19°) y algo superiores en las dolomicritas (40°). Aunque el agua moja las dos piedras con facilidad, el hecho que el ángulo de contacto sea menor en las pelmicritas que en las dolomicritas hace que aquéllas sean más fácilmente alterables al aumentar la interacción piedra-agua.

El monasterio se encuentra situado en un lugar elevado y sin resguardo alguno. La dirección del viento dominante en Santa María la Real de Nieva es fundamentalmente Oeste a lo largo de todo el año, con componente secundaria Suroeste. La entrada del viento en el Claustro es expedita, salvando un edificio de mayor altura que el Claustro que se corresponde con dependencias monacales que rodean el Claustro, y prácticamente encajonado, ya que al Norte se encuentra protegido por la iglesia, generando una dinámica en las galerías con una circulación en sentido contrario a las agujas del reloj. La contribución del viento en la conformación de la alteración es doble, por una parte actúa como distribuidor de la lluvia aportando el agua directamente a la piedra y como elemento que contribuye al secado

de la piedra, al mismo tiempo que es el modelador de las formas típicas, según se produce la desagregación de los elementos de la piedra.

La desagregación se produce por reacción química del agua con los componentes carbonáticos de la roca, disolviendo selectivamente la matriz parcialmente dolomitizada. La solubilidad de la calcita para las condiciones en las que se encuentra la piedra (pH ligeramente ácido y temperaturas próximas a los 10°C) es mayor que la propia de la dolomita. Esto puede estar directamente relacionado con la textura de la roca sufriendo una desagregación de los peloides debida a una mayor disolución del cemento calcítico y de la matriz, igual que la expansión-contracción (Quayle, 1992) de la matriz de la piedra por el proceso de humedad-sequedad.

El ensayo de alteración acelerada humedad-sequedad, durante veinticinco ciclos, en pelmicritas extraídas de zonas internas en fustes del monumento, da como resultado una pérdida de material de 0,08% en peso, observando, de forma puntual, el inicio del proceso de alveolización. El desarrollo de la patología hasta el estado actual tiene que ser lento, pero continuo en el tiempo.

Conclusiones

Las dos facies dolomíticas principales del claustro de Santa María la Real de Nieva, en las mismas condiciones medioambientales, no se degradan de la misma forma y dan lugar a diferentes indicadores de alteración.

La alteración alveolar no se debe, en nuestro caso, a la cristalización de sales solubles en el interior de la piedra.

Las características petrológicas y petrofísicas de las pelmicritas dolomitizadas son los condicionantes fundamentales del proceso de desagregación que conduce a la alveolización.

La génesis de la alveolización está relacionada con procesos físico-químicos que dan lugar a la disolución diferencial

de los distintos constituyentes de la roca.

El sistema poroso característico de las pelmicritas dolomitizadas en el que se observa una elevada porosidad capilar, su dinámica de desorción (proceso de evaporación lento, que da lugar a que el agua permanezca durante más tiempo en su interior), la superficie específica mayor que la de la otra facies dolomítica que no presenta degradación alveolar y un ángulo de contacto muy bajo, que permite una fuerte interacción entre la piedra y el líquido, son los principales factores que condicionan la presencia de alveolizaciones en esta facies dolomítica.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación entre la Junta de Castilla y León con la UCM-CSIC.

Referencias

- Evans, I. (1970): *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 19, 153-177.
- Mainguet, M. (1972): *Etudes de photo-interpretation*. Inst. Géogr. Nat., Paris, t.II, 229-657.
- Pauly, J.P. (1976): *Proc. of the Int. Symp. "The Conservation of Stone, I"*. Bologna, 55-88.
- Quayle, N.J.T. (1992): *Proc. of 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa*, Vol. 1, 109-118.
- Richardson, B.A. (1991): *Stone industries*, 26, 22-25.
- Rodríguez, J. y de Navascués, L. (1982): *Tecniterrae*, 49, 7-12.
- Rossi-Manaresi, R. y Tucci, A. (1989): *Proc. 1st. Int. Symposium Bari "The conservation of monuments in the Mediterranean Basin"*, 97-100.
- Torraca, G. (1982): *Porous building materials; science for architectural conservation*. ICCROM. 146 p.
- Torraca, G. (1986): *OPD Restauero-Restauero del Marmo/Opere e Problemi*, Opus Libri Ed., Firenze, 32-45.