

DURABILIDAD DE ROCAS DOLOMÍTICAS BRECHOIDES FRENTE A LA CRISTALIZACIÓN DE LAS SALES

D. BENAVENTE ^(1,2), N. CUETO ^(1,2), J. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ ^(1,2) Y M.A. GARCÍA DEL CURA ^(1,3)

⁽¹⁾ *Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA.*

⁽²⁾ *Dep. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Ap. 99. 03080 Alicante.*

⁽³⁾ *Inst^o de Geología Económica. CSIC- UCM. Facultad de Ciencias Geológicas. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid.*

INTRODUCCIÓN

La cristalización de las sales es uno de los factores de degradación más importante que puede afectar a una roca ornamental, y por lo tanto, condiciona su durabilidad. En particular, la presión de cristalización es el mecanismo que mayor deterioro produce durante la cristalización de las sales. Las propiedades petrofísicas más importantes que determinan la durabilidad de la roca son el sistema poroso (porosidad y distribución de tamaños de poros y fracturas) y sus propiedades mecánicas. El sistema poroso va a influir en los diferentes mecanismos de deterioro (cristalización de las sales, hielo-deshielo, humedad sequedad, etc.) y en el movimiento de los fluidos a través de la roca. Las propiedades mecánicas de la roca condicionan la efectividad de la cristalización de las sales, y por lo tanto definen su grado de susceptibilidad frente a este mecanismo. El tipo de porosidad que presentan las rocas es una variable petrográfica esencial que se debe tener en cuenta al evaluar la susceptibilidad de las rocas a la meteorización. Sin embargo, las rocas dolomíticas brechoides estudiadas en el presente trabajo se caracterizan por presentar una porosidad dual: tipo poro y tipo fractura o fisura. Las propiedades mecánicas de rocas con muchas fracturas pueden llegar a ser muy bajas y dichas fracturas pueden hacer que la permeabilidad de estas rocas sea muy alta. La presencia de discontinuidades favorece el deterioro por la presión de cristalización de las sales en el interior de los poros debido a que actúan como puntos de debilidad o concentradores de tensiones. Si la presión de cristalización es suficiente para propagar dichas microfrazuras se producirá una fracturación y desintegración de la roca (Scherer et al., 2001; Nicholson 2001). El objetivo del presente trabajo es evaluar la durabilidad de las rocas dolomíticas brechoides a partir de sus propiedades petrofísicas teniendo en cuenta su gran complejidad textoestructural definida por la orientación y distribución espacial de sus clastos, la presencia de diferentes tipos de familias de poros y fracturas, así como la interacción entre ellas en una misma muestra.

MATERIALES

Las variedades de rocas dolomíticas brechoides estudiadas se utilizan ampliamente como material de construcción con las denominaciones de: Beige Serpiente, Marrón Emperador y Amarillo Triana (Cueto et al., 2006).

El Beige Serpiente (BS) es una brecha constituida por clastos angulosos de dolomías (en general finamente cristalinas, inequigranulares con mosaicos hipidiotópicos) de tamaños de clastos muy variados (tamaño promedio mínimo: 1 mm - tamaño promedio máximo: 5 mm), embebidos en una matriz de color rosa. Dicha matriz está compuesta por calcita y cristales de dolomita (de 0.04 a 0.08 mm). A microescala es posible observar la variación de la porosidad en los diferentes clastos y la alta porosidad de la matriz que les rodea. La presencia de fracturas es baja y son mayoritariamente intra-clastos, aunque ocasionalmente se aprecian fracturas inter-clastos. En general, se encuentran parcialmente cementadas por calcita-dolomita, siendo la proporción de calcita mucho mayor que la de cristales de dolomita.

El Marrón Emperador (ME), al igual que la variedad BS, es una roca brechoide que está formado por clastos de dolomías (en general dolomíticas) de tamaños muy variados pudiendo llegar a alcanzar varios centímetros. No obstante, a diferencia de BS, el ME presenta alta densidad de fracturas, que dependiendo de la muestra estudiada, tienen diferente tipología, variando el predominio de los tres tipos observados: inter-clastos, trans-clastos e intra-clastos. Las fracturas no poseen orientación preferencial definida, están afectadas por fuertes procesos de disolución y se encuentran predominantemente rellenas de calcita con clastos dispersos de dolomía y cristales de dolomita, mostrando algunas fracturas parcialmente abiertas con aperturas (0.1 a 1.2 mm, intervalo de tam. predominante) que pueden llegar a alcanzar los 2 mm. La dolomita que constituye los clastos es micro y mesocristalina (García del Cura et al., 1997).

Amarillo Triana: de ésta litología se reconocen dos tipos de rocas diferentes, una de color amarillo intenso con mayor índice de densidad de fracturas (ATO) y una de color amarillo más claro (ATC) con menor índice de densidad de fracturas. Lo que diferencia a estos materiales no es solamente su índice de fracturas y su color, sino también la disposición espacial de sus sistemas de fracturas. En el ATO no se aprecian orientaciones preferenciales de las mismas, mientras que en el ATC al menos dos familias de fracturas pueden ser reconocidas a mesoescala. Otro rasgo que les diferencia es la relación de los óxidos que se encuentran en los bordes de las fracturas, ya que en el ATO es más abundante el óxido de manganeso asociado a bario, mientras que en el ATC abunda la presencia de óxidos de hierro. El ATO estudiado es una dolomía brechificada mesocristalina inequigranular fundamental-

Roca	muestra	P (%)	DF (mm ⁻¹)	C _{abs} (%)	v _P (m/s)	A	ε/10 ¹²	ΔC _{abs} (%)	Δv _P (%)	ΔA (%)	ΔM (%)
Marrón Empera	ME1	2.76	1.37	1.02	6350	0.92	5.37	20.38	0.09	0.60	0.22
	ME2	3.43	0.88	1.28	6559	0.93	4.64	11.66	-1.86	-7.65	0.14
	ME3	4.12	0.97	1.55	6481	0.92	4.22	-76.32	-13.58	0.09	4.83
	ME4	2.84	0.48	1.04	6979	0.92	1.93	1.11	-	-	3.70
Amarillo Triana	ATO5	3.83	0.90	1.40	4577	0.79	1.61	48.18	-58.29	-5.79	47.60
	ATO6	3.65	0.89	1.33	4312	0.91	1.93	49.61	-58.29	-	32.06
	ATO7	4.31	0.77	1.58	4886	0.79	2.72	17.31	-48.61	-48.94	11.75
	ATO8	3.61	0.70	1.31	4562	0.81	1.88	53.03	-73.07	-36.11	54.47
	ATO9	3.31	1.04	1.21	4545	0.84	2.36	92.64	-62.10	-41.02	41.54
Amarillo Triana	ATC10	1.44	0.58	0.52	5995	0.84	11.84	21.27	-27.95	-19.68	1.05
	ATC11	1.68	0.93	0.61	5861	0.86	9.81	36.33	-30.19	-23.79	2.62
	ATC12	1.74	0.58	0.63	5916	0.93	10.19	10.77	-29.08	-30.49	1.29
	ATC13	1.74	0.43	0.63	6251	0.85	9.42	15.57	-38.50	-18.23	5.27
	ATC14	1.76	0.54	0.63	6182	0.81	9.01	9.47	-38.39	-29.85	1.74
Beig Serpiente	BS15	5.16	0.18	1.93	5885	0.93	9.07	-74.52	-37.37	-21.46	40.24
	BS16	4.59	0.20	1.71	6242	1.00	10.60	7.93	-8.93	-7.12	4.34
	BS17	5.11	0.14	1.88	5910	0.93	9.70	21.16	-14.53	-	37.66
	BS18	4.55	0.15	1.70	6245	0.98	11.33	9.91	-4.75	-3.36	13.81
	BS19	5.34	0.13	2.00	5853	0.92	8.51	-99.65	-8.40	-	16.67

Tabla I: Porosidad, P; densidad de fractura, DF; coeficiente de adsorción, C_{ads}; velocidad de propagación de las ondas P; v_P; coeficiente de anisotropía, A; energía de la señal ultrasónica, ε; y variación de la masa después de los ciclos de cristalización de sales, DM, de las rocas dolomíticas brechoides.

mente xenotópica encontrándose en algunas zonas texturas hipidiótópicas, la brechificación aparece definida por vénulas de calcita meso y macrocristalina, en los puntos de confluencia de vénulas las masas calcíticas alcanzan dimensiones relativas considerables. El ATC muestra rasgos metamórficos con texturas granoblásticas, ocasionalmente porfidoblásticas mesocristalinas y orientación de algunos cristales de dolomita y de silicatos (feldespatos y moscovitas) neoformados.

METODOLOGÍA

Debido a la fuerte anisotropía y heterogeneidad de las rocas brechoides, la caracterización del sistema poroso de cada probeta se cuantificó con parámetros de conjunto: porosidad, coeficiente de absorción y la densidad de fracturación. Por otro lado, el tamaño de las familias de poros y las fracturas se determinó con porosimetría de mercurio utilizando un Autopore IV 9500. La porosidad, P (%), se obtuvo mediante el método de vacío (NORMA UNE-EN 1936). Para ello, las probetas se sitúan en una cámara de vacío a una presión de 20 ± 7 milibares, hasta completar tres ciclos de 24 horas cada uno. En el primero se elimina el aire contenido en el sistema de poros; en el segundo, se introduce lentamente agua desmineralizada, durante aproximadamente 15 minutos, hasta que los testigos se cubren con una capa de ± 5 cm; y en el último ciclo se reestablece la presión atmosférica. El coeficiente de adsorción, C_{ads} (%), se define como el cociente entre la cantidad de agua adsorbida (en el ensayo de vacío) por la masa seca inicial. La densidad de fractura, D_F (%), es una medida de la longitud total de las fracturas por unidad de área de la superficie de la muestra. Éste parámetro se determina por la intersección entre las fracturas y varias líneas de una cuadrícula superpuesta en cada una de las superficies de la probeta (Underwood, 1970). Las superficies de las probetas se humedecieron, para mejorar su

contraste, y escanearon a 600 ppp. La cuadrícula utilizada contiene 4 líneas espaciadas 10 mm. La primera y última línea de la cuadrícula fue colocada a 5 mm de los bordes superiores e inferiores de la imagen, con el fin de evitar la cuantificación de fracturas generadas por el corte de las muestras.

La caracterización de las propiedades mecánicas de las rocas se llevó a cabo con la técnica no destructiva de ultrasonidos, utilizando el método de transmisión-recepción. Para ello, se empleó un equipo receptor y emisor de señales Sonic Viewer 170 y transductores no polarizados de una frecuencia de 1MHz. Las señales ultrasónicas se registraron a lo largo de tres direcciones perpendiculares para poder cuantificar la anisotropía mediante el cociente de anisotropía, A, definido como la relación entre los valores mínimo y máximo de las velocidades de propagación de las ondas P. De esta forma, las rocas isotropas tienen un valor de coeficiente de anisotropía igual a 1, y tiende a 0 en las que posean un elevado grado de anisotropía. La energía con la que se recibe la señal se puede cuantificar mediante el parámetro ε (Benavente et al., 2006).

En el ensayo de cristalización de sales NORMA UNE-EN 12370 las probetas se sumergen totalmente en la disolución de Na₂SO₄ al 14 % w/w a temperatura ambiente durante 4 horas. Posteriormente, las muestras están en la estufa (a 105 °C) durante 16 horas. Finalmente, las probetas se dejan enfriar las 4 horas restantes. La duración de cada ciclo es de 24 horas, y se realizan 15 ciclos. Las probetas se lavan sucesivas veces para extraer las sales de su interior. Conocido el peso en seco antes y después del ensayo de cristalización, se calcula el tanto por ciento de pérdida de masa del material, DM (%).

RESULTADOS

En la Tabla I se recogen los resultados de la alteración de las rocas brechoides utilizadas en este estudio cuan-

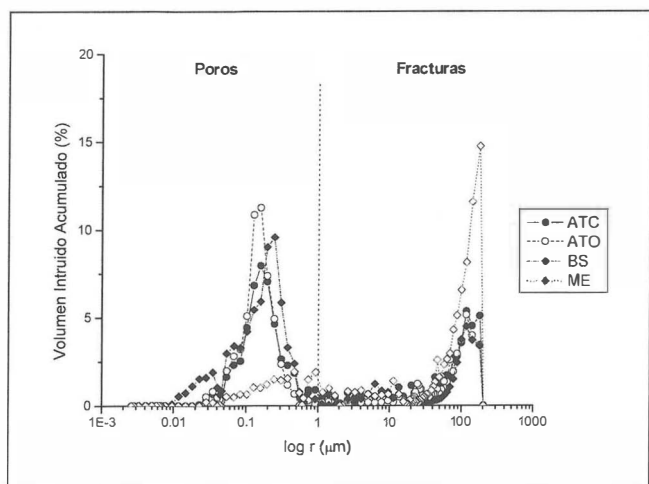


Figura 1: Curva de distribución de tamaños de poros obtenida con porosimetría de mercurio mostrando los dos tipos de poros: matriz y/o cemento ($0.01 - 1 \mu\text{m}$) y fracturas o fisuras ($r > 1 \mu\text{m}$).

tificadas por la variación de la masa, porosidad (coeficiente de absorción), resistencia (velocidad de propagación) y anisotropía. La variación de estos parámetros muestra que el ranking de durabilidad es: $\text{ME} > \text{ATC} > \text{BS} > \text{ATO}$.

El sistema poroso de las rocas es una de sus características más importantes e influyentes en su susceptibilidad a la alteración por la cristalización de las sales. En general, en los materiales estudiados, se pueden diferenciar dos tipos de porosidad que se ponen de manifiesto en los datos de porosimetría de mercurio (Fig. 1): porosidad intercrystalina, definida por la matriz y/o cemento ($0.01 - 1 \mu\text{m}$); y tipo fisura o fractura ($r > 1 \mu\text{m}$).

La naturaleza de las fracturas es compleja y variada, observándose cuatro familias de fracturas (Cueto et al, 2006): (1) facturas que definen brechas: de pequeño tamaño y generalmente cementadas; (2) fracturas rellenas de opacos: lineales, de apertura muy pequeña y selladas por óxidos de hierro y/u óxidos de manganeso; (3) fracturas rellenas de cristales (véculas): apertura mayor y rellena de cristales de dolomita; (4) fracturas con cristales en sus paredes: de apertura variable y parcialmente rellenas. Los tres primeros tipos de fracturas se pueden observar en las dos variedades de los AT, mientras que el último es habitual encontrarlo en ME.

El BS presenta ambos tipos de porosidad. Este hecho también se ve reflejado en el bajo índice de densidad de fractura de esta roca (Tabla I). Es importante resaltar que la porosidad del BS se acumula principalmente en la matriz, siendo menor en los clastos. Este hecho explica que la alteración de la roca por la cristalización de las sales se produzca principalmente en la matriz, por arenización, y que su resultado dependa de la relación matriz/clastos. El ATO presenta ambos tipos de porosidad, aunque generalmente el sistema de fracturas suele ser de mayor importancia. Además, esta variedad presenta una resistencia relativamente baja (cuantificada con v_p , Tabla I), lo que la hace susceptible a las presiones de cristalización ejercidas por las sales. Las variedades del ME y ATC son las más durables frente a la cristalización de las sales. El tipo de porosidad más importante en estas variedades es el tipo fractura. La alteración se produce por pérdida de fragmentos y fisuración. El ME pese a tener mayor apertura y alta densidad de fractura, presenta una alta resis-

Componente	1	2	3
$P(\%)$	0.068	0.982	-0.041
$DF(\text{mm}^2)$	0.004	-0.221	0.948
$C_{\text{abs}}(\%)$	0.093	0.981	-0.046
$v_p(\text{m/s})$	0.897	-0.248	-0.285
A	0.774	0.285	-0.333
$\varepsilon/10^{12}$	0.409	-0.397	-0.781
$\Delta v_p(\%)$	0.970	-0.056	-0.072
$\Delta C_{\text{abs}}(\%)$	-0.563	-0.338	0.345
$\Delta A(\%)$	0.812	0.188	0.144
$\Delta M(\%)$	-0.695	0.579	0.127
% varianza explicada	39.82	27.63	18.66

Tabla II: Análisis factorial de las variables petrofísicas y durabilidad.

tencia a las sales debido a la cementación parcial de dichas fracturas.

En general, la cristalización de las sales disminuye la resistencia mecánica de las rocas, cuantificada con los valores de v_p y ε (Tabla I). Esto es debido al aumento de porosidad (estimado con C_{abs}) y de número de fracturas que lleva asociado el proceso de cristalización. Los mayores descensos en los valores de v_p (Tabla I) se registran en las variedades ATC y ATO, especialmente en esta última. En particular, las direcciones perpendiculares a los planos de anisotropía son las que registran los mayores descensos de v_p , aumentando consecuentemente la anisotropía en estos materiales (altos incrementos negativos). Esto permite inferir que los mencionados planos, en los que se orientan los cristales y el principal juego de fracturas, suponen planos de debilidad por los que el material se deteriora con un grado mayor de intensidad, y por lo tanto la resistencia mecánica a favor de estos planos disminuye proporcionalmente. El ME es la variedad que menos modifica sus propiedades mecánicas tras el ensayo, manteniendo elevados valores de v_p al final del ensayo. Además, esta variedad conserva una elevada isotropía en sus propiedades a lo largo de todo el proceso, justificado por la aleatoriedad en la distribución de sus fracturas.

En general, el análisis factorial (Tabla II), realizado utilizando métodos de componentes principales y de rotación Varimax, pone de manifiesto que las rocas son más susceptibles a la meteorización por la cristalización de las sales cuando aumenta la porosidad y el coeficiente de adsorción y la densidad de fractura, y cuando las propiedades mecánicas son bajas. Además, de esta tabla se deduce la necesidad de considerar conjuntamente el sistema poroso y las propiedades mecánicas, debido a lo cual ningún parámetro evalúa individualmente su susceptibilidad a la meteorización. Por lo tanto, la resistencia a la acción de cristalización de las sales depende de las presiones de cristalización que ejercen los cristales sobre la superficie de los poros y de la resistencia que opone la roca a dicha presión de cristalización (Benavente, 2003; y Benavente et al., 2004).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto concedido por el MCYT: MAT 2003-01823, siendo Nora Cueto Becaría predoctoral de dicho Proyecto. Javier Martínez-

Martínez ha contado con una beca de formación de doctores en Unidades Asociadas de Universidades al CSIC. Agradecemos a Esteve y Máñez S.A. el suministro del material pétreo.

REFERENCIAS

- Underwood, E. (1970). *Quantitative Stereology*. Addison-Wesley Publishing Co, Reading. 274 pp.
- García del Cura, M.A., Rodríguez, M.A., Pina, J.A., Cañaveras, J.C., Baltuille, J.M., Ordóñez, S. (1999). *Bol. Geol. Min.*, 110, 67-76.
- Scherer, G.W., Flatt, R. y Wheeler, G. (2001). *MRS Bull.*, 26, 44-50.
- Nicholson, D.T. (2001). *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 26, 819-838.
- Benavente, D. (2003). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales. [Documento en línea] Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, <<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=12011>>. Consultada [15-5-2006].
- Benavente, D.; Fort, R.; García del Cura, M.A. y Ordóñez, S. (2004a). *Engin. Geol.* 74, 113-127.
- Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Jáuregui, P., Rodríguez, M.A., y García del Cura, M.A. (2006). *Construction & Building Materials*, 20, 562-568.
- Cueto, N., Benavente, D., y García del Cura, M.A. (2006). *Geogaceta* 40 (en prensa).
- NORMA UNE – EN 12370. (1999). Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales. AENOR. Madrid 10 pp.
- NORMA UNE-EN 1936 (1999) Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. AENOR. Madrid. 12 pp.