

Cambios de Permeabilidad Observados en Mármoles Tratados Térmicamente

/ ANA LUQUE (1,*), PATRICIA VÁZQUEZ (2), ANNA ARIZZI (1), GIUSEPPE CULTRONE (1), EDUARDO SEBASTIÁN (1), JAVIER ALONSO (2)

(1) Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Fuentenueva s/n. 18002, Granada (España)

(2) Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, Jesús Arias de Velasco s/n. 33005, Oviedo (España)

INTRODUCCIÓN.

A partir del deterioro por combado ("bowing") observado en numerosos edificios revestidos con losetas de mármol (e.g. El Gran Arco de la defensa de París en Francia, el Palacio de Congresos de Helsinki en Finlandia y la Biblioteca municipal de Göttingen en Alemania), son numerosos los trabajos que se han realizado para identificar cuáles son los factores responsables de este tipo de deformación (Kesler, 1919; Bortz et al., 1988; Koch y Siegesmund, 2004). Según estos autores el principal factor que influye en este tipo de deterioro es la dilatación térmica anisótropa de los minerales (calcita y/o dolomita) que constituyen los mármoles debido al incremento de temperatura (Weiss et al., 1999). Ambos carbonatos presentan una mayor dilatación en la dirección del eje-c ($\alpha = 26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) respecto a la del eje-a ($\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ en dolomíticos y $\alpha = -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ en calcíticos)

Los sucesivos ciclos térmicos que producen la expansión y contracción de los cristales del entramado, generan un estrés residual que favorece la formación de microfisuras en el interior del material, que finalmente, con el tiempo, pueden evolucionar y producir la disgregación granular del mármol.

No obstante, de acuerdo con Siegesmund (1999) la fábrica (tamaño de grano, uniones de grano, porosidad, y distribución del tamaño de poros) y la orientación cristalográfica que presenta cada mármol puede influir también a que la dilatación térmica de la calcita y/o dolomita tenga un mayor o menor efecto en la dilatación térmica del mármol. Por tanto, dependiendo de la petrografía cada mármol muestra una sensibilidad muy diferente al deterioro térmico.

Koch y Siegesmund (2004), después de

analizar diferentes variedades de mármol procedentes de la fachada de la biblioteca municipal de Göttingen (Alemania) y compararlos con los alterados en laboratorio, han observado que el comportamiento térmico del mármol y la formación de bowing se debe principalmente a la diferencia que existe entre la dilatación térmica en condiciones secas y en condiciones de humedad. Esto, consecuentemente, genera diferencias de esfuerzos entre ambas superficies de las losetas del mármol que, finalmente, se traduce en una mayor o menor propagación de fisuras entre ambas caras del material. Sin embargo, también se pudo observar que no todos los mármoles se comportan igual, e incluso como en un mismo mármol el comportamiento puede ser muy diferente, aún cuando las condiciones medioambientales a las que se expone son las mismas.

En el presente trabajo se determina en qué medida este cambio físico afecta a otras propiedades intrínsecas de los mármoles, como por ejemplo, la permeabilidad al vapor de agua (Kv).

El valor de este parámetro puede ser interesante para conocer si influye en la formación de bowing o se ve afectado por dicho proceso y en qué grado sus variaciones nos permiten valorar este tipo de deterioro.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Se han utilizado cinco variedades de mármol procedentes de la misma unidad geológica (zonas internas de las Cordillera Bética, Andalucía (España)), tres de la comarca de Macael (Almería): Blanco Macael, Tranco Macael y Amarillo Triana Macael; uno de la comarca de Alhama de Granada (Granada): Blanco Ibérico y otro de la comarca de Mijas (Málaga): blanco Mijas, pero que presentan características de visu y mineralógicas y

		Tamaño de grano (mm)	Uniones de grano
Cc	BM	0.1-3	rectilíneas
	TM	0.2-1.5	tortuosas
Dol	ATM	0.02-1	rectilíneas + tortuosas
	IB	0.1-0.6	tortuosas
	MI	0.1-3.5	suturadas

Tabla 1. Principales características petrográficas de los mármoles ensayados. BM: Blanco Macael, TM: Tranco Macael, ATM: Amarillo Triana Macael, IB: Blanco Ibérico y MI: Mijas.

petrográficas muy distintas (Tabla 1)

La caracterización petrográfica y la determinación del grado de anisotropía textural de cada mármol se ha realizado mediante microscopía óptica de polarización y la medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, de acuerdo con un sistema de coordenadas representado por tres ejes ortogonales (eje- X, Y y Z) (Tabla 1). Para el ensayo de combamiento se han preparado un total de 9 plaquetas (50 × 50 × 10 mm), 3 para cada plano perpendicular a las direcciones establecidas en los cinco tipos de mármol (Fig. 1).

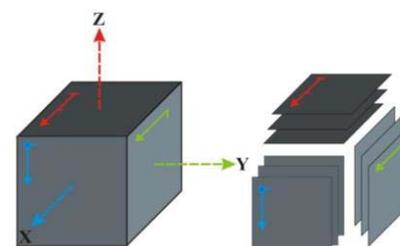


Fig. 1. Representación esquemática del sistema de referencia empleado en los mármoles estudiados. Las direcciones X, Y y Z indican nuestros ejes de coordenadas y las direcciones en las que se han medido los pulsos ultrasónicos. Las plaquetas empleadas en el ensayo térmico y de permeabilidad al vapor de agua se han cortado perpendiculares a cada dirección establecida.

Estas han sido colocadas en una bandeja que mantenía una alfombra de

palabras clave: Mármol, Deterioro térmico, Permeabilidad al vapor, de agua, Combamiento.

key words: Marble, Thermal decay, Water vapour permeability, Bowing.

arena silicatada, para favorecer el acceso del agua en la superficie inferior de las muestras por capilaridad (Fig. 2). Se ha intentado mantener la misma metodología que la empleada por Koch y Siegesmund (2004). Para ello se ha utilizado un horno eléctrico convencional que contiene un sistema de propagación del calor por radiación directa. La variación térmica en cada ciclo es de 20 a 90 °C en e 1 h., se mantiene en 90 °C durante 5 h., y vuelve a recuperar su temperatura inicial de 20 °C en un intervalo de 1-2 h. El total de ciclos realizados es de 40. Para mantener condiciones de humedad similares a las mantenidas en los aplacados de edificios expuestos a condiciones medioambientales, todos los días se rellenaba el tanque que contenía las losetas con una fina capa de agua destilada (~ 2mm).

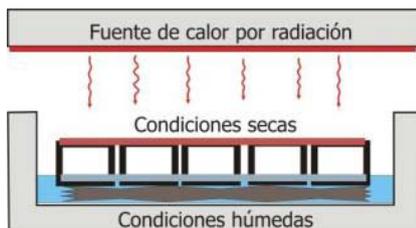


Fig. 2. Ilustración que refleja las condiciones térmicas mantenidas durante los ciclos de cambio térmico. Como se aprecia en la imagen, las muestras sufren dos situaciones térmicas diferenciadas principalmente por el grado de saturación en agua. El tanque de agua era rellenado al comienzo de cada ciclo, pudiéndose observar que este se evaporaba por completo al finalizar el mismo.

El coeficiente de la permeabilidad al vapor de agua se ha determinado mediante el ensayo normalizado CNR-ICR (NORMAL 21/85, 1985), (Ec. 1).

$$K_v = - \frac{(\Delta M/S)}{t} \quad (1)$$

Para conocer la variación que se produce en la permeabilidad al vapor de agua, como consecuencia de los procesos de combamiento, ésta se ha medido en las muestras sin alterar, a los 20 ciclos y al finalizar los 40 ciclos del ensayo de choque térmico.

RESULTADOS.

Las principales propiedades petrográficas de los cinco mármoles se resumen en la Tabla 1. En base a la mineralogía se distinguen dos grupos: calcíticos (BM y TM) y dolomíticos (ATM, IB y MI). En cada grupo se observan además diferencias tanto en el tamaño de grano como en el tipo de uniones

Ciclos		0	20	40
BM	x	30	25	2
	y	24	16	4
	z	22	13	2
TM	x	31	14	4
	y	30	12	4
	z	29	16	3
ATM	x	28	15	3
	y	26	15	4
	z	30	14	2
IB	x	13	10	4
	y	8	7	5
	z	11	10	4
MI	x	8	6	4
	y	11	8	8
	z	12	11	10

Tabla 2. Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua K_v ($g/m^2 \times 24h$) en las tres direcciones (X, Y y Z) establecidas en cada mármol. Las medidas se han realizado en los mármoles sanos (0 ciclos), una vez transcurrido 20 y 40 ciclos. BM: Blanco Macael, TM: Tranco Macael, ATM: Amarillo Triana Macael, IB: Blanco Ibérico y MI: Mijas.

intercristalinas. Las orientaciones consideradas indican valores máximos de las ondas ultrasónicas a lo largo de X, intermedios en Y y mínimos en Z.

Las medidas de la permeabilidad al vapor de agua reflejan que existe un claro descenso de este parámetro en todas las muestras con el n° de ciclos (Tabla 2), con una reducción superior al 85% en los mármoles BM, TM y ATM, entre el 38-68% en el IB y entre el 16-42% en el MI.

De los resultados obtenidos en este ensayo se puede observar que:

- Los coeficientes de permeabilidad al vapor de agua obtenidos en mármoles sin alterar guardan relación con la mineralogía, siendo mayores en los mármoles calcíticos que en los dolomíticos.
- La diferencia de valores entre las muestras sanas y tras 20 y 40 ciclos del ensayo es mayor en los mármoles calcíticos que en dolomíticos.
- Aparentemente los valores de permeabilidad no dependen de la dirección en que se mide.
- Los valores obtenidos pueden relacionar el grado de conectividad entre poros en el interior de la muestra.

CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos mediante este ensayo son relevantes a la hora de evaluar los cambios físicos que se producen en el interior de los mármoles cuando se alteran térmicamente.

El descenso de la permeabilidad puede estar asociado a varios aspectos no relatados en los trabajos mencionados anteriormente. En ellos se observaba una clara relación entre este tipo de deterioro y el incremento de la porosidad, la variación hacia un mayor rango de poros y un aumento de su conectividad (Koch and Siegesmund 2004).

Sin embargo, el hecho de encontrar un decrecimiento de la permeabilidad al vapor de agua puede sugerir que realmente no existe una verdadera conexión entre poros o que, aun existiendo la conectividad, en algún momento estos pueden quedar taponados, impidiendo así que el vapor de agua pase a través de ellos.

Este trabajo representa aún estudios preliminares ya que hará falta recoger más datos para confirmar el cierre de la conexión entre los poros de los mármoles alterados térmicamente.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Investigación MAT 2008-06799-C03-03, MAT2009-11332 y FQM 1635 y el Grupo RNM-179 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS.

- Kessler, D.W. (1919): *Physical and chemical test of the commercial marbles of the United States. Technologic Papers of the Bureau of Standards, 123. Government Printing Office, Washington D.C.*
- Koch, A. & Siegesmund, S. (2004): *The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. Environ. Geol., 46, 350-363.*
- Weiss, T., Leiss, B., Oppermann, H., Siegesmund, S. (1999): *Microfabric of fresh and weathered marbles: Implications and consequences for the reconstruction of the Marmopalais Postdam. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 152 (2), 313-332.*
- Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A., Ullemeyer, K. (1999): *Marbles as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. Z. dt. Geol. Ges., 150/2, Stuttgart (Schweizerbart), 237-257.*