

Influencia de la petrografía en las propiedades petrofísicas y de durabilidad del Travertino Clásico. Valoración de su anisotropía

Influence of petrographic features on the petrophysical properties and durability of the Classic Travertine. Analysis of its anisotropy

David Benavente ^(1,2), Francisco Javier Medina-Lapeña ⁽²⁾, Javier Martínez-Martínez ^(1,2),
Nora Cueto ^(1,2) y M^a Ángeles García-del-Cura ^(2,3)

⁽¹⁾ Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Ap. 99., 03080 Alicante

⁽²⁾ Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA. david.benavente@ua.es

⁽³⁾ Instituto de Geología Económica. CSIC-UCM. angegcura@ua.es

ABSTRACT

The influence of facies on the petrophysical properties and durability of the Classic Travertine is studied. This travertine is a light travertine quarried in Turkey, which is widely used in Spain as building stone and is extremely similar to the Travertino Romano Classico. Its physical properties (pore structure and hygric, thermal, acoustic and mechanical properties) and its resistance to durability tests (freeze-thaw and salt crystallization action) corroborate the good performance of this travertine as a dimensional stone. Its structure and fenestral porosity are the main causes of rock anisotropy. The results show that rock anisotropy has a particularly important influence on the hygric and mechanical behavior of the Classic Travertine, while it has a minor effect on wave velocities and stone durability.

Key words: Travertine, commercial marble, building stone, petrophysics, durability

Geogaceta, 46 (2009), 147-150
ISSN: 0213683X

Introducción

El travertino ha sido una roca profusamente utilizada desde la edad antigua por su baja densidad (su poco peso), aceptable comportamiento mecánico, fácil trabajabilidad y buenas cualidades para el enfoscado. La región de Roma cuenta con magníficas canteras próximas a Roma (Tivoli), intensamente explotadas desde la época del Imperio Romano, hasta la actualidad El travertino romano sigue comercializándose y apareciendo en catálogos de roca ornamental como «Travertino Romano Classico» (Roc Maquina 2008).

El hecho de que los travertinos canterables españoles sean básicamente coloreados (*Travertino Rojo Alhama*, de Alhama de Almería, *Travertino Oro y/o Amarillo de Albox* (García-del-Cura et al., 2007 y 2008), *Travertino Ágata/Madera* de Huerca-Overa, etc.) ha contribuido al auge de la importación de travertinos blancos que han tenido considerable demanda en el mercado. El travertino estudiado ha sido utilizado profusamente en obra nueva, tanto en interiores como en exteriores en diversas regiones españolas y, especialmente, en la Comunidad Valenciana. El

objetivo principal de la presente publicación es estudiar la influencia de las facies (texturas y estructuras) travertínicas en las propiedades petrofísicas y de durabilidad de un travertino, actualmente comercializado en España, procedente de Turquía, muy similar al travertino romano: el *Travertino Clásico*.

Materiales

El material estudiado es el comercializado como *Travertino Clásico*, por Levantina S.A., en la primera década del siglo XXI; procede de Turquía de la provincia de Muğla en la región del Egeo (Fig. 1) de depósitos previsiblemente cuaternarios.

Este travertino no solamente presenta unas tonalidades muy similares a las del *Travertino Clásico Italiano*, si no también unas fábricas o facies muy similares:

Facies: texturas y estructuras

Su estructura, a mesoescala, varía entre masiva y bandeada (Fig. 2), siendo frecuentes las estructuras criptobandeadas y/o criptolaminadas apenas observables a simple vista, pero claramente patentes en las observaciones microscópicas.

Las texturas predominantes son las correspondientes a morfologías arborescentes de colonias bacterianas (según Chafetz y Folk, 1984) de diferente grosor (Fig.3) y dos tipos de porosidad: *framework* e

Fig. 1.- Situación geográfica de la cantera del Travertino Clásico turco estudiado.

Fig. 1.- Location of the studied Classic Travertine quarry in Turkey.





Fig. 2.- Muestra de Travertino Clásico (aristas de 5cm) con predominio de estructura criptobandeada, resaltada por porosidad fenestral.

Fig. 2.- Classic Travertine sample (5 cm edges) with predominance of a cryptolaminated structure, which is emphasized by fenestral porosity.

intercristalina (García-del-Cura *et al.*, 2007). En las zonas de estructuras masivas se encuentran también texturas intraclásticas, con porosidad interpartícula, y tobáceas, siendo estas últimas las que presentan mayor porosidad y de mayor tamaño de poro. También, aunque en menor proporción, existen zonas masivas constituidas por cristales de calcita menores de 2 μm (micrita) con porosidad intercristalina. Ocasionalmente aparecen grandes poros de tipo fenestral y/o huecos irregulares que puede introducir fuertes modificaciones en la porosidad de la roca.

Mineralogía

Está constituido, en general, por calcita con bajo contenido en Mg en cantidades próximas al 99%. Los minerales accesorios encontrados, presentes en muy pequeña cantidad son cuarzo, silicatos y barita (datos de MEB-EDAX).

Métodos

Caracterización del sistema poroso

En primer lugar se caracterizó el sistema poroso de los diferentes tipos de facies con porosimetría de mercurio, y en segundo lugar, la porosidad abierta a vacío y total, a partir de la relación entre las densidades reales y aparentes de las probetas utilizadas en los ensayos mecánicos y de durabilidad.

El sistema poroso se caracterizó con un porosímetro de mercurio Autopore IV 9500 Micromeritics, en el rango de radios de poros de 0,002 - 100 μm . La porosidad abierta o conectada (con el método a vacío, descrito en Benavente *et al.*, 2007) y la densidad

aparente se obtuvieron según la norma UNE EN 1936 (2007b). Debido a que el Travertino Clásico está constituido en un 99% de calcita, en este trabajo, la densidad real (o también denominada de grano) de las probetas se ha considerado igual a la densidad de la calcita (2,71 g/cm^3). Esta aproximación se corroboró sobre varias probetas con picnometría de helio.

Caracterización del comportamiento hídrico

El transporte de agua por capilaridad se cuantifica con el coeficiente de absorción capilar, C, según la norma UNE-EN 1925 (1999), en diferentes direcciones a fin de determinar la anisotropía hídrica.

Caracterización del comportamiento mecánico

Se ha caracterizado con métodos dinámicos y estáticos a partir de los ensayos de ultrasonidos y resistencia a compresión simple, respectivamente. En primer lugar se estudió la propagación de los ultrasonidos; y en segundo lugar, sobre las mismas probetas se acoplaron bandas extensiométricas y se rompieron a compresión simple, registrando la curva de tensión-deformación axial. De esta forma podemos obtener una correlación más adecuada y precisa entre los métodos dinámicos y estáticos.

El equipo utilizado para la medida de las ondas P y S es el Panametrics - 5058PR, conectado a un osciloscopio TDS 3012B (Tektronix), utilizando transductores polarizados de 1 MHz. La caracterización de las propiedades mecánicas se realizó sobre probetas de 5x5x5 cm (norma UNE-EN 1926, 2007a). Las deformaciones se registraron en un módulo de captura de datos (HBM-Spider 8) junto con la información de la fuerza aplicada por la prensa uniaxial. Las curvas de

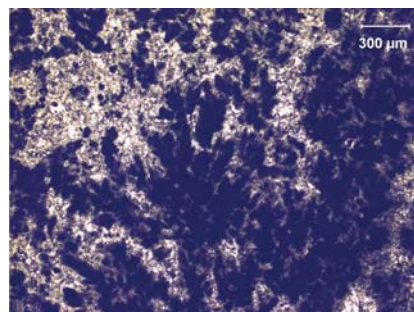


Fig. 3.- Fotomicrografía (nicoles paralelos) de una textura arborescente biogénica característica.

Fig. 3.- Photomicrograph (plane-polarized light) of a characteristic biogenic «shrubs» textures.

tensión-deformación se trataron con el programa MECADAQS, obteniendo el valor de la resistencia máxima a compresión y el módulo de Young medio (pendiente media de la porción aproximadamente recta de la curva tensión axial-deformación axial), según norma UNE 22-950 (1990).

Caracterización del comportamiento térmico

El comportamiento térmico del Travertino Clásico se cuantificó con el coeficiente de dilatación térmica, α , definido como la variación de la deformación térmica unitaria con la temperatura, con un equipo TMA Q400, TA Instruments (Thermo-Mechanical Analyser). Las dimensiones de las muestras fueron de aproximadamente 10x10x10 mm. Cada muestra se sometió a cuatro ciclos de calentamiento-enfriamiento, en el rango de 35 - 90 $^{\circ}\text{C}$, a una velocidad de 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Caracterización de la durabilidad

La durabilidad del Travertino Clásico se evaluó mediante los ensayos de resistencia a heladicidad, según la norma UNE-EN 12371 (2002), y a la cristalización de sales según, la norma UNE-EN 12370 (1999). La respuesta del material en los ensayos de envejecimiento se cuantificó mediante el porcentaje de variación de la masa relativa a la masa inicial, dm (%), y los incrementos (diferencia entre el valor final y el inicial) de la porosidad abierta, DP (%), y velocidad de propagación de las ondas P, Dv_p (km/s).

Resultados y discusión

Sistema poroso

El estudio con porosimetría de mercurio se centra en la obtención de la porosidad y distribución de tamaño de poros de las diferentes texturas. La textura tobácea no se ha caracterizado debido a que la porosidad que presenta tiene un tamaño de poro de acceso mayor de 0.1 mm, por lo que se encuentra fuera del límite de detección de la técnica.

La facies masiva microcristalina (micrítica) muestra una porosidad conectada baja (3,67%) y presenta principalmente una familia de poros (intercristalinos) en torno a 1 μm .

Las facies bandeada y/o laminadas tienen una mayor porosidad conectada (9,65%) y presenta una distribución de poros polimodal, destacando la porosidad tipo intercristalina (0,01-1 μm) e interpartícula y/o *framework* de mayor tamaño (>10 μm).

El Travertino Clásico presenta una gran dispersión en los valores de porosidad, va-

riando entre 5-10%, en la porosidad conectada, y 7-12% en la porosidad total. El Travertino Clásico presenta una porosidad media, si se compara con otras rocas utilizadas como material de construcción.

Los valores de la porosidad conectada están íntimamente relacionados con el tipo de facies. Así, las rocas con una facies predominantemente masiva presentan valores de porosidad menor ($6,36 \pm 0,3 \%$). Por otro lado, las probetas con una facies principalmente bandeada tienen, en general, una mayor porosidad que las anteriores ($7,39 \pm 2,27 \%$), mostrando una mayor dispersión como consecuencia de la variable magnitud de la porosidad fenestral e interpartícula.

Comportamiento hídrico: capilaridad

En general, el Travertino Clásico presenta valores relativamente bajos de coeficientes de capilaridad, C , si se compara con otras rocas porosas ornamentales de similar porosidad (Tabla I). Este hecho se debe a que en el Travertino Clásico, los poros que son principalmente activos al transporte de agua por capilaridad (poros de tamaño entre $0,1-1.000 \mu\text{m}$, (Benavente, 2006) son poros intercrystalinos y/o poros interpartícula. Sin embargo, los poros interpartícula de mayor tamaño y/o fenestrales tienen, en general, una mayor fracción de volumen (porosidad) y un tamaño mayor de 1 mm y, por lo que ejercen una menor contribución en el movimiento capilar debido al efecto de las fuerzas gravitacionales que retardan su desplazamiento en el ascenso capilar (vertical) (Ioannou *et al.*, 2008; Cueto *et al.*, 2009).

Las rocas con facies bandeada tienen una ligera diferencia entre la dirección paralela y perpendicular, siendo mayor el coeficiente de absorción capilar en la dirección paralela al bandeado (Tabla I). Por el contrario, las rocas con facies predominantemente masivas tienen un comportamiento más isotrópico que las bandeadas (Fig. 4).

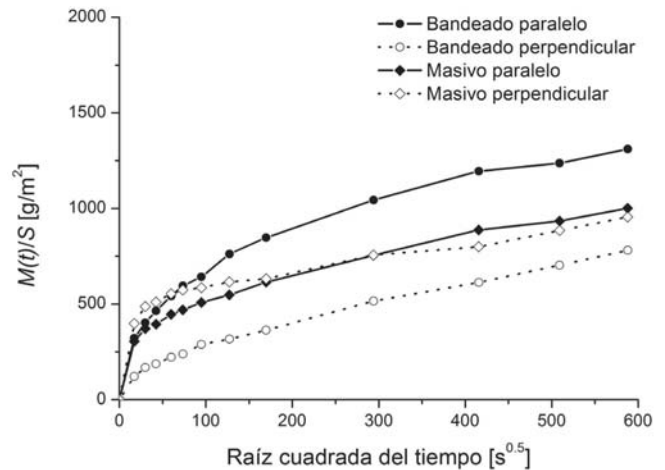
Finalmente, las facies criptobandeadas presentan valores de porosidad conectada y del coeficiente de absorción capilar menores que en las dos facies citadas anteriormente, siendo el comportamiento hídrico más isotrópico. Esto es debido a los límites difusos que componen la alternancia de las bandas y a la baja porosidad (asociada a dichos límites y en las propias bandas).

Comportamiento mecánico: ultrasonidos, módulo elástico y resistencia a compresión simple.

Las velocidades de las ondas P , v_p , y S , v_s , en las muestras estudiadas son relativa-

Fig. 4.- Absorción capilar del Travertino Clásico con facies bandeadas y masivas en la dirección paralela y perpendicular al bandeado.

Fig. 4.- Capillary absorption of the Classic Travertine with laminated and massive facies in the parallel and perpendicular directions to the bedding.



mente altas y homogéneas (coeficiente de anisotropía: 0,96 y 0,97 para v_p y v_s respectivamente) (Tabla I). Este hecho muestra que la velocidad de propagación de las ondas no está afectada por el posible bandeado de los travertinos. Esto es consecuencia de: a) el bandeado se debe a la alternancia de bandas con diferente porosidad intrapartícula, y similar porosidad interpartícula; y b) v_p y v_s están afectadas en mayor medida por la porosidad intercrystalina (Martínez-Martínez, 2008).

Como consecuencia de esta isotropía ultrasónica, los módulos de Young y Poisson dinámicos muestran valores relativamente homogéneos.

En general, la resistencia a compresión del Travertino Clásico (28-55 MPa) (Tabla I) presenta valores medios si se compara con otras rocas ornamentales. La caracterización de las propiedades mecánicas estáticas refleja que la resistencia a compresión de las muestras con facies masiva ($50,49 \pm 3,73 \text{ MPa}$) es mayor que la manifestada por las muestras bandeadas ($34,27 \pm 7,44 \text{ MPa}$). Este comportamiento está relacionado con la porosidad, debido a su papel concentrador de tensiones; las muestras masivas presentan una porosidad menor ($5,89 \pm 0,96 \%$) que las muestras bandeadas ($7,16 \pm 1,05 \%$).

La resistencia a compresión en muestras con facies bandeadas es independientemente de la dirección de la carga respecto al bandeado (coeficiente de anisotropía = 0,88) (Tabla I). Esto coincide con el comportamiento observado en los ultrasonidos, y nos permite afirmar que la porosidad fenestral (porosidad que contribuye al bandeado) incide en la disminución de la resistencia a compresión de forma similar independientemente de la dirección de los esfuerzos axiales.

No se puede afirmar lo mismo respecto al módulo de elasticidad medio: coeficiente de anisotropía elástica = 0,5. Las muestras son menos elásticas cuando la

dirección de carga es perpendicular al bandeado (Tabla I). Esto está relacionado al hecho de que las bandas masivas (menos elásticas) controlan la deformación general de la probeta cuando ésta se ensaya paralelamente al bandeado.

Comportamiento térmico

El Travertino Clásico presenta valores de coeficiente de dilatación térmica, α , medios y poco anisotrópicos, si se compara la dilatación en la dirección paralela ($\alpha_{\parallel} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) con la perpendicular ($\alpha_{\perp} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). La dilatación térmica en rocas calcílicas puede llegar a ser muy anisotrópica, influyendo directamente en su durabilidad (Koch y Siegesmund, 2004). De esta forma, el Travertino Clásico presenta un buen comportamiento frente a las variaciones de temperatura.

Durabilidad

Los resultados muestran que el Travertino Clásico es una roca ornamental muy resistente a los ciclos de hielo-deshielo, ya que la pérdida de peso de las muestras (%), y el aumento de la porosidad han sido mínimos (Tabla II). Tampoco se observan cambios significativos entre las velocidades de propagación de las ondas P después del ensayo, tanto en la dirección paralela como en la perpendicular al bandeado. En general, se observa que las muestras que presentan mayor durabilidad coinciden con las que poseen un valor de la porosidad relativamente bajo y una resistencia mecánica relativamente alta, cuantificada con v_p . Cabría destacar la ruptura de una de las probetas que presentaba un bandeado muy marcado (zona de debilidad de la roca muy definido) y con el valor de porosidad más alto de las muestras ensayadas (9,48%).

El Travertino Clásico estudiado presenta un excelente comportamiento frente a la acción de la cristalización de sales, análogo al Travertino Romano (Sidraha *et*

| Propiedad petrofísica | | Paralelo | Perpendicular | Coef. Anisotropía (valor min/valor max) |
|---|---------|-------------|---------------|--|
| C [g/(m ² ·s ^{0.5})] | media | 3.53 | 2.97 | 0.84 (min: ⊥) |
| | min-max | 0.86-7.95 | 0.90-7.73 | |
| v _P [km/s] | media | 4.94 | 5.16 | 0.96 (min: //) |
| | min-max | 4.55-5.12 | 5.01-5.30 | |
| v _S [km/s] | media | 2.82 | 2.91 | 0.97 (min: //) |
| | min-max | 2.75-2.87 | 2.84-2.98 | |
| E _{din} [GPa] | media | 49.04 | 53.15 | 0.92 (min: //) |
| | min-max | 44.76-51.96 | 51.24-54.74 | |
| ν _{din} | media | 0.25 | 0.28 | 0.89 (min: //) |
| | min-max | 0.21-0.27 | 0.25-0.28 | |
| σ _C [MPa] | media | 39.62 | 41.89 | 0.88 (min: //) |
| | min-max | 28.32-54.93 | 29.73-54.66 | |
| E _{med} [GPa] | media | 45.90 | 22.82 | 0.50 (min: ⊥) |
| | min-max | 15.84-74.23 | 8.78-44.65 | |

Tabla I.- Coeficiente de absorción capilar, C; velocidades de propagación de las ondas P, v_P, y S, v_S; módulo de Young dinámico, E_{din}; módulo de Poisson dinámico, ν_{din}; resistencia a la compresión uniaxial, σ_C; módulo de Young' medio, E_{med}; del Travertino Clásico estudiado.

Table I.- Capillary absorption coefficient, C; compressional, v_P, and shear, v_S, wave velocities; dynamic Young's modulus, E_{din}; dynamic Poisson ratio, ν_{din}; uniaxial compressive strength, σ_C; linear Young's modulus, E_{med}; of the studied Classic Travertine.

al., 2004), y a rocas cristalinas. Este excelente comportamiento también se observa en el mínimo aumento de la porosidad (0,25 ± 0,13%). Tampoco se observan cambios significativos entre las velocidades de propagación de las ondas P, produciéndose un incremento ligeramente mayor en la dirección perpendicular al bandeado.

Las rocas que presentan porosidad interpartícula de mayor tamaño y/o fenestral tienen, en general, peor comportamiento mecánico. Sin embargo, estos tipos de porosidades, por su gran tamaño, y en particular la porosidad fenestral por su menor conectividad, contribuyen mínimamente al ascenso capilar del agua y a la alteración por cristalización de las sales. Generar una presión de cristalización suficiente para que se deteriore la roca implicaría una cantidad enorme de iones (un fuerte grado de sobresaturación), que en general es poco probable cuando la roca está colocada en un edificio.

Por ello, podemos concluir que el Travertino Clásico estudiado (travertino procedente de Turquía) es una roca muy resistente a la acción del hielo y de las sales.

El tipo de facies influye de diferente forma y grado en las propiedades petrofísicas de esta roca y de su durabilidad. Se concluye que éstas tienen

una mayor influencia en las propiedades hídricas y mecánicas estáticas, siendo menor en la porosidad y las velocidades de propagación de las ondas.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la ayuda del MEC: Proyecto CGL2006-05027/BTE.

Referencias

Benavente, D. (2006). En: Utilización de rocas y minerales industriales (M.A. García-del-Cura y J.C. Cañaveras, Eds.). *Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2, 123-153.
 Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García-del-Cura, M.A. y Cañaveras, J.C. (2007). *Environmental Geology*, 52, 197-206.
 Chafetz, H.S. y Folk, R. (1984). *Journal Sedimentary Petrology*, 54,1: 289-316.
 Cueto, N., Benavente, D., Martínez-Martínez, J. y García-del-Cura, M. A. (2009). *Engineering Geology*, 107, 1-15.
 García-del-Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., González-Martín, J.A., Martínez-Martínez, J. Rodríguez, M.A. y Sanz-Montero, M.E. (2007). En: *EGU General Assembly 2007*. Geophy-

| Durabilidad | Cristalización de Sales | Heladicidad | |
|------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| ΔP ₀ [%] | 0.25 ± 0.13 | 0.51 ± 0.15 | |
| dm [%] | 0.35 ± 0.15 | 0.15 ± 0.02 | |
| Δv _P [km/s] | Dirección // | -0.03 ± 0.01 | -0.74 ± 0.36 |
| | Dirección ⊥ | -0.07 ± 0.02 | -0.83 ± 0.27 |

Tabla II.- Porcentaje de variación de la masa relativa a la masa inicial, dm, y los incrementos de la porosidad abierta, DP₀, y velocidad de propagación de las ondas P, Dv_P.

Table II.- Percentage of dry weight loss, dm, and increment of open porosity, DP₀ and P-wave velocity P, Dv_P, after durability tests.

sical Research Abstracts, EGU2007-J-04039-1.
 García-del-Cura, M.A., Sanz-Montero, M.E., Benavente D., Martínez-Martínez J., Bernabéu A. y Cueto, N. (2008). *Geotemas*, 10, 1555-1558.
 Ioannou, I., Andreou, A., Tsikouras, B. y Hatzipanagiotou, K. (2009). *Engineering Geology*. 109, 20-23.
 Koch, A. y Siegesmund, S. (2004). *Environmental Geology*, 46, 350-363.
 Martínez-Martínez, J. (2008). *Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos)*. Tesis Doctoral, Univ. de Alicante, 278 p.
 Roc-Maquina. (2008). *Natural stone in the world (13th Ed.)*. Red-Business Inf., 537 p.
 Sidraba, I., Normandin, K.C., Cultrone, G. y Scheffler, M.J. (2004). En: *Architectural and sculptural stone in man-cultivated landscape* (R. Pøikryl y P. Siegl, Eds.). The Karolinum Press, 165-181.
 UNE 22950-3 (1990). *Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 3: determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson*. AENOR. 10 p.
 UNE-EN 1925. (1999). *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*. AENOR. 13 p.
 UNE-EN 1926. (2007a). *Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial*. AENOR. 21 p.
 UNE-EN 1936. (2007b). *Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*. AENOR. 13 p.
 UNE-EN 12371 (2002). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad*. AENOR. 18 p.
 UNE-EN 123701 (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*. AENOR. 12 p.