

Cinética de la ascensión del agua por capilaridad en la Arenisca de La Marina (Jurásico Superior de Asturias)

V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA¹, L. CALLEJA¹, L. M. SUÁREZ DEL RÍO¹,
A. RODRÍGUEZ-REY¹ y C. CELORIO².

¹Dpto. de Geología (Universidad de Oviedo). Jesús Arias de Velasco s/n. 33005-Oviedo (Asturias).

²Servicio de Radiología. Hospital Álvarez-Buylla (SESPA). 33616-Mieres (Asturias).

Resumen: Se estudia el movimiento del agua por capilaridad en una arenisca utilizada como roca ornamental y conocida como Arenisca de la Marina (variedad amarilla) del Jurásico asturiano. Para la caracterización textural se han realizado distintos ensayos: velocidades de propagación de ondas elásticas, porosimetría por inyección de mercurio y tomografía axial computerizada de rayos X. Los resultados se han aplicado a la modelización e interpretación de la cinética de absorción de agua por capilaridad, utilizándose la tomografía de rayos X para visualizar el fenómeno y calcular un radio de acceso capilar. Todos los resultados y observaciones realizadas son concordantes con su comportamiento anisótropo debido a la presencia de anillos de Liesegang perpendiculares a la estratificación.

Palabras clave: areniscas, Jurásico, roca ornamental, capilaridad, ondas elásticas, tomografía de rayos X.

Abstract: The water movement by capillarity inside La Marina Sandstone (yellow variety) of the Jurassic of Asturias, used as dimension stone, is studied. The rock texture has been characterized under different techniques: elastic wave velocity, Hg porosimetry and X-ray computed tomography. Using the obtained results the modelling and interpretation of the water absorption kinetics due to capillarity have been done. The X-ray tomography allows to image the absorption process and to calculate the size of the radius of capillary access. All the results and observations confirm the anisotropic behaviour of the capillarity due to the presence of Liesegang rings perpendicular to the bedding surfaces.

Key words: sandstones, Jurassic, dimension stone, capillarity, elastic waves, x-ray computed tomography.

La circulación de fluidos por capilaridad en las rocas es uno de los principales fenómenos involucrados en los procesos de deterioro de las mismas cuando se utilizan como materiales de construcción, ya sea en forma de sillares o plaquetas de revestimiento.

Clásicamente los estudios sobre esta propiedad vienen realizándose únicamente a partir de los datos obtenidos tras la realización de ensayos de capilaridad, en los cuales muestras de forma geométrica bien definida (cilindros o prismas de base cuadrada) se apoyan sobre un material poroso (placa cerámica porosa, papel de filtro, etc.) saturado en agua y sumergido en la misma; con la realización de sucesivas medidas de la variación del pe-

so de la muestra por la absorción del agua desde la base en contacto con ella, se determina, tanto la cinética del proceso, como la cantidad total de agua absorbida.

En este trabajo, además de los estudios clásicos, se han utilizado otras técnicas complementarias con el fin de tener una mayor comprensión del proceso. Así, con el fin de tener un mejor conocimiento del sistema poroso y tratar de realizar un modelo tridimensional de las características texturales de la roca, se han realizado observaciones directas mediante tomografía axial computerizada de rayos X durante el ensayo de absorción, se han medido las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas en tres direcciones ortogonales y se han realiza-

Tabla I. Densidad y porosidad abierta de los materiales estudiados.

Muestra	X	Y	Z
Densidad de la roca (kg/m ³)	1950	1900	1910
Porosidad abierta (%)	21,6	23,5	23,7

do ensayos de porosimetría por inyección de mercurio. Todos estos ensayos vienen utilizándose, algunos desde hace ya tiempo, para la caracterización de materiales rocosos, tal como puede verse, por ejemplo, en: Calleja et al. (1990), Calleja (1991), Ruiz de Argandoña et al. (1999 y 2003), Bernard et al. (2000), Sousa et al. (2002) y Géraud et al. (2003). El estudio se ha centrado en una de las dos variedades de la arenisca Jurásica de la Formación Lastres empleada antiguamente como material de construcción de edificaciones y monumentos asturianos (Santa María de Valdediós, Palacio de Revillagigedo, Santa María de la Oliva, etc.) y comercializada en la actualidad como piedra ornamental.

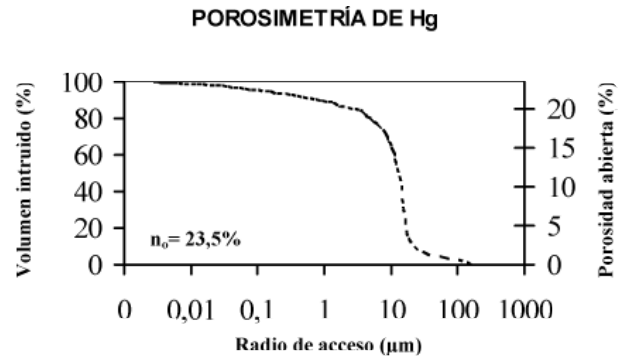
Material y Método

Hoy en día existen en activo dos pequeñas canteras (El Nene y Los Gemelos, en el concejo de Villaviciosa) de las que se extraen materiales de la Formación Lastres (Jurásico superior) que se comercializan con los nombres de “Arenisca de la Marina”, “Arenisca Mariñana” o “Piedra arenisca” (Suárez del Río et al., 2002a). Existen dos variedades, una gris y otra amarilla, centrándose el presente trabajo en esta última variedad.

Macroscópicamente destaca la presencia de anillos de Liesegang que, en el bloque estudiado, son perpendiculares a la estratificación y que le confiere un posible comportamiento anisótropo respecto a algunas propiedades. Microscópicamente son areniscas de grano medio y se clasifican como sublitarenitas (Pettijohn et al., 1972). Una amplia descripción macro y microscópica puede verse en Suárez del Río et al. (2002b).

Para estudiar si la capilaridad presentaba un comportamiento anisótropo, se han tallado probetas cilíndricas de aproximadamente 80 mm de altura y 40 mm de diámetro, orientadas en tres direcciones ortogonales; a las probetas extraídas perpendicularmente a los anillos de Liesegang (y paralelas a la estratificación) se les ha asignado la letra Z y X e Y a las otras dos direcciones perpendiculares.

Previamente a los ensayos de capilaridad, y debido a que las características de los espacios vacíos son las que condicionan el movimiento del agua en el seno de los materiales rocosos, se ha determinado la porosidad abierta así como el radio de acceso de poro mediante porosimetría por inyección de mercurio.

**Figura 1.** Distribución de los radios de acceso de poro obtenida por porosimetría de inyección de mercurio.

Para caracterizar las anisotropías presentes en las muestras y su posible relación con el movimiento del agua por capilaridad, se ha medido la velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales en todas las probetas, calculándose también el módulo de Young y la relación de Poisson dinámicos.

Los ensayos de capilaridad se han llevado a cabo siguiendo la norma UNE-EN-1925 (1999), con algunas variaciones que se especifican en el apartado correspondiente.

Durante la realización de algunos ensayos de ascensión capilar, se ha hecho un seguimiento mediante tomografía axial computerizada de Rayos-X (TAC), con la finalidad de comprobar la viabilidad de la técnica para visualizar el fenómeno y determinar las posibles relaciones que pueda existir entre el movimiento del agua y la textura de la roca.

Caracterización petrofísica de la Arenisca de la Marina

Para la determinación de la densidad y la porosidad abierta se ha seguido la norma UNE-EN-1936 (1999); los resultados obtenidos se expresan en la Tabla I.

En cuanto a la porosidad abierta, las variaciones existentes entre las distintas probetas son pequeñas y pueden considerarse como debidas a las inhomogeneidades propias de los materiales rocosos.

En los estudios para la determinación de los radios de acceso de poro se utilizó un porosímetro de mercurio Micromeritics Auto Pore III, y un tamaño de muestra cilíndrica de aproximadamente 25 mm de altura y 20 mm de diámetro. Los resultados aparecen en la Figura 1, en la que puede verse que la mayor parte de los radios de acceso de poro y el mayor porcentaje de la porosidad de la roca corresponde a los tamaños comprendidos entre 5 y 20 µm; los datos estadísticos aparecen en la Tabla II.

Tabla II. Datos estadísticos obtenidos de la porosimetría de mercurio.

Superficie específica (m ² /g)	1,28
Radio de acceso de poro (media, μm)	0,23
Radio de acceso de poro (mediana, μm)	12,75

Para el estudio de las anisotropías mediante las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas, se ha usado un equipo OYO SONICVIEWER, utilizándose dos parejas de transductores de titanato de bario (uno para las ondas longitudinales y otra para las transversales), con una frecuencia de resonancia nominal de 200 y 100 kHz respectivamente; los resultados aparecen en la Tabla III.

La existencia de variaciones texturales quedan puestas claramente de manifiesto en los valores obtenidos, pudiéndose confeccionar un modelo de propagación de ondas acorde con la realidad de las variedades rocosas estudiadas.

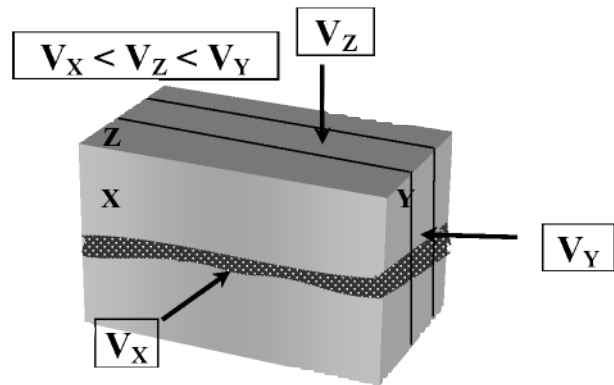
Así, no existe una marcada anisotropía en la velocidad, pero si una aparente contradicción entre estos valores y los datos de la porosidad obtenidos en cada muestra. Al valor de mínimo de porosidad (muestra X), le corresponden las más bajas velocidades, tanto de ondas longitudinales como transversales; esto, que parece ser una contradicción evidente, se justifica por la presencia de los anillos de Liesegang y la significación de su génesis y su orientación respecto a la estratificación.

Tabla III. Velocidad de ondas longitudinales (V_L), transversales (V_T), módulo de Young (E_{din}) y relación de Poisson dinámicos (ν_{din}).

Muestra	X	Y	Z
V_L (m/s)	1983	2190	2097
V_T (m/s)	1309	1375	1355
E_{din} (GPa)	32,7	24,1	28,3
ν_{din} (-)	0,11	0,18	0,14

El modelo que se propone para la velocidad de propagación de ondas (Fig. 2), pone en evidencia que la contradicción es sólo aparente: la velocidad en la dirección Y es la más alta puesto que las ondas avanzan más rápidamente por los anillos de Liesegang, más enriquecidos en óxidos de hierro (que tienen una mayor velocidad de propagación de ondas que el cuarzo, los feldespatos o la calcita de las zonas interanulares) y no se ven frenadas por la estratificación.

En la dirección de avance perpendicular a X, las ondas viajan por los anillos, lo que haría que su velocidad fuese alta, pero al tener que atravesar los planos de estratificación se retardan, dando la velocidad mínima;

**Figura 2.** Modelo para las velocidades de propagación de ondas elásticas. En trazo continuo se representa la estratificación y en trazo con puntos los anillos de Liesegang.

en la dirección perpendicular a Z, la velocidad es intermedia entre las otras dos: se ve favorecida al viajar las ondas paralelas a la estratificación y apenas se ven influenciadas por la disposición de los anillos de Liesegang, ya que, si bien el tránsito por los mismos significaría un aumento de la velocidad, esto se ve contrarrestado por el paso por las zonas descalcificadas que bordean estos anillos. Estos resultados y modelo de comportamiento son, como se verá más adelante, coincidentes también con la cinética de ascensión de agua por capilaridad.

Capilaridad

Metodología experimental

El ensayo de capilaridad se ha llevado a cabo siguiendo la Norma Europea UNE-EN 1925 (1999), con un dispositivo que mantenía constante el nivel de agua en el recipiente donde se realizó el ensayo; además, para no tener que mover la probeta al realizar las sucesivas pesadas, se diseñó y construyó un dispositivo que permitía pesarlas durante el ensayo sin manipularlas, mejorando considerablemente la fiabilidad del mismo. En las Figs. 3 y 4 pueden verse tanto el sistema para mantener el agua constante, como el dispositivo de pesada creado para los ensayos de capilaridad.

La utilización de este dispositivo ha hecho que la probeta estuviera suspendida y en contacto con el agua, en vez de apoyada sobre un material poroso, tal como indicaba la norma de ensayo.

Los estudios realizados mediante tomografía axial computerizada de rayos-X se han realizado con un scanner helicoidal General Electric HiSpeed QX/i con una resolución espacial de 450 μm y a 120 kV y 120 mA.

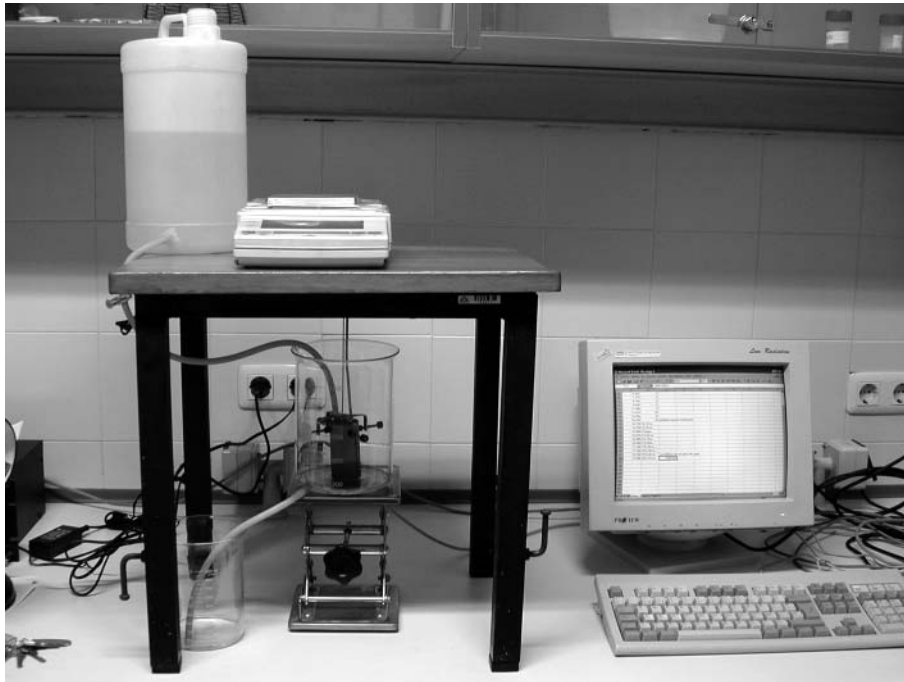


Figura 3. Equipamiento para la realización del ensayo de capilaridad en probetas de rocas.

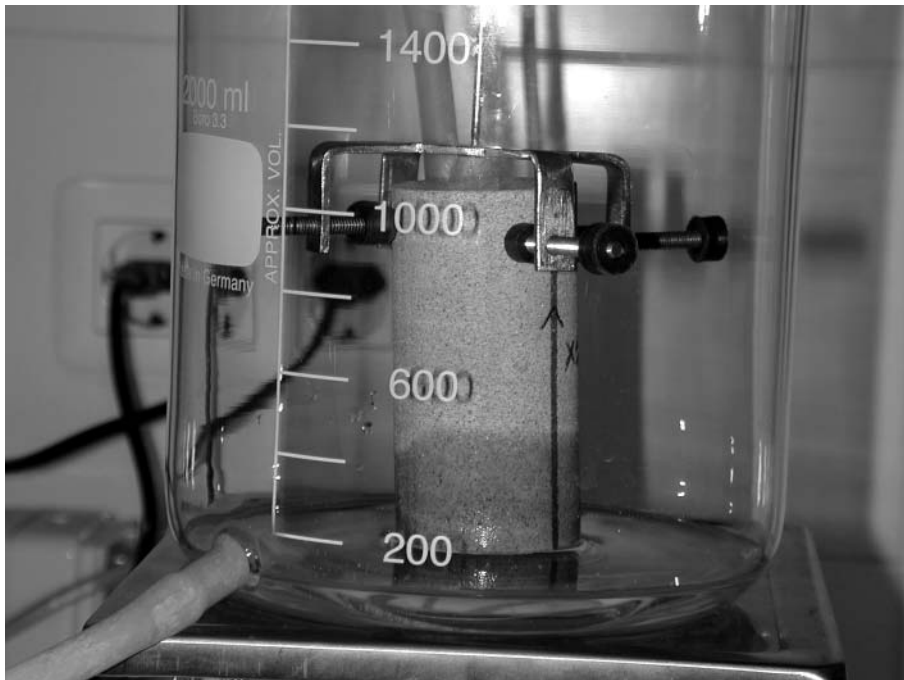


Figura 4. Detalle del sistema de fijación de las muestras para la medida de la variación del peso durante el ensayo de capilaridad.

Tabla IV. Valores de los coeficientes de capilaridad para las muestras ensayadas.

Muestra	X	Y	Z
C ₁ (g.cm ² .s ^{-1/2})	0,043	0,060	0,053
C ₂ (g.cm ² .s ^{-1/2})	0,022	0,034	0,019
C ₃ (g.cm ² .s ^{-1/2})	--	--	0,024

Con el fin de mejorar la visión de la ascensión capilar, en lugar de utilizar agua, se ha utilizado un contraste usado habitualmente en la práctica médica (Optiray 240 ®) disuelto al 10% en agua.

Resultados y Discusión

Para las rocas porosas, como es este caso, el incremento de masa por unidad de área (W_s) cuando penetra el agua dentro de las muestras por capilaridad sigue aproximadamente la siguiente relación: W_s = C.t^{1/2}, donde C es el coeficiente relativo a la cinética del proceso antes de llegar al tramo de estabilización (coeficiente de ascensión capilar o de capilaridad) y t el tiempo. Las curvas de ascensión capilar correspondientes a los tres tipos de probetas ortogonales (X, Y y Z) pueden verse en la Fig. 5.

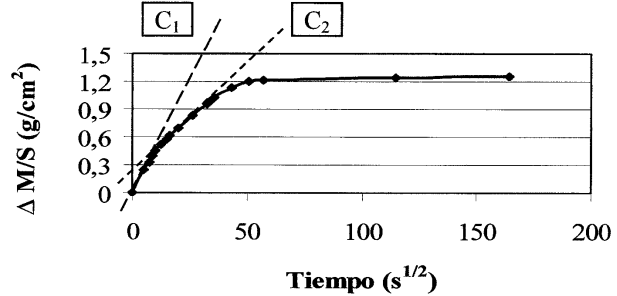
En el estudio detallado de las curvas y del coeficiente C pueden distinguirse generalmente dos etapas caracterizadas por presentar distintas pendientes, siendo la primera más rápida (C₁) y la posterior más lenta (C₂); este es el comportamiento que presentan las muestras X e Y, mientras que en la muestra Z aparece además una tercera etapa (C₃). Los valores de dichos coeficientes aparecen en la Tabla IV.

A la vista de los resultados se observa que existe una cierta anisotropía en la cinética de la capilaridad. Así, en las primeras etapas, la velocidad de ascenso en las muestras X es más lenta que en las otras dos direcciones, siendo la dirección Y las más rápida de las tres; sin embargo a medida que avanza el ensayo, las velocidades de las muestras X e Y tienden a igualarse, manteniendo la dirección X una velocidad más o menos constante hasta la finalización del ensayo; sin embargo la muestra Z presenta una aceleración en la última etapa del mismo. La dirección Y continúa siendo la más rápida durante todo el ensayo hasta su finalización.

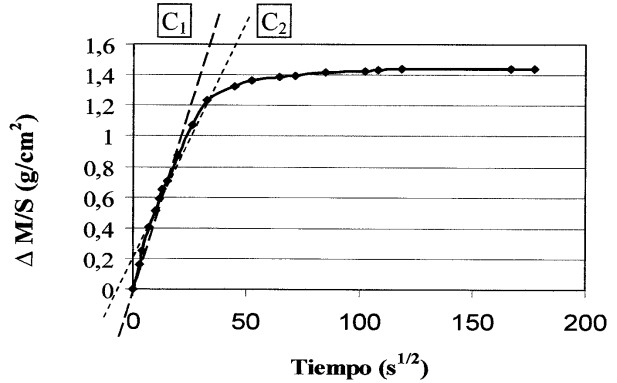
Se observa cómo las muestras Z e Y, debido a poseer una mayor porosidad abierta que la muestra X, alcanzan un mayor incremento de masa por unidad de área; una vez alcanzado casi el estado de equilibrio, todas las muestras presentan una tendencia similar.

CAPILARIDAD

Dirección X



Dirección Y



Dirección Z

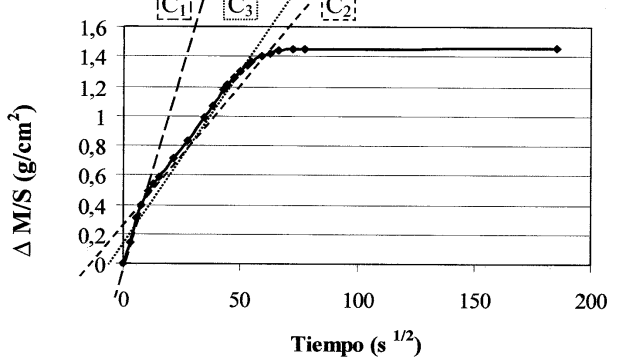


Figura 5. Aspecto de la curva de incremento de masa por unidad de área frente a la raíz cuadrada del tiempo. Muestras X, Y y Z.

Como se ha comentado previamente, se ha efectuado un seguimiento de la ascensión del agua por capilaridad mediante Tomografía Axial Computerizada de Rayos-X. En la Fig. 6, puede verse un mosaico de las imágenes al comienzo, mitad y final del ensayo, correspondientes a la sección central longitudinal de las muestras cilíndricas.

Dichas imágenes explican y corroboran muchas de las interpretaciones anteriormente realizadas. Así, en

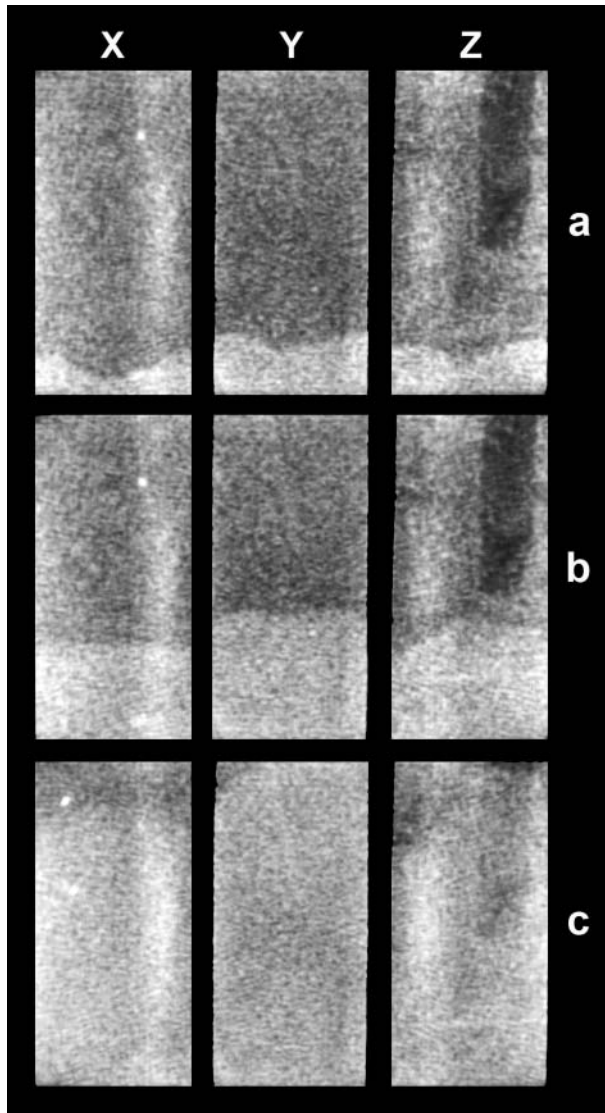
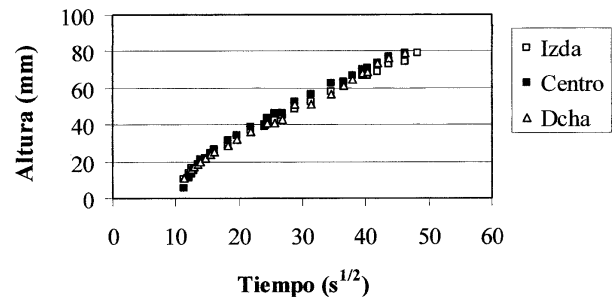


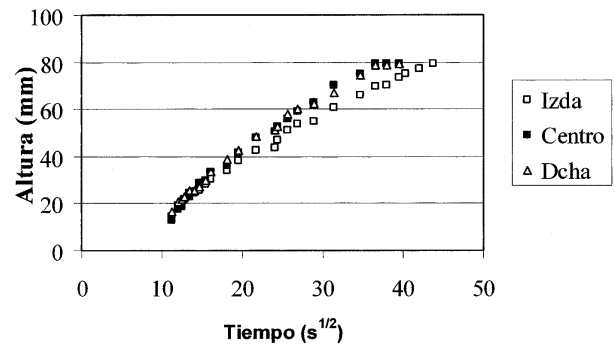
Figura 6. Imágenes de tomografía axial computerizada de rayos-X de tres etapas del ensayo de absorción capilar (a: inicio, b: a los 20 minutos y c: al final del ensayo). Muestras X, Y y Z (alto de cada probeta 80 mm, ancho 40 mm).

primer lugar, puede verse que inicialmente (Fig. 6, fila a) la muestra X presenta un cierto retraso en la velocidad de ascenso capilar con respecto a las muestras Y y Z; llegado un cierto momento (Fig. 6, fila b), las velocidades en X y Z se igualan, mientras que la Y aunque no crece mucho su velocidad, continúa siendo la más rápida. Sin embargo, como se puede apreciar en la radiografía, en la variedad Z el agua asciende más rápidamente por una zona de mayor porosidad (aspecto más oscuro en la imagen, que por la geometría y la disposición se interpreta como un “burrow”).

Dirección X



Dirección Y



Dirección Z

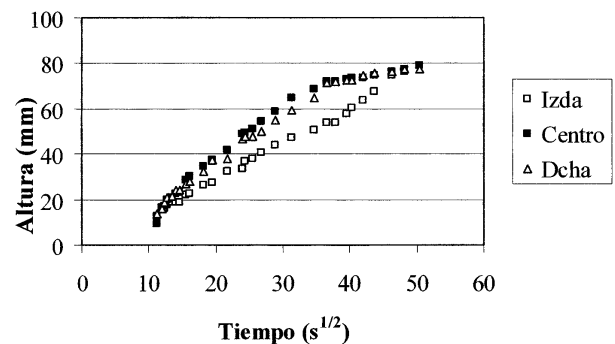


Figura 7. Evolución del ascenso del agua por capilaridad respecto al tiempo, medida en la izquierda, centro y derecha de la probeta. Muestras X, Y y Z.

En la etapa final del ensayo (Fig. 6, fila c), la ascensión más rápida sucede en la muestra Y, a continuación en la Z y, por último, en la X; es necesario resaltar que en la muestra Z el frente de avance del agua no es horizontal y por ello, aunque el agua alcance en una parte la superficie, continúa subiendo por las otras zonas de la muestra, llegando a completar el ascenso aproximadamente a la vez que en la variedad X.

Por otra parte, resolviendo la ecuación de Hagen-Poiseuille, la altura de ascenso (L) en el tiempo (t) del me-

Tabla V. Valores para el coeficiente capilar (B); coeficiente de correlación (R^2) y radios de poro (R_{cap}) de las muestras. X_I : parte izquierda de la muestra, X_C : centro y X_D : derecha. Lo mismo para las muestras Y y Z.

Muestra	X_I	X_C	X_D	Y_I	Y_C	Y_D	Z_I	Z_C	Z_D
B(mm/s ^{1/2})	1,65	1,72	1,67	1,87	2,08	2,09	1,50	1,79	1,76
R^2 (-)	0,98	0,96	0,98	0,98	0,96	0,97	0,98	0,94	0,96
R_{cap} (μ m)	6,77	7,38	6,90	8,69	10,91	10,91	5,62	8,00	7,71

nisco de un fluido por capilaridad a través de una sección circular es:

$$L = B \cdot t^{1/2} \text{ donde, } B = (R_{cap} \cdot \sigma_{wa} \cdot \cos \theta / 2\eta)^{1/2}$$

B es la pendiente de la curva de L frente a $t^{1/2}$, R_{cap} el radio del capilar, σ_{wa} la tensión superficial de la interfase fluido-aire, θ el ángulo de contacto y η la viscosidad del agua. Determinando experimentalmente el coeficiente B, es posible calcular el radio de poro efectivo del capilar a través de la ecuación:

$$R_{cap} = 2 \eta B^2 / \sigma_{wa} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

La representación de las alturas del frente del agua medidas en la parte izquierda, del centro y derecha de cada probeta respecto a la raíz cuadrada del tiempo pueden verse en la Fig. 7.

En la muestra X el agua alcanza la superficie simultáneamente en las tres zonas, mientras que en la Y puede verse cómo el agua llega más rápidamente a la superficie en la parte central y derecha que en la izquierda; en la muestra Z se observa que el frente del agua avanza más rápidamente por el centro y la derecha, debido a la presencia del "burrow" anteriormente citado.

En la Tabla V, se muestran los coeficientes B y R^2 correspondientes a las rectas de regresión de las relaciones que aparecen en la Figura 7, así como los respectivos radios de poro (R_{cap}) calculados a partir de la fórmula (1).

Es necesario resaltar que estos valores calculados son generalmente menores que el radio de poro determinado mediante otras técnicas; no obstante nos sirven para, de una manera comparativa, determinar la variabilidad existente y su relación con la textura. En este caso los valores calculados (entre 5,6 y 10,9 mm) están dentro del orden de magnitud de los determinados por porosimetría de inyección de mercurio (mediana 12,7 mm).

Los radios capilares determinados en las tres zonas estudiadas son bastante similares en cada una de las mues-

tras, especialmente en las X e Y, dentro de la variabilidad existente en este tipo de materiales rocosos. Por otra parte, la media de los radios capilares determinados en la dirección Y son mayores que los calculados en las otras dos direcciones; dentro de los de la dirección Z, los de la zona del centro y la derecha son mayores (debido a la presencia del "burrow" anteriormente mencionado), que los de la izquierda.

Conclusiones

Se ha determinado un comportamiento anisótropo de la cinética de ascensión por capilaridad del agua en muestras de una variedad amarilla de la arenisca jurásica de la Formación Lastres. La anisotropía de esta roca ha sido también puesta de manifiesto mediante la realización de estudios con ultrasonidos, obteniéndose modelos de comportamiento perfectamente coherentes entre ambas propiedades.

Por otra parte se han aplicado técnicas de tomografía axial computerizada de Rayos-X, mostrándose como muy adecuadas para visualizar el fenómeno de ascensión capilar en materiales rocosos y ha servido para relacionar dicho fenómeno con variaciones texturales presentes en las rocas. Mediante las medidas de la altura alcanzada por el agua en su ascenso por capilaridad, obtenidas a partir de las imágenes de tomografía, se puede determinar, con gran aproximación, el radio de poro efectivo capilar.

Agradecimientos

A la Consejería de Educación y Cultura del Principado de Asturias, por la financiación de esta investigación (Proyectos PB-EJS01-24 y PC-CIS01-56). Al Ministerio de Ciencia y Tecnología, Acción integrada España-Francia: MCT-02-ACC-HF2001-0083.

Bibliografía

BERNARD, D., VIGNOLES, G. L. and HEINTZ, J. M. (2000): Modelling porous materials evolution. In: *X-ray tomography in material science*. (Baruchel, J., Buffiere, J. Y., Maire, E., Merle, P. and Peix, G., Eds.) Hermes Science Publi. Paris, 13:177-192.

CALLEJA, L. (1991): *Variación de propiedades físicas en rocas cristalinas sometidas a gradientes térmicos*. Servicio Publicaciones, Universidad de Oviedo, 252 pp.

CALLEJA, L., MONTOTO, M., PÉREZ GARCÍA, B., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., MARTÍNEZ HERNANDO, A. and MENÉNDEZ VILLAR, B. (1990):

- An ultrasonic method to analyse the progress of weathering during cycling salt crystallization laboratory test. In: *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, F. Zezza Ed., Bari, 313-318.
- GÉRAUD, Y., SURMA, F. y MAZEROLLE, F. (2003): Porosity and fluid flow characterization of granite by capillary wetting using X-ray computed tomography. In: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M. and Jacobs, P., Eds.: *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geological Society, London, Special Publications, 215:95-105.
- RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A., CELORIO, C., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L. and LLAVONA, J. (1999): Characterization by computed X-Ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during Freeze-Thaw cyclic test. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24(7):633-637.
- RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A., CELORIO, C., CALLEJA, L. and SUÁREZ DEL RÍO, L. M. (2003): Characterization by computed X-Ray tomography of water absorption in a limestone used as building stone in the Oviedo Cathedral (Spain). In: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M. and Jacobs, P., Eds.: *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geological Society, London, Special Publications, 215:127-134.
- PETTIJHON, F. J., POTTER, P. E. and SIEVER, R. (1972): *Sand and Sandstone*. Springer-Verlang, Berlín, 618 pp.
- SOUSA, L. M. O., CALLEJA, L., SUÁREZ DEL RÍO, L. M. and RODRÍGUEZ REY, A. (2002): Anisotropy of propagation of the seismic waves in granites. *VIII Cong. Nac. de Geotecnia, Lisboa*, 507-516.
- SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L., DÍEZ SARRÍA, I., RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A. y ALONSO, F. J. (2002a): Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 23: 73-84.
- SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L., DÍEZ SARRÍA, I., RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A. y ALONSO, F. J. (2002b): *Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias*. In: SUÁREZ DEL RÍO, L. M. (Ed.), Univ. de Oviedo, Edición en CD.
- UNE-EN-1925 (1999): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*. AENOR Eds., 13 pp.
- UNE-EN-1936 (1999): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad total y abierta*. AENOR Eds., 12 pp.