

# Ensayo de capilaridad en areniscas monitorizado mediante tomografía computerizada de rayos X. Estudio comparativo con métodos convencionales

## *Capillarity test monitored by X-ray computer tomography in sandstones. A comparative study with standard methods*

V. G. Ruiz de Argandoña<sup>(\*)</sup>, A. Rodríguez-Rey<sup>(\*)</sup>, L. Calleja<sup>(\*)</sup>, L. M. Suárez del Río<sup>(\*)</sup> y C. Celorio<sup>(\*\*)</sup>

Recepción/Received: 5-VI-07

Aceptación/Accepted: 29-X-07

Publicado online/Online publishing: 11-I-08

### RESUMEN

La Tomografía Axial Computerizada de rayos X (TAC) ha sido aplicada al estudio del movimiento del agua en el interior de las rocas (usando como modelo la arenisca de La Marina, roca utilizada en la construcción de algunos monumentos históricos en Asturias -N de España-). Durante los ensayos de capilaridad se han registrado las imágenes de rayos X de la penetración del agua en el interior de la roca que suministran información no aportada por los métodos habituales. La reconstrucción tridimensional muestra la posición del frente de agua a lo largo del tiempo y su relación con las características petrográficas de la roca. La cuantificación del porcentaje en volumen de roca embebida en agua es una medida más real de la capilaridad de la misma. Los resultados así obtenidos han sido comparados con los de la capilaridad medida por el método descrito en la norma UNE-EN 1925:1999.

**Palabras clave:** rayos X, tomografía, capilaridad, rocas, arenisca.

### SUMMARY

*The X-ray Computed Tomography technique (X-ray CT) has been applied to the study of the movement of water inside rocks (using La Marina sandstone, that has been used as dimension stone in some historical monuments of Asturias-N of Spain-). The water penetration inside the rock has been imaged under CT during capillarity tests; these images provides new information not available by the standard methods. 3-D images show the water front position versus time during the test and its relation with the rock petrographic characteristics. The quantification of the soaked rock volume percentage provides a more real estimation of capillarity. The results have been compared with those obtained by applying the method described in the UNE-EN 1925:1999 standard.*

**Keywords:** X-ray, tomography, capillarity, rocks, sandstone.

### 1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los fenómenos de alteración que afectan a los materiales rocosos utilizados en la construcción de edifi-

### 1. INTRODUCTION

*Much of the decay affecting the stone ashlar and cladding used in past and present construction is associated*

<sup>(\*)</sup> Universidad de Oviedo (Oviedo, España).

<sup>(\*\*)</sup> Hospital V. Álvarez-Buylla (SESPA), (Mieres, España).

cios y monumentos históricos, tanto en sillares como en losetas de revestimiento, están asociados a la circulación del agua por capilaridad. Dicho proceso es ampliamente conocido desde antiguo (1). Diferentes técnicas han sido aplicadas para estudiar la humedad en el interior de las rocas y su implicación en los procesos de meteorización (2).

Los estudios de esta propiedad están normalizados según la norma europea UNE-EN 1925:1999 (3) para piedra natural. El coeficiente de absorción por capilaridad "C" se determina a partir de la variación del peso de la muestra a lo largo del tiempo.

Otros autores (1, 4) determinan, además, un coeficiente de penetración capilar "A" definido como la altura a la que asciende el agua por unidad de tiempo.

En este trabajo, además de los estudios anteriormente citados, se ha visualizado y cuantificado mediante tomografía axial computerizada de Rayos X (TAC), la ascensión de agua por capilaridad que tiene lugar por el interior de la roca.

La TAC es una técnica no destructiva muy útil tanto para estudiar la estructura y/o el espacio poroso de la roca (5, 6) como el movimiento de fluidos, entre ellos el agua, en su interior (7- 10); también se viene aplicando recientemente en otros estudios relacionados con la alteración de rocas (11-14).

Su aportación en el estudio de la capilaridad es interesante porque permite obtener imágenes de la distribución del agua dentro de la roca a lo largo del tiempo. Esta capacidad para visualizar el frente de agua en el interior de las muestras permite tener en cuenta las heterogeneidades texturales de la roca que provocan variaciones en la capilaridad y ofrece unos resultados más completos. Algunos autores (15) estudian la variación que experimenta la capilaridad en muestras tratadas y no tratadas con un consolidante.

Además, la reconstrucción 3-D de las imágenes permite estimar el volumen de muestra empapada a lo largo del tiempo, que puede ser comparada con la masa de agua absorbida que se utiliza en los ensayos normalizados.

En este trabajo se presenta la aplicación de la tomografía de rayos X al estudio de la capilaridad y se comparan los resultados obtenidos con los de los ensayos normalizados.

## 2. MATERIAL ESTUDIADO

La Arenisca de la Marina pertenece al Jurásico Superior de Asturias de la cual se comercializan dos variedades (gris y

*with the circulation of capillary water . The damaging effects of water uptake have been known for many years (1). Different techniques have been used to study damp inside rocks and its role in weathering (2).*

*For natural stone, such studies have been standardized in European standard UNE-EN 1925:1999 (3). "C" or the water absorption coefficient is determined from the variation in sample weight over time.*

*Other authors (1, 4) have determined a water penetration coefficient, "A", defined to be the height that water rises per unit of time.*

*In the present study, in addition to the above analyses, the capillary rise of water inside stone was visualized and quantified with X-ray computed axial tomography (CT, CAT).*

*CT or CAT scanning is a very useful non-destructive technique for studying rock porosity (5, 6) and the movement of fluids, water among them, in inside rocks (7-10); it has also been used in studies related to other types of rock alterations (11-14).*

*It contributes substantially to capillarity studies, for it provides images of water distribution inside rocks over time. The ability to visualize the water front affords both information on the textural unevenness in the stone, the ultimate cause of variations in capillarity, and a better understanding of the process itself. Some authors (15) have reported variations in sample capillarity before and after treatment with a consolidant.*

*Three-dimensional imaging is another method for estimating the volume of sample soaked over time, which can be compared to the mass of water absorbed, the parameter used in standard tests.*

*This paper describes the use of X-ray tomography to study capillarity and compares the results with those of the standard tests.*

## 2. STUDIED MATERIAL

*La Marina sandstone, from the Upper Jurassic of Asturias, is commercialized as two varieties (grey and yellow) of*

amarilla) como roca ornamental. En este trabajo se ha estudiado la variedad amarilla, utilizada en muchos monumentos de la región asturiana (Palacio de Revillagijedo, Monasterio de Valdediós, etc.).

Macroscópicamente es una roca amarilla clara (Munsell, 10YR 7/6, amarillo) (16) con una marcada anisotropía debida a un bandeo sedimentario caracterizado por diferencias de porosidad y resaltada por la presencia de anillos de Liesegang, que en las muestras estudiadas son mayoritariamente paralelos a la estratificación (Figura 1).

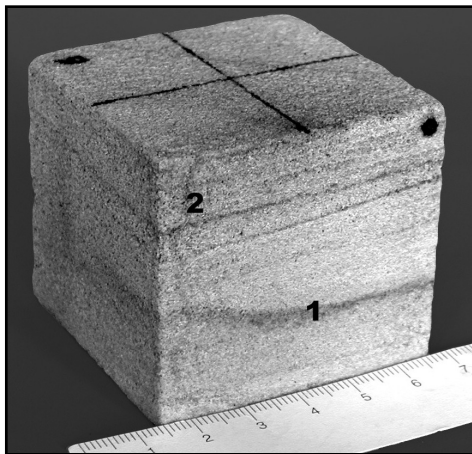


Figura 1. Aspecto macroscópico de la Arenisca de la Marina, donde pueden verse los anillos de Liesegang paralelos (1) y perpendiculares (2) a la estratificación.

*Figure 1. Macroscopic view of La Marina sandstone with Liesegang rings parallel (1) and perpendicular (2) to the bedding.*

Microscópicamente es de grano fino (tamaño medio 0,33 mm) y bien calibrada. Está formada por un 70 % de cuarzo, 12 % de feldespatos, 7% de fragmentos de roca, 3% de filosilicatos y un 8% de cemento de cuarzo y de carbonatos (tipo drusy); la textura es detrítica de soporte de granos (Figura 2) y se clasifica como sublitanita (17). Mediante porosimetría de Hg se ha caracterizado el tamaño de los radios de acceso del sistema poroso; la media y la mediana del radio de acceso de poro son 0,23 y 12,75  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Una descripción más amplia, tanto macro como microscópica, puede verse en (18).

Previamente a los ensayos de capilaridad, se ha caracterizado petrofísicamente la roca, utilizándose 5 probetas cúbicas de 50 mm de arista. Según la norma UNE-EN 1936:1999 (19) se determinaron la densidad aparente ( $\rho_b = 1979 \pm 12 \text{ kg/m}^3$ ) y la porosidad abierta ( $p_0 = 25,3 \pm 0,4 \%$ ). También se midió la velocidad de propagación de ondas elásticas longitudinales en la dirección Z, perpendicular a la estratificación, ( $V_{LZ} = 1542 \pm 270 \text{ m/s}$ ) y en las otras dos direcciones paralelas a la misma ( $V_{LX} = 1734 \pm 201 \text{ m/s}$ ;  $V_{LY} = 1744 \pm 172 \text{ m/s}$ ).

ornamental stone. The present study focused on the yellow variety used in many monuments in the region (Revillagijedo Palace, Valdediós Monastery and so on).

From the macroscopic standpoint, it is a light yellow stone (10 Y/R 7/6 yellow in the Munsell color chart) (16). Its marked anisotropy is due to its sedimentary layerings, characterized by differences in porosity and the presence of Liesegang rings, mostly parallel to the bedding in the samples studied (Figure 1).

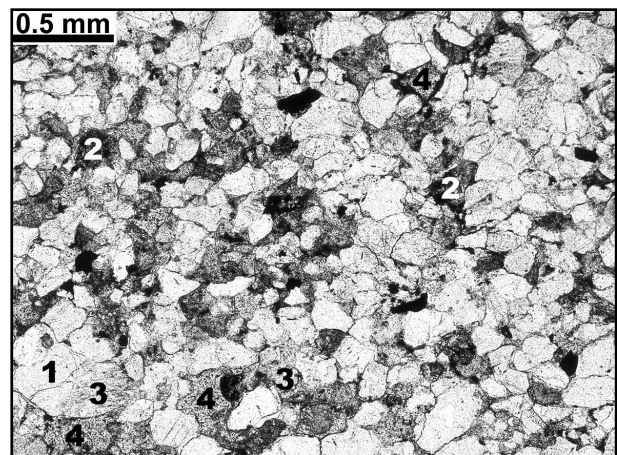


Figura 2. Aspecto microscópico de la Arenisca de la Marina. (1) Cuarzo; (2) Feldespatos; (3) Fragmentos de roca y (4) poros. Luz polarizada no analizada.

*Figure 2. Microscopic view of La Marina sandstone: (1) quartz; (2) feldspars; (3) rock fragments and (4) pores. Plane polarized light.*

Microscopically, it is a fine-grained (mean size 0.33 mm), well sorted stone. Its composition is 70% quartz, 12% feldspar, 7% rock fragments, 3% phyllosilicates and 8% (quartz and drusy type carbonate) cement; it has a grain-supported, detrital texture (Figure 2) and is classified as a sublitharenite (17). The mean and median radii of the access pores in the open pore network were determined by mercury intrusion porosimetry to be 0.23 and 12.75  $\mu\text{m}$ , respectively. See (18) for a more detailed macro and microscopic description.

Prior to running the capillarity tests, the rock's petrophysical characteristics were determined on five 50-mm cubic specimens. Bulk density ( $\rho_b = 1979 \pm 12 \text{ kg/m}^3$ ) and effective porosity ( $p_0 = 25.3 \pm 0.4 \%$ ) were found as specified following the standard UNE-EN 1936:1999 (19). The longitudinal wave velocity was measured, both in direction Z, perpendicular to the bedding ( $V_{LZ} = 1542 \pm 270 \text{ m/s}$ ), and in the other two parallel directions ( $V_{LX} = 1734 \pm 201 \text{ m/s}$ ;  $V_{LY} = 1744 \pm 172 \text{ m/s}$ ).

Los valores de la densidad aparente y de la porosidad abierta son normales en este tipo de rocas sedimentarias; el material puede considerarse bastante homogéneo teniendo en cuenta que las desviaciones típicas no son muy grandes. La menor velocidad de propagación de ondas en la dirección Z puede ser interpretada por la presencia de la estratificación y de los anillos de Liesegang; del análisis de las desviaciones puede decirse que la disposición respecto a la estratificación no varía mucho pero sí el tamaño de dichos anillos de unas muestras a otras.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Ensayo normalizado de capilaridad

El ensayo de capilaridad según la norma UNE-EN 1925:1999 (3) es muy sencillo. La muestra, un cubo o cilindro de 70 ó 50 mm de altura, se coloca dentro de un recipiente sobre unos pequeños apoyos que permiten que la cara inferior de la muestra esté en contacto con el agua. Se añade agua hasta que alcance los 3 mm inferiores de la muestra. A intervalos periódicos, se pesa la muestra y se determina el incremento de peso que va experimentando a lo largo del ensayo por efecto de la absorción capilar. En el presente trabajo el ensayo se ha automatizado; las muestras se han suspendido de una balanza de forma que su cara inferior estuviese en contacto con una lámina de agua; la balanza está conectada a un ordenador que registra el peso de la muestra a intervalos prefijados de tiempo. Con estos datos se construye una gráfica que muestra el incremento de peso por unidad de superficie de la base con respecto al tiempo (expresado en función de la raíz cuadrada del tiempo). La pendiente de la parte recta de la gráfica corresponde al coeficiente de capilaridad (C) en  $g/m^2 s^{0.5}$ .

Aunque no está normalizado, otros autores (1, 4) determinan también otro coeficiente, el de penetración capilar (A). Para ello se mide la altura alcanzada por el agua absorbida por capilaridad a intervalos periódicos de tiempo en función de la raíz cuadrada del tiempo. El coeficiente de penetración capilar corresponde a la parte recta de la gráfica construida con los datos medidos.

#### 3.2. Utilización de la tomografía de rayos X para la monitorización del ensayo de capilaridad

El ensayo de absorción capilar puede llevarse a cabo en el interior de un escáner. De esta forma se puede visualizar el movimiento del agua en el interior de la muestra a lo largo del tiempo y, además, relacionarlo con las características petrográficas de la muestra.

El equipo utilizado en este trabajo es un escáner helicoidal General Electric modelo HiSpeed QX/i, en el cual la

*The bulk density and open porosity values were normal for this type of sedimentary rocks. The material was regarded to be fairly uniform, inasmuch as the standard deviations were not large. The lower wave propagation velocity in the Z direction was interpreted to be associated with the bedding and Liesegang rings; an analysis of the standard deviations showed that while ring arrangement varied very little with respect to the bedding, their size differed substantially from one sample to another.*

### 3. EXPERIMENTAL PROCEDURE.

#### 3.1. Standardized water absorption test

*The water absorption by capillarity test described in standard UNE-EN 1925:1999 (3) is quite simple. The specimen, a cube or cylinder 70 or 50 mm high, is placed inside a receptacle on a stand in such a way that the underside of the specimen is immersed in the water. Water is added to a height of 3 mm from the bottom of the specimen. The specimen is weighed at periodic intervals and the weight gain due to capillary absorption during the test is recorded. This test was automated in the present study. The specimens were hung from a scales with the bottom touching a film of water. The scales, in turn, was connected to a computer that recorded the specimen weight at pre-set intervals. These data were used to plot a graph showing the weight gain per unit of specimen base area versus the square root of time. The slope of the straight part of the curve is the absorption coefficient (C) in  $g/m^2 \cdot s^{0.5}$ .*

*Another coefficient, namely capillary rise, has been determined by other authors (1, 4), although it has not been standardized. It consists in measuring the height reached by the capillary water at periodic intervals and plotting these values against the square root of time. The water penetration coefficient is defined by the straight part of the resulting curve.*

#### 3.2. Use of X-ray tomography to monitor the capillarity test

*The capillary absorption test can be conducted inside a scanner to visualize water movements in the specimen interior over time and relate these developments to the petrographic characteristics of the specimen.*

*The instrument used in the present study was a General Electric HiSpeed QX/I helicoidal scanner, whose X-rays*

muestra es atravesada por el haz de rayos X en todas direcciones. Las radiaciones resultantes son recogidas por el sistema de detectores que, mediante algoritmos matemáticos, generan los coeficientes de atenuación en cada punto de la muestra. Las unidades de medida de radiación utilizadas en los escáneres médicos son las unidades Hounsfield (HU). Los materiales rocosos presentan valores muy variados y en general mayores de 400 HU, dependiendo de su composición mineralógica y porosidad: a mayor atenuación mayor número Hounsfield.

El resultado es una imagen digital de 512 x 512 pixels con 256 niveles de gris. Las zonas con un mayor coeficiente de atenuación de la radiación muestran tonos más claros que las zonas de menor atenuación de los rayos X. Cada imagen corresponde a una sección virtual de la muestra. Una información más detallada de la técnica y sus aplicaciones a materiales geológicos puede verse en (20).

Las condiciones de trabajo, que condicionan la resolución y el contraste de las imágenes, fueron: voltaje: 140 kV; intensidad: 150 mA; tamaño del pixel: 0,187 x 0,187 mm; distancia entre cortes: 0,625 mm.

El proceso seguido en este trabajo para el estudio de la capilaridad mediante tomografía fue el siguiente:

La muestra, un cubo de 5 cm de arista, se colocó en el recipiente ya situado en el centro del anillo del escáner de forma que la cara apoyada fuese perpendicular a la laminación de la muestra. Se añadió agua hasta cubrir los 3 mm inferiores de la muestra y se dio comienzo al ensayo. A intervalos de tiempo determinados, se fueron adquiriendo series de 80 secciones virtuales verticales y paralelas entre sí.

En la Figura 3 puede verse, a la izquierda, un esquema de la disposición de esta serie de cortes y, a la derecha, un ejemplo de un mosaico de la sección central de la muestra tomada a diferentes tiempos a lo largo del ensayo. La franja inferior de las imágenes, más clara, corresponde a la parte de la muestra hasta donde ha ascendido el agua por capilaridad, cuya altura puede medirse fácilmente para estimar el coeficiente de penetración capilar.

El tratamiento digital de las 80 secciones virtuales permite obtener una imagen tridimensional donde se observa el volumen de muestra empapada y la forma del frente de agua ascendida por capilaridad. Aplicando procedimientos estereológicos (método de Cavalieri) a cada serie de 80 secciones virtuales, se estimó el volumen de la muestra afectado por el agua en los distintos intervalos de tiempo considerados. En este trabajo el método consistió en medir, por conteo de puntos, la superficie correspondiente a la zona afectada por capilaridad en cada una de las

*penetrate the sample from all directions. The resulting radiation is collected by a series of detectors that use mathematical algorithms to generate the attenuation coefficients at each point on the sample. In medical scanners radiation is measured in Hounsfield units (HU). Rocks exhibit widely varying values, over 400 HU as a rule, depending on mineralogy and porosity: the greater the attenuation the higher is the Hounsfield number.*

*The result is a 512 x 512-pixel digital image with 256 gray levels. The areas with a higher radiation attenuation coefficient are more lightly shaded than the areas with lower X-ray attenuation. Each image represents one virtual section of the specimen. For more detailed information on the technique and its applications to geological materials, see (20).*

*The working conditions, which determine resolution and image contrast, were: voltage: 140 kV; intensity: 150 mA; pixel size: 0.187 x 0.187 mm; distance between slices: 0.625 mm.*

*The procedure followed in the present tomographic study of capillarity was as follows:*

*the specimen, a 5 cm cube, was placed - with the underside perpendicular to the layering - in a receptacle positioned in the centre of the scanner ring. Water was added to a height of 3 mm above the bottom of the sample and the test was begun. Series of 80 virtual vertical sections were imaged in parallel at specified time intervals.*

*Figure 3 shows, on the left, a diagram of the arrangement of the slices and on the right an example of a mosaic image of the central section of the sample taken at different times throughout the test. The lower edge of the images, lighter in colour, shows the area affected by capillarity, whose height can be readily measured to estimate the water penetration coefficient.*

*The 80 virtual sections were digitally processed to provide a three-dimensional image showing the volume of soaked sample and the shape of the capillary front. The volume of sample affected by water in the different time intervals considered was found by applying stereological procedures (Cavalieri method) to each series of 80 virtual sections. In this paper the method consisted in measuring - by point counting - the area of the region affected by capillarity in each image in the series. The volume of rock affected by capillarity was calculated by multiplying*

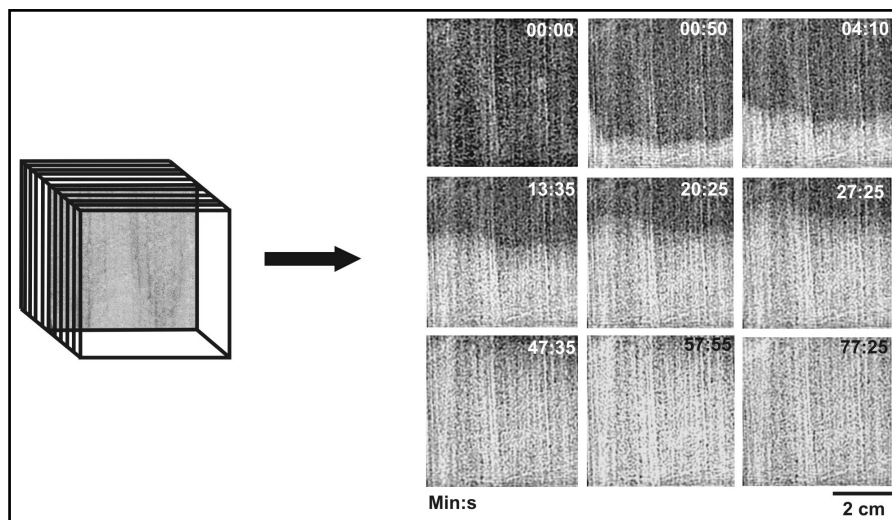


Figura 3. Izda: esquema de la disposición de las secciones virtuales. Dcha: mosaico de imágenes de TAC del plano central de la muestra durante el ensayo de capilaridad.

Figure 3. Left: distribution of virtual sections. Right: mosaic image of the central section of the specimen during the capillarity test.

imágenes de la serie; multiplicando la suma de la superficie de cada una de las secciones por la separación entre ellas, puede estimarse el volumen de roca afectada por la capilaridad. Una explicación detallada del método puede encontrarse, por ejemplo, en (21).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Coeficiente de penetración capilar

Para la determinación del coeficiente de penetración capilar por el método habitual se midió con un calibre digital, a distintos intervalos de tiempo, la altura alcanzada por el agua en la línea vertical central de las cuatro caras laterales de la muestra. El valor de ascensión capilar en cada intervalo ha sido la altura media de los cuatro valores medidos. En la Figura 4 la evolución del ascenso del agua con respecto al tiempo aparece como curva "Exterior".

En las sucesivas imágenes de las caras laterales, obtenidas mediante TAC, también se ha medido la altura alcanzada por el agua en las posiciones anteriormente citadas considerándose, para cada tiempo, la media de las cuatro caras; en la Figura 4 aparecen representadas como "TAC-Exterior".

Las medidas realizadas en estas imágenes externas presentan unos valores mayores que los obtenidos, mediante el método habitual ("Exterior"), en las mismas posiciones; esto es debido a que, para efectuar las medidas por dicho método, es necesario coger la muestra y separarla de la película de agua y por lo tanto interrumpir el ensayo, lo que evidentemente produce un retraso en las medidas de la ascensión capilar. Este efecto lógicamente no se

the area of each section by the spacing between them. A detailed explanation of the method can be found, for instance, in (21).

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1. Water penetration coefficient

The water penetration coefficient was determined conventionally by measuring the height of the water front with a digital gauge at the vertical centreline of each of the four sides of the sample at different times. The capillary in each interval was taken to be the height of the mean of these four measurements. The rise of the water line over time is given as the curve labelled "Outer" in Figure 4.

The height reached by the water at the above points was also measured on the successive CAT scans of the four sides, and the four values were averaged. The results are shown as the "CAT-Outer" curve in Figure 4.

Position by position, the measurements on these outer images were higher than the values found with the conventional method ("Outer"). This is because in the conventional method samples must be separated from the film of water to be measured, interrupting the test and obviously retarding capillary rise. This effect is logically absent in CAT scan measurements, which is one of the advantages of this technique. The values found with the

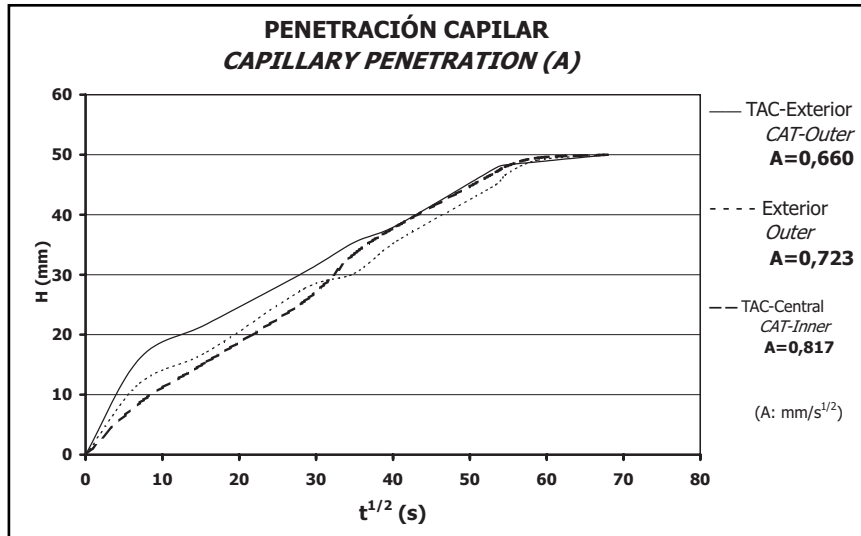


Figura 4. Evolución de la altura del agua (H) medida mediante métodos habituales ("Exterior") y TAC ("TAC-Exterior" y "TAC-Central"), en función de la raíz cuadrada del tiempo (t).

*Figura 4. Water height (H) measured by the conventional method ("Outer") and by CAT ("CAT-Outer" and "CAT-Inner") versus the square root of time (t).*

produce en las medidas efectuadas sobre las imágenes obtenidas mediante TAC, representando una ventaja de la aplicación de esta técnica. En los últimos tramos del ensayo ambos valores se hacen muy iguales.

Además, la tomografía permite visualizar la ascensión del agua por el interior de la muestra y comparar la altura alcanzada en distintas posiciones. Como ejemplo, en la Figura 5 se ha medido la altura de la línea media vertical del frente de agua en las dos caras externas (secciones 1 y 80) y en el plano central (sección 40) a los 50 segundos del inicio del ensayo.

Tanto la sección 1 como la 80 presentan alturas muy similares (aproximadamente 15 mm) y bastante superiores a la medida en la parte central (sección 40, aproximadamente 9 mm).

Para comprobar si dicho efecto se manifestaba durante todo el ensayo, se estudió la evolución de la altura del agua, con respecto al tiempo, en la parte central de la probeta ensayada; los resultados aparecen reflejados en la figura 4 como "TAC-Central". Si comparamos los resultados obtenidos mediante TAC en la parte externa de la muestra ("TAC-Exterior") y en la central ("TAC-Central"), puede observarse que las alturas registradas en la zona central son significativamente menores que las correspondientes a la zona externa hasta aproximadamente 30 minutos después de comenzado el ensayo; esto puede deberse a que la capilaridad en la parte externa está influenciada de una manera muy significativa por la presencia de un bandeo caracterizado por diferencias en la porosidad, asociado a los anillos de Liesegang.

*two methods tended to converge toward the end of the test.*

*Moreover, by tomography the rise of the water inside the specimen can be visualized by tomography and the height at the various points compared. Figure 5 shows, by example, the height of the water line at the vertical mid-line on two external sides (sections 1 and 80) and in the central plane (section 40) at t= 50 seconds.*

*The heights in sections 1 and 80 were very similar (approximately 15 mm) and both considerably greater than the height in the central section (section 40, approximately 9 mm).*

*The variation in the height of the water front in the centre of the specimen was studied to ascertain if this behaviour was maintained throughout the test: the results are shown in Figure 4 on the curve labelled "CAT-Inner". A comparison of the CAT scan results for the outer ("CAT-Outer") and inner ("CAT-Inner") parts of the sample showed the latter to be significantly lower than the former until approximately 30 minutes into the test. This may be because capillarity on the external surfaces is significantly influenced by differences in porosity associated with the presence of Liesegang banding.*

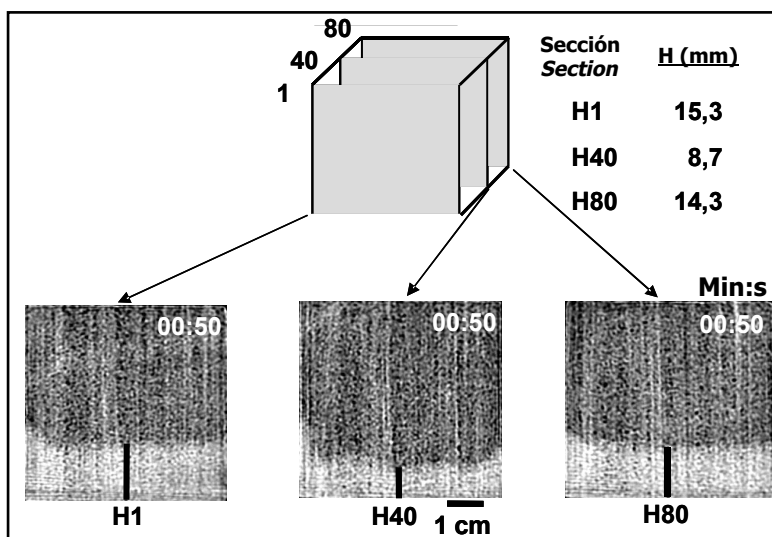


Figura 5. Esquema de la muestra ensayada donde pueden verse las alturas correspondientes del frente de agua (H) en tres secciones (1, 40 y 80) a los 50 segundos de comenzado el ensayo.

Figure 5. Diagram of the test specimen showing the height of the water front (H) in three sections (1, 40 and 80) 50 seconds after starting the test.

Sin embargo, las curvas de la Figura 4 presentan un aspecto bastante similar, con un primer tramo más rápido y posteriormente otro más lento, hasta que el frente del agua alcanza todas las zonas de la parte superior de la probeta, aproximadamente a la hora de comenzado el ensayo. Los coeficientes de penetración correspondientes (A) calculados a partir del tramo recto central de cada curva aparecen reflejados en la Figura 4. Puede decirse que la parte central de la muestra es la zona que más velocidad de ascensión capilar presenta; sin embargo y como puede verse en la Figura 4, es necesario resaltar que si se consideran sólo los primeros minutos del ensayo, las mayores velocidades las presentan las caras externas, como indican tanto las medidas efectuadas mediante TAC, como las efectuadas por el método habitual. De nuevo puede interpretarse debido a las distintas características petrográficas de la zona central y de las zonas externas de la muestra.

A la vista de todo lo expuesto anteriormente, cuando se efectúan medidas de coeficientes de penetración capilar en el laboratorio, debe tenerse en cuenta que, dependiendo de la posición y del método de medida, los valores obtenidos pueden ser significativamente distintos.

Otra de las ventajas de la tomografía se debe a su capacidad de reconstrucción tridimensional. El tratamiento informático de las series de 80 imágenes adquiridas, permite visualizar espacialmente tanto el frente del agua como el volumen de muestra afectada por el proceso de capilaridad y sus variaciones a lo largo del ensayo.

En la Figura 6 puede verse la posición del frente del agua en el interior de la muestra en tres momentos del ensayo.

*Nonetheless, the curves in Figure 4 appeared to be fairly similar, with a first stretch in which water uptake was faster, followed by a slower phase, until the water reached the top of the specimen in all areas, approximately one hour after the test began. The water penetration coefficients (A) calculated from the straight segment in the centre of each curve are shown in Figure 4. The central part of the sample is the area where capillary rise was fastest. As Figure 4 shows, however, if only the first few minutes of the test are considered, the highest rates were reached by the external surfaces, according to both the CAT and the conventional measurements. This was also attributed to the petrographic differences between the inner and outer areas of the specimen.*

*In light of the foregoing, when water penetration coefficients are measured in the laboratory, it should be borne in mind that the values obtained may vary significantly depending on the position and measuring method used.*

*Another advantage of tomography is the three-dimensional imaging it provides. Computer processing of the 80-image series obtained gives a full view of the water front, the volume of sample affected by capillarity and the variations of these values during the test.*

*Figure 6 shows the position of the water front inside the specimen at three different test times. Initially, the front*



En los primeros minutos el frente de agua presenta una forma cóncava debido a la influencia de las características mineralógico-texturales de la muestra como se ha comentado anteriormente. A medida que avanza el ensayo, el frente de agua se hace irregular, debido a cambios en la morfología y porosidad del bandeo sedimentario en las zonas superiores de la muestra.

*was concave due to the mineralogical and textural characteristics of the specimen discussed above. As the test progressed, the water front staggered in response to changes in porosity and sedimentary banding morphology in the upper areas of the specimen.*

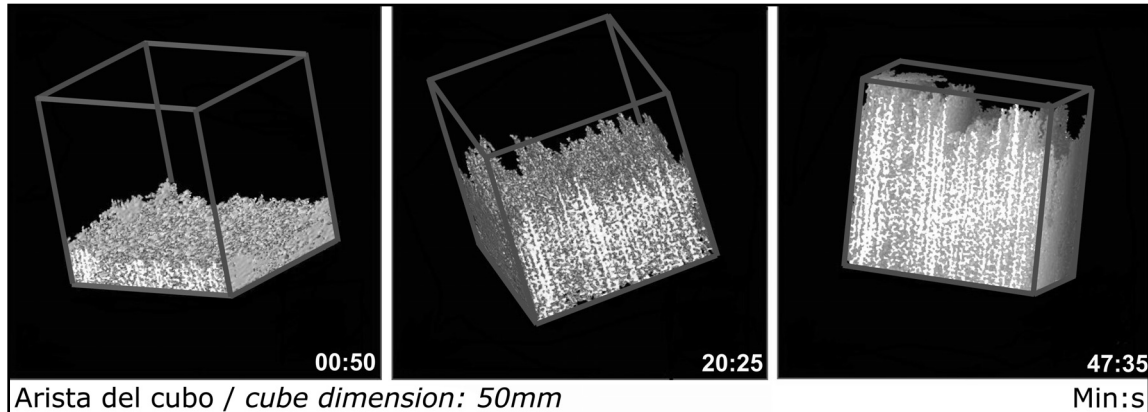


Figura 6. Mosaico de tres imágenes 3-D mostrando el volumen de muestra afectado por el agua a lo largo del ensayo de ascensión capilar.

*Figure 6. Three 3-D mosaic images showing the specimen volume affected during the capillarity test.*

En la serie de imágenes 3-D se ha estimado, además, el volumen de la parte de la muestra afectada por el agua, siguiendo el método de Cavalieri. Si se relaciona este volumen con la superficie de la base de la muestra, puede caracterizarse de otra forma más global la ascensión capilar de una roca.

*In addition, the 3D images were used to estimate the volume of the part of the specimen affected by water, applying the Cavalieri method. When this volume is divided by the area of the bottom of the sample, capillary rise can be characterized more globally.*

En el caso de la muestra estudiada anteriormente, se ha representado la variación del volumen de la parte de la muestra afectada por el agua de capilaridad respecto a la superficie de la base, a lo largo del tiempo (Figura 7). A partir de la pendiente de la parte recta de esta gráfica se puede obtener otro coeficiente de penetración capilar ( $A'$ ) que se define como la altura de un prisma de igual base y el mismo volumen que la parte de la muestra afectada por la capilaridad, en la unidad de tiempo. En esta muestra  $A' = 0,817 \text{ mm/s}^{0,5}$ .

*The variation in the volume of the part of the above specimen affected by capillary water divided by the area of the base is plotted versus time in Figure 7. Another water penetration coefficient ( $A'$ ), which can be obtained from the slope of the straight part of the curve, is defined as the height of a prism with the same base area and volume as the part of the specimen affected by capillarity at a given time. In this specimen  $A' = 0.817 \text{ mm/s}^{0.5}$ .*

Este coeficiente presenta ciertas ventajas con respecto al utilizado habitualmente ( $A$ ). Al considerar el volumen se eliminan los problemas inherentes a las variaciones que se observan cuando se miden alturas en distintas zonas (línea vertical media de las caras, línea central de la probeta, etc.). Se puede determinar, así, un coeficiente que promedia la capilaridad de las zonas con distintas características texturales y ofrece un valor global y más real de la penetración capilar de la roca.

*This coefficient presents several advantages over the more conventional factor ( $A$ ). The use of volume obviates the problems inherent in the variations observed in water line height in different areas (central line on each side, central line of the specimen and so on). The resulting coefficient averages capillarity in areas with different textural characteristics and provides an overall and more realistic value for water penetration in the rock.*

Sin embargo, en el caso de la muestra estudiada en este trabajo,  $A'$  es igual al coeficiente  $A$  obtenido midiendo la

*Nonetheless, in the case of the sample studied here,  $A'$  is equal to  $A$  when the latter is found by measuring the*

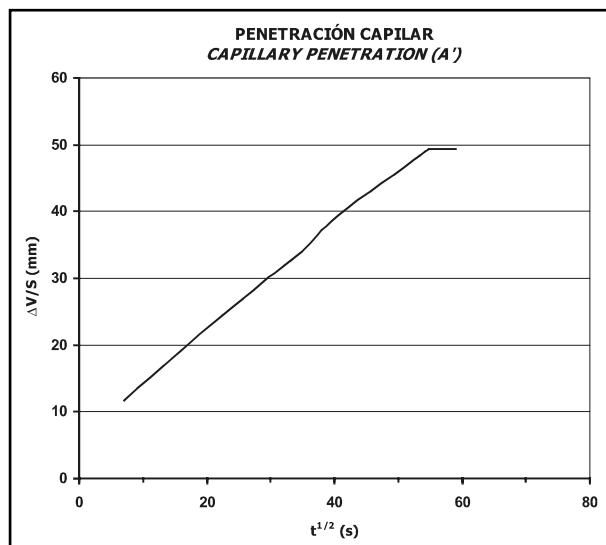


Figura 7. Variación del volumen afectado por el agua de capilaridad dividido por la superficie de la base ( $\Delta V/S$ ), en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $t$ ).

Figure 7. Variation in the specimen volume affected by capillarity divided by the base area ( $\Delta V/S$ ) versus the square root of time ( $t$ ).

altura del frente de agua en la línea vertical central de la muestra ("TAC-Central"). Esto es así porque la morfología del frente de agua varía, pero de manera contraria, a lo largo del ensayo y los efectos se compensan. La forma en que se determina el coeficiente  $A'$  permite ponderar estas variaciones. Sin embargo, en muestras con un frente de agua de forma irregular y mantenida en el tiempo,  $A'$  sería una medida de la penetración capilar más realista que  $A$ .

#### 4.2. Coeficiente de capilaridad

Se ha determinado el coeficiente de capilaridad de la muestra estudiada en el apartado anterior siguiendo la norma UNE-EN 1925:1999 (3), obteniéndose un valor del coeficiente  $C = 104,920 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ .

Aunque este coeficiente de capilaridad no puede ser directamente estudiado mediante TAC, esta técnica puede aportar información adicional a partir del coeficiente de penetración capilar  $A'$ . Se podría estimar, aunque de forma indirecta, el grado de saturación del espacio poroso en el volumen de roca afectado por la capilaridad.

Por ejemplo, la porosidad abierta ( $p_0$ ) de la muestra estudiada es el 25%. El volumen máximo de agua que puede entrar en la parte de la muestra afectada por capilaridad sería el 25% del volumen determinado por el método de Cavalieri a partir de las series de imágenes obtenidas mediante TAC. Eso supondría un grado de saturación del 100 % en el espacio poroso de esa zona de la muestra. En la Tabla I aparecen los volúmenes máximos de agua ( $V_{\text{max}}$ ) que puede absorber la muestra por capilaridad en distintos momentos del ensayo.

*height of the water front at the centreline of the specimen ("CAT-Inner"), because the water front morphology inverts during the test. Such variations can be weighted when determining coefficient  $A'$ , which provides a more realistic measure of water absorption than  $A$  in specimens with a water line that remains staggered over long periods of time.*

#### 4.2. Water absorption coefficient

*The water absorption coefficient of the above sample, determined as specified in standard UNE-EN 1925:1999 (3), was  $C = 104.920 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ .*

*Although the water absorption coefficient cannot be found directly by CAT scanning, this technique can provide additional information based on water penetration coefficient  $A'$ . The degree of saturation of the pores in the volume of rock affected by capillarity can thus be estimated, although indirectly.*

*The sample studied, for instance, had an open porosity ( $p_0$ ) of 25%. The maximum volume of water uptake in the part of the sample affected by capillarity would be 25% of the volume determined by the Cavalieri method from the CAT images. This would amount to 100% of the pore space in such area of the sample. Table I gives the maximum water volumes ( $V_{\text{max}}$ ) that the sample can absorb at different test times.*

La cantidad real de agua absorbida puede estimarse a partir del incremento de masa determinado en el ensayo estándar de absorción capilar (UNE-EN 1925:1999 (3)). En la Tabla I aparecen en la columna  $V_{real}$ .

*The actual amount of water absorbed, estimated from the increase in mass determined with the standard capillary absorption test (UNE-EN 1925:1999 (3)) is shown in the column headed  $V_{real}$  in Table 1.*

Tabla 1 / Table 1

Grado de saturación ( $S_r$ ) del espacio poroso en el volumen de muestra afectado por capilaridad a lo largo del tiempo ( $t$ ).  $V_{max}$ : volumen máximo teórico de agua que puede absorber la zona de la muestra afectada por la capilaridad.  $V_{real}$ : volumen real del agua que penetró en esa zona de la muestra, medido en el ensayo de absorción capilar.

*Saturation degree ( $S_r$ ) in the specimen volume affected by the capillarity process along the time ( $t$ ).  $V_{max}$ : theoretic maximum water volume of the part of the specimen affected by capillarity.  $V_{real}$ : actual water volume of the water that has penetrated by capillarity in that part of the specimen, measured following the capillarity standard test.*

<b>t (h:min:s)</b>	<b><math>V_{max}</math> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>V_{real}</math> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>S_r</math> (%)</b>
00:00:50	7.68	4.80	62.51
00:04:10	12.54	7.88	62.84
00:13:35	12.54	11.68	60.98
00:20:25	22.39	13.51	60.35
00:27:25	25.92	14.98	57.80
00:47:35	31.80	18.25	57.39
00:49:50	32.35	18.57	57.40
00:57:55	32.35	19.65	60.74
		<b>Media / Mean:</b>	<b>60.00</b>

Comparando estos dos volúmenes se puede estimar el grado de saturación producido por capilaridad. El grado de saturación en esta muestra es bastante uniforme a lo largo del ensayo, con un valor medio del 60%. Hay que tener en cuenta, no obstante, que se asume que la porosidad es muy homogénea.

*The degree saturation degree due to capillarity can be estimated from a comparison of these two volumes. In this specimen, the degree of saturation remained fairly flat throughout the test at a mean value of 60%. It should be borne in mind, however, that porosity was assumed to be very uniform.*

## 5. CONCLUSIONES

La tomografía axial computerizada de rayos X (TAC) es una técnica no destructiva que ha demostrado ser muy útil para el estudio de la capilaridad de los materiales rocosos. Su capacidad para mostrar imágenes del interior de la muestra a lo largo del ensayo permite observar el movimiento interno del frente de agua y relacionarlo con las características texturales de la roca.

## 5. CONCLUSIONS

*Computerized axial tomography (CAT) is a non-destructive technique that has proved to be very useful for studying capillarity in rocks. The images of specimen interiors obtained by this technique as the test progresses provide a view of the movement of the water front inside the material that can be correlated to the textural characteristics of the rock.*

En las secciones virtuales es posible medir las variaciones de la altura de este frente, tanto en las caras externas como en el interior de la muestra, y tener una idea más completa y exacta del proceso de absorción capilar. Dependiendo de las características texturales de las rocas, el coeficiente de penetración capilar ( $A$ ) determinado a partir de las medidas en imágenes de tomografía es más real que el calculado por el método habitual [UNE-EN 1925:1999 (3)].

*The variations in the height of the line can be measured both on the outside and inside of the sample to afford a fuller and more accurate understanding of the capillary absorption process. Depending on rock texture, the water penetration coefficient ( $A$ ) determined from measurements taken on CT images is more realistic than the value calculated with the conventional method [UNE-EN 1925:1999 (3)].*

Las reconstrucciones 3-D permiten observar claramente la posición de la superficie del frente del agua en cualquier momento del ensayo y la influencia que sobre él tienen las variaciones petrográficas de la roca.

A partir de las secciones seriadas puede estimarse con precisión una información nueva sobre la capilaridad: el volumen de la muestra afectada por el proceso y su variación a lo largo del tiempo. De esta forma puede determinarse un nuevo coeficiente de penetración ( $A'$ ) más global, útil y preciso que el utilizado hasta ahora, especialmente en el caso de materiales con marcadas heterogeneidades texturales.

Los resultados obtenidos mediante TAC complementan los de los ensayos normalizados, de forma que puede estimarse otra información novedosa sobre la capilaridad como es el grado de saturación del espacio poroso afectado por la absorción capilar.

La metodología utilizada puede ser aplicada a cualquier tipo de piedra ornamental.

*The 3D images clearly show the position of the surface of the water front at any given time during the test and the effect of variations of rock petrography on its advancement.*

*The serial sections can be used to obtain precise new information on capillarity: the volume of the sample affected by the process and its variation over time. Consequently, a new water penetration coefficient ( $A'$ ) can be determined to obtain a more global, useful and precise estimate than provided by the coefficient used to date, particularly in very texturally heterogeneous materials.*

*The results of standard tests are supplemented by CAT findings, which can be used to quantify new information on capillarity, such as the degree of saturation of the pore space affected by capillary absorption.*

*The methodology used can be applied to all types of ornamental stone.*

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia (Dirección General de Investigación). Proyecto: MEC-05-MAT2005-05520.

## ACKNOWLEDGEMENTS

*The present research was funded by the Spanish Ministry of Education and Science (Directorate General of Research) under Project: MEC-05-MAT2005-05520.*

## BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Mamillan, M.: "Connaissances actualles des problémes de remontées d'eau par capillarité dans les murs". In: R. Rossi-Manaresi (Ed.). *The Conservation of Stone II. Proc. Int. Symp. Bologna (Italy)*, (1981), pp. 73-90.
- (2) Sass, O.: "Rock moisture measurements: techniques, results, and implications for weathering". *Earth surface processes and landforms*. Vol. 30 (2005), pp. 359-374.
- (3) UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. AENOR (Eds.), Madrid, Spain, (1999). 13 pp.
- (4) Torraca, G.: "Porous building materials". ICCROM, Technical Notes. Roma (Italy), (1986), 149 pp.
- (5) Wang, L. B., Frost, J. D., Lai, J. S.: "Three-dimensional digital representation of granular material microstructure from x-ray tomography imaging". *J. of Computing in Civil Engineering*. Vol. 18 (2004), pp. 28-35.
- (6) Al-Raoush, R. I., Willson, C. S.: "Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems". *J. of Hydrology*. Vol. 300 (2005), pp. 44-64.
- (7) Hirono, T., Takahashi, M., Nakashima, S.: "In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT". *Eng. Geol.* Vol. 70 (2003), pp. 37-46.
- (8) Ruiz de Argandoña, V. G., Rodríguez-Rey, A., Celorio, C., Calleja, L., Suárez del Río, L. M.: "Characterization by X-ray computed tomography of water absorption in a limestone used as building stone in the Oviedo Cathedral (Spain)". In: Mess, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P. (Eds.). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geol. Soc., London, Special Publications, 215, (2003), pp. 127-134.
- (9) Géraud, Y., Surma, F., Mazerolle, F.: "Porosity and fluid characterization of granite by capillary wetting using X-ray computed tomography". In: Mess, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P., (Eds.). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geological Society, London, Special Publications, 215, (2003), pp. 95-105.
- (10) Rousset-Tournier, B., Mazerolle, F., Géraud, Y., Jeannette, D.: "Rock drying test monitored by X-ray computed tomography the effect of saturation methods on drying behaviour". In: Mess, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P., (Eds.). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geological Society, London, Special Publications, 215, (2003), pp. 117-125.
- (11) Seiki, T., Ayda, O.: "Deterioration of Oya tuff and its mechanical property change as building stone". In: Yüzer, E., Ergin, H., Tugrul, A. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium Industrial Minerals and Building Stones (IMBS\_2003)*, Istanbul, Turkey,

- International Association for Engineering Geology and the Environment, The Turkish National Group of IAEG, Istanbul Technical University, (2003), pp. 329-336.
- (12) Cnudde, V., Jacobs, P.: "Preliminary results of X-ray micro-tomography applied in conservation and restoration of natural building stones". In: Otani, J., Obara, Y., (Eds.). Proceedings of the International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials, GEOX2003. AA Balkema Publishers, Netherlands, (2004). pp. 363-371.
- (13) Ruiz de Argandoña, V. G., Rodríguez-Rey, A., Celorio, C., Suárez del Río, L. M., Calleja, L., Llavona, J.: "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)*, Vol. 24 (7) (1999), pp. 633-637.
- (14) Rodríguez-Rey, A., Ruiz de Argandoña, V. G., Calleja, L., Suárez del Río, L.M., y Celorio, C.: "X-ray tomography characterization of microfissuration on rocks generated by freeze-thaw cycles". In: Otani, J., Obara, Y. (Eds.): Proceedings of the International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials, GEOX2003. AA Balkema Publishers, Netherlands, (2004). pp. 293-298.
- (15) Rodríguez-Rey, A., Ruiz de Argandoña, V. G., Calleja, L., Suárez del Río, L. M. y Celorio, C.: "Consolidants influence on sandstone capillarity. X-ray CT study". In: Desrués, J., Viaggiani, G., Bésuelle, O., (Eds.): Proceedings of the International Workshop on Advances in X-ray Tomography for Geomaterials GEOX2006. ISTE, Ltd., UK, (2006). pp. 381-387.
- (16) Geological Society of America: "Rock-Color Chart (with genuine Munsell color chips)". The Geological Society of America, Boulder, Colorado, (1991).
- (17) Pettijhon, F. J., Potter, P. E., Siever. R.: SAND AND SANDSTONE. Springer-Verlag, Berlín, (1972), 618 pp.
- (18) Suárez del Río, L.M., Calleja, L. , Díez Sarriá, I. , Ruiz de Argandoña, V.G. , Rodríguez-Rey, A. : "Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias". *Trabajos de Geología*. Univ. de Oviedo, Vol. 23 (2002), pp. 73-84.
- (19) 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.), Madrid, Spain, (1999). 12 pp.
- (20) Dului, O. G.: "Computer axial tomography in geosciences: an overview". *Earth-Science Reviews*. Vol. 48 (1999), pp. 265-281.
- (21) Gundersen, H. J. G., Jensen, E. B.: "The efficiency of systematic sampling in stereology and its prediction". *J. of Microsc.*, Vol. 147, Pt. 3 (1987), pp. 229-263.

\* \* \*