

Aplicación de la tomografía axial computerizada de rayos X al estudio de materiales rocosos

Ruiz de Argandoña, V. G.¹; Calleja, L.¹; Suárez del Río, L. M.¹; Rodríguez-Rey, A.¹; Celorio, C.² y Llavona J.².

¹ *Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. 33080 Oviedo (Asturias, España).*

² *Servicio de Radiodiagnóstico. Hospital Alvarez-Buylla. 33616 Murias-Mieres (Asturias, España).*

Recibido el 30 de Septiembre de 1998.

Aceptado el manuscrito revisado el 19 de Noviembre de 1998.

Resumen: Se han sometido muestras de la dolomía de Laspra (una de las rocas utilizadas en la construcción de la Catedral de Oviedo) a ciclos de hielo-deshielo con el fin de estudiar la aplicabilidad de la tomografía axial computerizada de rayos X al estudio de las características texturales de la roca, así como a la evaluación de los daños producidos; las muestras han sido observadas en superficie por medio de una lupa binocular tras cada ciclo, detectándose la aparición de fisuras en el cuarto ciclo. La tomografía de rayos X (TAC) ha suministrado una información precisa del desarrollo de la fisuración en el interior de las muestras, pudiendo observarse que el mismo está asociado al límite entre dos zonas texturalmente diferentes. Debido al carácter "no destructivo" de la tomografía de rayos X, se comprueba su aplicabilidad al estudio del interior de los materiales rocosos, tanto para la detección de fisuras, como para conocer su distribución y desarrollo en relación a la textura de la roca.

Palabras Clave: Tomografía axial computerizada, rayos X, alterabilidad, fisuración, patrimonio monumental, dolomía de Laspra.

Abstract: Samples of the Laspra dolomite used as a building material in the Cathedral of Oviedo, have been subjected to freezing-thawing cycles, with the aim of assessing the applicability of X-Ray computed tomography to the study of the textural characteristics of rocks and the inner damage due to weathering processes. The samples have been externally observed by binocular magnifying microscope after each performed cycle, and fissures were visible in the fourth cycle. The X-Ray tomography has provided a precise information of the developed fractographic network inside the specimens, this being associated to the boundary between two texturally different zones. Due to the "Non-destructive" character of the X-ray tomography, its utility in the inner study of rock materials has been assessed, and can be used not only to detect fissures inside the rock, but to know their distribution and development in relation to the rock texture.

Key words: X-Ray computed tomography, weathering processes, fissures, monumental heritage, Laspra dolomite.

El estudio de los materiales rocosos mediante técnicas no destructivas basadas en la auscultación y análisis de una señal y en la detección de variaciones significativas en la misma, es de gran interés en diversos campos de la Geología. Dichas señales pueden proceder de forma espontánea de la propia roca o bien haberse "inyectado" artificialmente en ella. Ejemplo

de las primeras puede ser la emisión acústica o actividad microsísmica, mientras que entre las segundas se pueden citar los rayos X, corrientes eléctricas, pulsos de ultrasonidos, radiaciones térmicas, etc.

En este trabajo se estudia la aplicabilidad de la tomografía axial computerizada de rayos X al estudio de los materiales rocosos; ya desde hace varios

años se ha usado la radiología convencional (radiaciones con longitud de onda menor de 100 Å) en rocas, principalmente para el estudio de estructuras sedimentarias. No obstante, existían dos problemas importantes: el espesor útil de las muestras (las radiaciones utilizadas tenían una capacidad bastante limitada de penetración) y la información registrada en la placa fotográfica (que es la superposición de toda la existente a lo largo del espesor de la muestra, lo que hace que las imágenes parezcan desenfocadas).

Con el desarrollo de la tomografía axial computerizada (TAC), iniciada en medicina en los años 70 y ampliada en los 80 a otros campos de la ciencia, los estudios experimentan un giro espectacular, ya que se pueden utilizar muestras de mayor espesor y la información puede ser extraída de una zona concreta y a una profundidad determinada. Una explicación más completa sobre estos aspectos puede verse en Denison et al. (1997).

Las distintas generaciones de los equipos se fundamentan en los movimientos tanto del detector como del tubo. El utilizado en esta investigación (un modelo de 4ª generación) posee una corona fija de detectores situados alrededor del objeto y es el tubo de rayos X el que gira 360° a su alrededor.

Las aplicaciones en el campo de la Geología pueden ser muy amplias y prometen un futuro esperanzador; en este sentido se han publicado ya estudios relacionados con la porosidad, microfisuración, densidad, mineralogía, etc., de materiales rocosos (Petrovic et al., 1982; Wang et al., 1984; Hunt et al., 1987; Vinegar y Wellington, 1987; Wellington y Vinegar, 1987; Raynaud et al., 1989; Warner et al., 1989; Anderson, 1990; Onaisi et al., 1993; Johns et al., 1993; Denison et al., 1997, entre otros).

El presente trabajo se centra en la utilización de esta técnica en el estudio de los daños producidos por ciclos de hielo-deshielo en uno de los materiales pétreos utilizados en la construcción de la Catedral de Oviedo, la dolomía de Laspra.

Material y método

La dolomía de Laspra, de edad terciaria (Paleógeno), es la piedra más utilizada en la construcción

de la Catedral de Oviedo (alrededor del 60 %, según Esbert y Marcos, 1983) y se trata de una roca con textura microcristalina, formada por dolomita (90 %), cuarzo (5 %) y arcillas (4,5 %); como accesorios se encuentran minerales de hierro que a veces tiñen los granos adyacentes. La dolomita es de tamaño micrita con tendencia idiomórfica. Los granos de cuarzo, con tamaños entre 20 y 100 mm, se encuentran repartidos uniformemente por toda la muestra. En algunos casos se aprecian diminutos restos fósiles (menores de 50 mm) de difícil identificación. Las muestras utilizadas en esta investigación fueron extraídas de un sillar de la Catedral de historial desconocido.

Siguiendo los métodos sugeridos por la ISRM (1981), se han determinado la densidad de la roca (1970 kg/m³) y la porosidad abierta (27,6%); para la determinación del contenido de agua en saturación se siguió el método propuesto por Belikov et al. (1967) obteniéndose un valor del 14%. También se ha medido la velocidad de propagación de ondas longitudinales ultrasónicas sobre cubos de 5 cm de arista, obteniéndose valores que varían entre 2440 y 2900 m/s, según las distintas direcciones; esta anisotropía se debe a la existencia de una heterogeneidad textural originada por la orientación morfológica de los espacios vacíos y su distribución no uniforme.

Los ciclos de hielo-deshielo se realizaron sobre 12 probetas cúbicas de unos 5 cm de arista. Previamente, estas probetas fueron caracterizadas petrofísicamente y estudiadas mediante TAC en un equipo de General Electric Medical System, modelo SYTEC 3000. El voltaje y la intensidad del haz de rayos X utilizados son los máximos posibles: 120 kV y 160 mA, consiguiendo así la mayor penetración en el material rocoso y la máxima información posible. Tanto el espesor de la "laja" estudiada como el intervalo entre cortes han sido de 1 mm.

Las características de cada ciclo fueron las siguientes (tras una previa saturación en agua al vacío durante 24 horas):

- descenso de temperatura hasta -15°C en 30 minutos,
- temperatura constante a -15°C durante 2,5 horas,
- ascenso hasta 10°C en 30 minutos,
- temperatura constante a 10°C durante 2,5 horas.

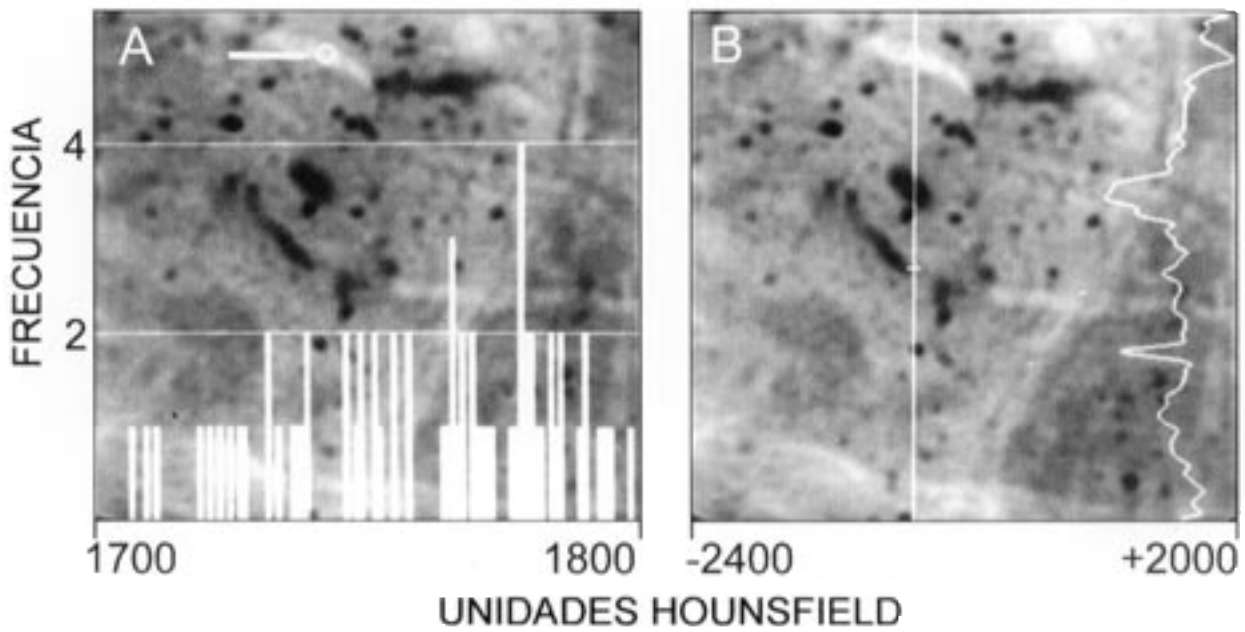


Figura 1.- Imágenes de TAC de la dolomía de Laspra: (A) Histograma de distribución de los números CT (en unidades Hounsfield) de la zona encerrada en el círculo señalado con la flecha; (B) números CT de los puntos situados en la línea blanca vertical de la imagen; (longitud del lado ca. 5 cm).

En total se realizaron 7 ciclos, al cabo de los cuales algunas probetas se fracturaron casi totalmente, si bien la pérdida de material fue mínima. Sobre cada probeta se trazó una línea de referencia, de modo que las observaciones con TAC fueran reproducibles a lo largo de los ciclos.

Dada la programación previa del equipo de TAC utilizado, los cortes se realizaron con el programa médico preexistente para ver el oído humano, ya que, al estar formado (en parte) y rodeado (parcialmente) por huesos, es una de las partes del cuerpo con un comportamiento frente a los rayos X más parecido al de las rocas.

La información proporcionada por las imágenes está relacionada con el coeficiente de atenuación (m) del medio atravesado; actualmente, en lugar de ese coeficiente de atenuación, se utiliza el número CT (cuya unidad es el Hounsfield), siendo éste la relación existente entre la atenuación de los rayos X en la materia atravesada (m) y en el agua (μ_w) (expresado en tanto por mil): $CT = 1000(m - \mu_w) / \mu_w$.

El valor CT para el agua es cero y -1000 para el aire (a 100 keV); los valores CT varían en función de la densidad del medio y la longitud de onda de los rayos utilizados. En el equipo instrumental utilizado el intervalo de medida varía entre -1500 y 4000

unidades Hounsfield, lo que se traduce en los colores negro y blanco respectivamente, con toda la escala de grises intermedia.

Después de los estudios realizados en la dolomía de Laspra (de tamaño de grano muy fino), los valores CT obtenidos pueden no responder totalmente a la atenuación debida a un único medio, ya que en la anchura de corte (1 mm) podrían superponerse varios granos de composición mineralógica diferente (no obstante, este efecto es mínimo debido a la composición casi monomineralógica de la roca) y los números CT pueden utilizarse para comparar zonas con diferentes composiciones mineralógicas y texturales.

Este efecto es mucho mayor en materiales de tamaño de grano más grueso, donde sí es posible utilizar mucho mejor dichos valores para diferenciar zonas con distinta composición y textura. En la Figura 1 se muestran los valores de los números CT de dos zonas en una sección obtenida por TAC en la dolomía de Laspra.

Para la visualización de las imágenes existen dos parámetros relacionados con los números CT, que hay que fijar para cada material y así obtener la mayor y mejor información posible: la anchura y el nivel de ventana.

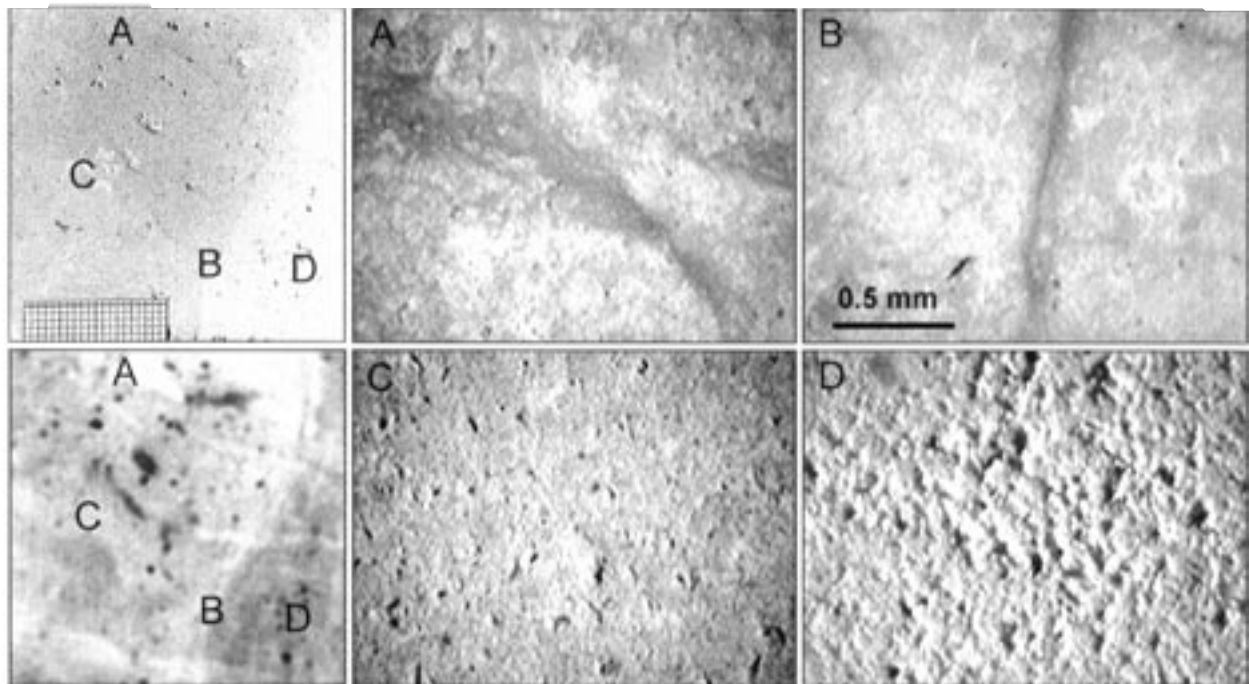


Figura 2.- Izquierda: Aspecto macroscópico de la dolomía de Laspra (arriba) y su correspondiente imagen de TAC (abajo, misma escala): (A) y (B) zonas compactas con bioturbación y estructuras diagnéticas, (C) zona con pequeños poros distribuidos uniformemente, (D) zona con más poros y de mayor tamaño. Centro y derecha: Detalle de las zonas A, B, C y D señaladas sobre las dos imágenes anteriores, observadas mediante lupa binocular, las cuatro al mismo aumento.

Anchura de ventana (WW): determina la gama de números CT asignados a la escala de grises. El programa asigna tonos de grises a los números CT situados dentro del rango seleccionado; los que se encuentran fuera del rango se representan en blanco o negro.

Nivel de ventana (WL): define el valor central del número CT (color gris medio); los valores CT inferiores varían desde ese gris medio hacia el negro y los superiores hacia el blanco.

En un material rocoso heterogéneo composicional y texturalmente, una ventana ancha es la más adecuada; con materiales más homogéneos, en los que la variación del CT es más reducida, la ventana puede ser más estrecha, lo que permite obtener mejor contraste y mayor discriminación de densidades. Una ventana más ancha permite una medición más real de los tamaños, aunque produce una pérdida en la discriminación de los pequeños cambios de densidad. Tras diversas pruebas realizadas con el material objeto de estudio, se ha determinado que el valor CT 1500 era el más idóneo tanto para la anchura como para el nivel de ventana.

Resultados y conclusiones

Una vez definidos los parámetros anteriormente expuestos, el TAC ha permitido ver, en el interior de las muestras, aspectos texturales no apreciables mediante otras técnicas. Así, comparando algunos cortes de TAC con las láminas delgadas correspondientes a esos cortes estudiadas mediante microscopía óptica de polarización y con muestras observadas por microscopía electrónica de barrido (con electrones secundarios y retrodispersados), se ha observado que las zonas con niveles de grises intermedios en la imagen TAC corresponden a la textura microcristalina normal de la roca; las zonas o bandas más claras se deben a zonas menos porosas, con empaquetamientos más compactos de los cristales y probablemente más ricas en minerales arcillosos mientras que las zonas más oscuras están relacionadas con la existencia de más o mayores espacios vacíos (poros o fisuras) (Fig. 2).

Esta información, una vez digitalizada y procesada, permite reconstruir bastante fielmente las características texturales del interior de las probetas, siem-

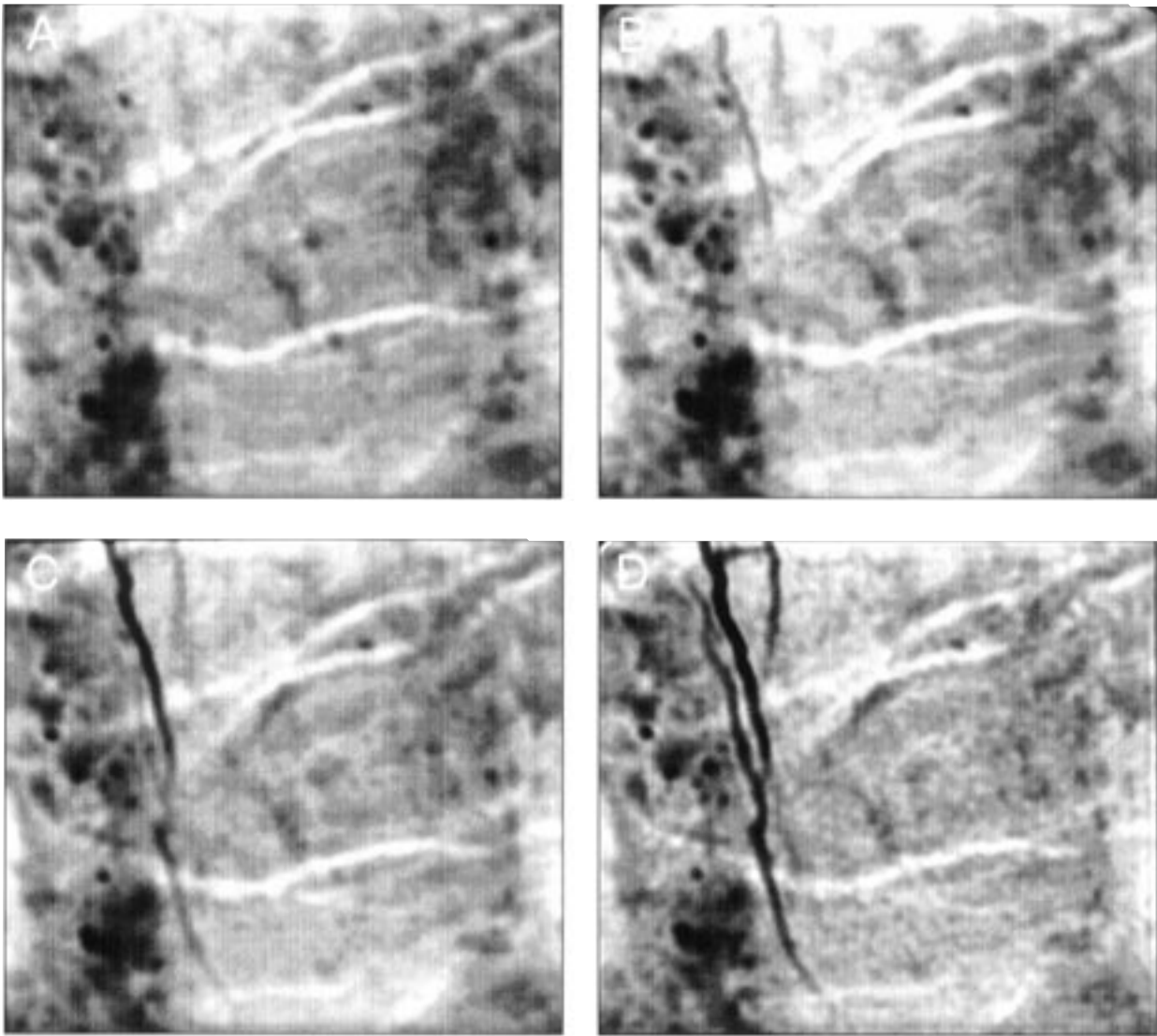


Figura 3.- Evolución de la fisuración en la misma zona de una probeta con los ciclos de hielo deshielo, en imágenes TAC. A: ciclo 4 (inicio de la fisuración); B: ciclo 5; C: ciclo 6; D: ciclo 7; (longitud del lado ca. 5 cm).

pre teniendo en cuenta que el tamaño de los espacios vacíos está influenciado por la anchura y nivel de ventana.

Desde el punto de vista de los daños producidos por el ensayo de heladicidad, la dolomía de Laspra comienza a fisurarse en el cuarto ciclo. El desarrollo de la fisuración fue observado superficialmente con lupa binocular, mientras que, en el interior de las probetas, se siguió la evolución de las fisuras creadas a lo largo de los ciclos mediante TAC, observándose así el aumento del número, longitud y anchura de las fisuras con los ciclos y, a partir del sexto, la aparición de desplazaciones.

La fisuración inducida está condicionada por las características texturales de la roca. En alguna de las probetas se distinguen tres zonas o bandas con porosidades diferentes: una zona central, con poros de muy pequeño tamaño flanqueada por otras dos bandas con poros mucho mayores. La primera fisura detectada (ciclo 4) se desarrolla delimitando dos de estas zonas con diferentes características de porosidad y progresa en los siguientes ciclos siguiendo este contacto (Fig. 3); cuando se ramifica, tiende a seguir direcciones más o menos paralelas a él. El desarrollo de esta orientación preferente de las fisuras ha sido corroborado además mediante la va-

riación de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales ultrasónicas: tras el séptimo ciclo su disminución en las dos direcciones más paralelas a la anisotropía textural fue del 15-16%, mientras que en la perpendicular llegó al 60%.

Tras los 7 ciclos realizados no se apreció una disminución significativa de peso en las probetas, es decir los ciclos de hielo-deshielo provocan solamente la generación de fisuras, sin pérdida de masa, y el consiguiente aumento de la porosidad (en torno a un 5% después del último ciclo).

Referencias

- Anderson, S. H. (1990): Macropore-scale measurement of soil density, water content, and solute transport using X-ray computed tomography. *Conf. on Analytical Methods for Quantifying Root and Soil Dynamics*. Soil Sci. Soc. Of Am., St. Louis, Mo. Aug. 13-14.
- Belikov, B. P., Zaleskii, B. V., Rozanov, Y. A., Sanina, E. A. and Timchenko, I. P. (1967): Methods of studying the physicommechanical properties of rocks. En: *Physical and Mechanical Properties of rocks*. Israel Program for Scientific Translation: 1-58. Jerusalem.
- Denison, C., Carlson, W. D. and Ketcham, R. A. (1997): Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography : Part I. Methods and techniques. *J. Metamorphic Geol.*, 15 (1): 29-44.
- Esbert, R. M. y Marcos, R. M. (1983): *Las piedras de la Catedral de Oviedo y su deterioración*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. 147 p., Oviedo.
- Hunt, P. K., Engler, P. and Bajsarowicz, C. (1987): Computed tomography as a core analysis tool : Applications and artifact reduction techniques. *Annual Meeting Soc. of Pet. Eng.*, Dallas (Texas), Paper SPE 16952.
- I. S. R. M. (1981): *Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods*. E. T. Brown (Ed.). International Society for Rock Mechanics; Commission on testing methods. 211 p. Pergamon Press.
- Johns, R. A., Steude, J. S., Castanier, L. M. and Roberts, P. V. (1993): Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography. *J. Geophys. Res.*, 98 (B2): 1889-1900.
- Petrovic, A. M., Siebert, J. E. and Rieke, P. E. (1982): Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 (3): 445-450.
- Onaisi, A., Audibert, A., Bieber, M. T., Bailey, L., Denis, J. and Hammond, P. S. (1993): X-ray tomography visualization and mechanical modelling swelling shale around the wellbore. *Pet. Sci. Engng.*, 9 (4): 313-329.
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Geraud, Y. and Latiere, H. J. (1989): Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method : X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, 159: 149-159.
- Vinegar, H. J. and Wellington, S. L. (1987): Tomographic imaging of three-phase flow experiments. *Rev. Sci. Instrum.*, 58: 96-107.
- Wang, S. Y., Ayril, S. and Gryte, C. C. (1984): Computer-assisted tomography for the observation of oil displacement in porous media. *Annual Meeting, Soc. of Pet. Eng.*, Dallas (Texas), Paper SPE 11758.
- Warner, G. S., Nieber, J. L., Moore, I. D. and Gesie, R. A. (1989): Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 653-660.
- Wellington, S. L. and Vinegar, H. J. (1987): X-Ray computerized tomography. *J. Pet. Technol.*, 39: 885-898.

Por todo ello, puede afirmarse que la tomografía axial computerizada de rayos X aplicada al estudio del interior de los materiales rocosos, puede servir para detectar la distribución y desarrollo de fisuras así como para estudiar otras características mineralógicas y texturales difíciles de observar con otras técnicas.

Agradecimientos

A la Universidad de Oviedo, por haber subvencionado esta investigación (Proyecto IR - 97 - 515 - 3).
Al Hospital Alvarez-Buylla de Mieres (Asturias), por las facilidades dadas para realizar las tomografías de rayos X.