

## OBSERVACION DEL SISTEMA POROSO DE ROCAS CARBONATADAS AL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO

B. Menéndez\*, J. Ordaz\* y F. Alonso\*

### RESUMEN

Se estudia en este trabajo el sistema poroso de tres rocas carbonatadas, a partir de observaciones de moldes de resina y réplicas de látex al microscopio electrónico de barrido. Las rocas seleccionadas —calizas de Hontoria y Sevilla, y dolomía de Boñar— han sido ampliamente utilizadas en la construcción de importantes monumentos del Patrimonio Histórico Español. Se ha comprobado, asimismo, el grado de impregnación alcanzado por las resinas epoxídicas en diferentes procedimientos, a partir de técnicas de porosimetría de inyección de mercurio. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto, en general, la complejidad de la estructura porosa de dichas rocas.

**Palabras clave:** caliza, dolomía, sistema poroso, moldes de poros, M.E.B.

### ABSTRACT

The pore system of three carbonate rocks is studied through observation of resin and latex casts, under scanning electron microscope. The selected rocks —Hontoria and Seville limestones, and Boñar dolomite— have been broadly employed in the construction of outstanding monuments of the Spanish Historical Heritage. The degree of impregnation achieved by the epoxy resins, according to different procedures, is also checked by means of mercury injection porosimetry techniques. The observation of the pore casts displays, generally, the complexity of the pore systems of these rocks.

**Key words:** limestone, dolomite, pore system, pore-cast, S.E.M.

### Introducción

El conocimiento de la estructura porosa de los materiales rocosos es de gran interés, ya que, entre otros motivos, influye directamente en la mayor parte de sus propiedades físicas. En particular, cabe señalar la estrecha relación existente entre el sistema poroso y las propiedades relacionadas con la sorción y flujo de agua por el seno de las rocas y, por tanto, su importancia en los fenómenos de alteración.

Como consecuencia del carácter continuo y tridimensional del sistema poroso, su estudio —incluida su observación directa— constituye a menudo un problema no exento de dificultades técnicas. En este sentido, pueden diferenciarse distintos aspectos:

— Un primer aspecto a considerar es la determinación del volumen (porcentaje) de espacios vacíos comunicados presentes en la roca, conocido como «porosidad abierta»

— Un segundo aspecto consiste en la caracterización morfológica del sistema poroso; así como la cuantificación de los distintos parámetros: tamaños, formas de poros y conductos, números de coordinación, etc.

Desde el punto de vista práctico, la determinación de la porosidad (propiedad física) puede llevarse a cabo —más o menos fácilmente— mediante la utilización de técnicas sencillas (método hidrostático, picnométrico, etc...). Asimismo, pueden determinarse parámetros muy específicos del sistema poroso, tales como el tamaño de los poros y la superficie específica, a partir de técnicas instrumentales indirectas, tales como los ensayos de succión (Castro, 1977) o la porosimetría por inyección de mercurio (Lowell y Shields, 1984).

La caracterización de la estructura y morfología del sistema poroso es un problema de más difícil solución. Esto es debido a que se requiere la observación

\* Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo. 33080 Oviedo.

directa y tridimensional del espacio poroso, lo cual no es posible en la mayor parte de los casos.

No es de extrañar, pues, que el estudio de la geometría del sistema poroso de las rocas carbonatadas no se haya desarrollado hasta hace relativamente pocos años (Choquette y Pray, 1970). La complejidad y variabilidad de formas, tamaños, etc., unida a la falta de técnicas verdaderamente adecuadas para su observación y análisis, han imposibilitado una mejor y más correcta comprensión de la estructura porosa de dichas rocas.

En este sentido, la microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) se muestra como una técnica de observación muy apropiada. Sus ventajas fueron puestas de manifiesto desde los primeros trabajos (Weinbrandt y Fatt, 1969; Gillott, 1969; Nissen y Wessicker, 1970; Timur *et al.*, 1971 y Sarkisyan, 1971), destacando las siguientes:

- Gran poder de resolución y capacidad de aumentos.
- Gran profundidad de campo.
- Posibilidad de observación de secciones sucesivas de la misma muestra (lo que permite obtener una cierta «imagen tridimensional» del sistema poroso).

A pesar de ello, la observación directa de las rocas sólo revela una parte del sistema poroso. Por ello, y desde hace tiempo, se han desarrollado técnicas para la obtención de moldes o réplicas, con el objeto de reproducir el sistema poroso «en negativo». En la actualidad, el perfeccionamiento de estos métodos puede llegar a permitir una mejor visualización de la estructura del sistema poroso, a partir de la observación de dichos moldes al microscopio electrónico de barrido.

En este trabajo se han analizado tres tipos rocosos carbonatados empleados como piedras de construcción en diversos monumentos históricos españoles. Para la observación del sistema poroso se han utilizado réplicas de látex de sus superficies pulidas y moldes. Los moldes se han obtenido a partir de dos tipos de resinas epoxídicas, considerándose además diferentes procedimientos de impregnación. El control de dichas impregnaciones se ha llevado a cabo mediante porosimetría por inyección de mercurio.

## Materiales

### *Dolomía de Boñar*

Se trata de una dolomía del Cretácico Superior de León, y corresponde a uno de los materiales rocosos más utilizados en la construcción de la catedral de León (Esbert *et al.*, 1981). Las muestras han sido tomadas en las canteras de Boñar (León). Corresponde a una roca de naturaleza dolomítica, con bajo porcentaje de calcita (5 al 15%) y, en menor cantidad, granos de cuarzo, óxidos de hierro y filosilicatos. La textura es finamente cristalina, granoblástica poligonal, subidiomórfica, de aspecto bastante uniforme, en la que

destacan granos relictos más o menos difusos. El tamaño medio de los cristales puede situarse alrededor de 20  $\mu\text{m}$ , oscilando entre 100  $\mu\text{m}$  en algunos núcleos cristalinos y 4  $\mu\text{m}$  en los granos relictos. Por lo general, en las zonas intersticiales —respecto a los granos relictos— el tamaño de los cristales aumenta (especialmente en el caso de que estén compuestos de calcita). Contrariamente, en las zonas donde abundan los granos relictos, el tamaño medio de los cristales es ligeramente menor y con gran cantidad de inclusiones.

Las concentraciones de óxidos de hierro se sitúan preferentemente en los bordes de los granos relictos y en el interior de los espacios intersticiales. Entre los granos relictos se distinguen foraminíferos, así como otros restos fósiles más o menos redondeados; su tamaño medio es de, aproximadamente, 200  $\mu\text{m}$ . Esporádicamente, diseminados por la masa rocosa, aparecen granos de cuarzo de tamaño inferior a 50  $\mu\text{m}$  (tamaño limo).

### *Caliza de Hontoria*

Se trata de una caliza del Cretácico Superior, de la zona de Hontoria (Burgos), utilizada desde antiguo como material de construcción. En concreto, es la piedra mayoritariamente empleada en la edificación de la catedral de Burgos y, en menor medida, se ha empleado también en la reconstrucción de la catedral de León (Esbert *et al.*, 1981). Las muestras estudiadas se han tomado de las canteras de Hontoria. Su composición mineralógica es calcítica, sin apenas indicios de otros minerales. Texturalmente es una caliza bioclástica (tipo grainstone), con cementación mayoritariamente sintaxial. Los granos presentan un elevado grado de empaquetamiento, y una variación bastante acusada de tamaño; a veces resulta difícil distinguir sus bordes dada la continuidad óptica del cemento calcáreo. En ocasiones puede observarse algún grano de cuarzo, con tamaño medio alrededor de 50  $\mu\text{m}$ .

Como constituyentes esenciales predominan los granos alargados, con forma de valva (probablemente de moluscos). Se distinguen, asimismo, restos de crinoideos y granos redondeados (peloides). Se observan algunas zonas más cristalinas, con cristales de calcita que pueden alcanzar tamaños de hasta 0,5 mm. En otras partes las muestras presentan calcita de tamaño micrítico (4  $\mu\text{m}$ ).

### *Caliza de Sevilla*

Esta caliza ha sido utilizada en la construcción de la catedral de Sevilla, de donde se han tomado las muestras estudiadas; y proviene de los niveles Jurásicos (Malm-Dogger) del área sevillana (IGME, 1985).

Mineralógicamente es una roca constituida por calcita, con algunos indicios de feldespatos. La textura

de la roca es granuda (tipo grainstone), muy débilmente cementada. Los granos son mayoritariamente esféricos, heterométricos, de naturaleza micrítica.

En cuanto al tamaño de dichos granos se observan tres tendencias. Los mayores, que pueden corresponder a rodolitos, alcanzan hasta 1 cm. de diámetro. Otros, peloides y excepcionalmente oolitos, presentan un diámetro alrededor de 0,5 mm. Finalmente aparece otra moda para tamaños de grano alrededor de 100  $\mu\text{m}$ , que pueden ser atribuidos a típicos pellets.

Los fósiles son escasos, observándose también algún intraclasto. La roca se halla pobre y heterogéneamente cementada, pudiéndose distinguir dos tipos de cemento. Uno, constituido por cristales de tamaño micrítico a microesparítico, forma delgadas orlas sobre el borde de algunos granos; el otro, de mayor tamaño —esparítico—, muestra en ocasiones tendencia poiquilítica.

## Preparación de las muestras

### Impregnación y obtención de moldes de resina

Básicamente, el objetivo de estas técnicas consiste en introducir, en los espacios vacíos de una muestra rocosa, algún tipo de sustancia impregnante, de forma que llene los poros al máximo. Posteriormente, y una vez consolidado el impregnante, se disuelve la materia mineral con ácidos, obteniéndose entonces un molde o «negativo» de los espacios vacíos de la muestra.

El primero es utilizar este tipo de técnicas en el estudio de la porosidad fue Nutting (1929), el cual realizó réplicas en cera de los vacíos de una roca. Waldo y Yuster (1937) impregnaron rocas con bálsamo fundido y examinaron secciones delgadas. Posteriormente Imbt y Ellison (1946) y Nuss y Whiting (1947) realizaron moldes del sistema poroso de areniscas en plástico. En 1949 Ryder siguió esta técnica en el estudio de la geometría porosa de otra arenisca. Winsaucer *et al.* (1952) impregnaron una roca con metal de Wood (aleación de bismuto con plomo, estaño y cadmio) y posteriormente la pulieron para su observación al microscopio. Etienne (1963), estudió la porosidad de rocas en láminas delgadas impregnadas con resinas coloreadas.

Los primeros en observar moldes al M.E.B. fueron Pittman y Duschatko (1970), los cuales realizaron a partir de ellos un estudio tridimensional del sistema poroso de diversas rocas. Otros estudios más recientes fueron los realizados por Gaida *et al.* (1973), Wardlaw (1976), Wardlaw y Taylor (1976), Wardlaw y Cassan (1978); estos últimos llegaron a la estimación del volumen total de poros mediante observaciones bidimensionales. En 1978 Walker realizó moldes de creta con una resina epoxy, observándolos al M.E.B. Swanson (1979) realizó porosimetrías con metal de Wood y obtuvo moldes del sistema poroso en este material.

En la actualidad entre los productos más utilizados, por su calidad y sencillez, se encuentran las resinas epoxídicas. En este trabajo se han seleccionado dos de estas resinas: Krautoxin 1452 (Krauto Ibérica, S. A.); densidad, 0,90 g./cm.<sup>3</sup>; viscosidad, 50-70 seg. (DIN). Estratil 2195 (Río Ródano); densidad, 1,12 g./cm.<sup>3</sup>; viscosidad, 2 poises (Drage).

Las impregnaciones de han realizado sobre distintas muestras rocosas paralelepédicas —aproximadamente de 5×2,5×1 cm.— de acuerdo con los procedimientos siguientes:

— Impregnación al vacío. Se introducen las muestras en un desecador y se someten a vacío ( $10^{-3}$  torr) durante, aproximadamente, 2 horas; posteriormente se introduce la resina sin

romper el vacío, y se mantiene esta situación durante otras 2 horas.

— Impregnación al vacío con presión. Se introducen las muestras en una célula de presión (fig. 1) y se realiza vacío durante 2 horas. A continuación se introduce la resina y se aplica una presión de 100 kg./cm.<sup>2</sup> durante 15 minutos.

Después de impregnadas las distintas muestras, y con el fin de obtener los moldes, se procedió a la disolución de su parte mineral. Dado que las rocas analizadas son calizas y dolomías muy puras, dicha disolución se ha realizado con HCl al 10%, manteniéndose el ataque 12 horas.

Se han realizado dos tipos de disolución: una «superficial» donde se ataca sólo una cara de la muestra; y otra más «completa», con disolución total de la parte sólida de la roca. En este último caso queda tan sólo el «esqueleto» correspondiente al espacio poroso de la muestra.

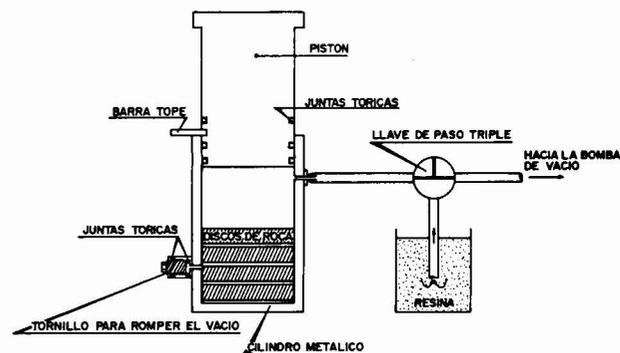


Fig. 1.—Esquema del sistema utilizado para la realización de las impregnaciones bajo presión.

### Control de las impregnaciones

Con el fin de comprobar el grado de relleno de los poros alcanzado, tanto para los distintos productos de impregnación como para las diferentes técnicas con las que se han realizado dichas impregnaciones, se ha analizado el sistema poroso resultante, mediante ensayos de porosimetría de inyección de mercurio.

Estos ensayos permiten conocer la distribución del volumen poroso de una roca en función del tamaño de acceso de sus poros. Su fundamento es la relación existente entre la presión de inyección ejercida y el radio de los poros que son invadidos por mercurio. El ensayo consiste en inyectar mercurio a presión y controlar el volumen de mercurio que se introduce en la roca para cada nivel de presión (Ordaz y Alonso, 1983; Alonso *et al.*, 1987).

Cuando se realiza una segunda inyección el mercurio introducido es menor, consecuencia de que parte de él queda irreversiblemente atrapado en el sistema poroso de la roca. De acuerdo con esto se considera un nuevo parámetro —«porosidad atrapada»— definido a partir del volumen de mercurio retenido por la roca después de la primera inyección. Debe tenerse en cuenta que este valor depende de varios factores, como son la configuración del sistema poroso y el ángulo de contacto sólido-mercurio, entre otros (Lowell y Shields, 1984).

El control de los productos y procedimientos de impregnación utilizados, se ha llevado a cabo sobre dos de las rocas estudiadas: dolomía de Boñar y caliza de Hontoria.

En la tabla 1 se presentan los valores de porosidad, tanto de las muestras sin impregnar como de las impregnadas, así como —en este último caso— las disminuciones de porosidad respecto a las muestras sin impregnar. También se indica la porosidad atrapada

Tabla 1.—Parámetros porométricos de las rocas estudiadas obtenidos mediante porosimetría de Hg.

Tipo rocoso	Preparación de la muestra	Porosidad (%)		Por. atrapada (%)	
		$n_p$	A	$n_{ap}$	B
Dolomía de Boñar	Sin impregnar	9,5	—	8,9	94
	Krautoxin al vacío	7,9	17	7,7	97
	Estratil al vacío	7,8	18	7,1	91
	Est. vacío+presión	2,8	70	2,8	100
Caliza de Hontoria	Sin impregnar	25,0	—	9,5	38
	Krautoxin al vacío	21,0	16	20,0	95
	Estratil al vacío	16,7	22	12,9	77
	Est. vacío+presión	11,0	55	7,6	69

$n_p$ =porosidad accesible al mercurio.

A=disminución de porosidad; con respecto a la  $n_p$  de la muestra sin impregnar.

$n_{ap}$ =porosidad atrapada.

B=porosidad atrapada en términos relativos:  $(n_{ap}/n_p) \times 100$ .

en términos absolutos y relativos. Es de señalar que ambas rocas son fundamentalmente microporosas (presentando abundantes poros con radios inferiores a  $7,5 \mu\text{m}$ ).

Las figuras 2 y 3 muestran, en cada uno de los dos tipos rocosos considerados, los histogramas de distribución de tamaño de poro de las muestras impregnadas junto a los del mismo tipo rocoso sin impregnar, para las diferentes impregnaciones realizadas.

En las muestras impregnadas con Krautoxin el porcentaje de poros de mayor radio disminuye, y aumenta el de los poros de menor radio (figs. 2a y 3a). Este hecho es mucho más acusado en las muestras de Hontoria —de mayor tamaño de poro— que en las de Boñar.

En el caso de las impregnaciones con Estratil la disminución de la porosidad es mayor, y ésta se produce de una manera más o menos uniforme en todo el espectro poroso. Dicha disminución es mucho más acusada en el caso de las impregnaciones al vacío con presión (figs. 2c y 3c) que en aquellas llevadas a cabo únicamente mediante vacío (figs. 2b y 3b).

En determinados casos, y en ambas rocas, se observa cómo la porosidad correspondiente a un determinado rango de radios de acceso de poro —normalmente los grandes— es mayor en las muestras sin impregnar que en las muestras impregnadas; esto puede ser debido a las heterogeneidades existentes en este tipo de rocas.

### Réplicas de látex

La obtención de réplicas de látex es, asimismo, de utilidad en el estudio de los espacios vacíos de las rocas. Este tipo de réplicas reproduce con gran fidelidad poros de superficies planas y pulidas de muestras rocosas, las cuales pueden ser examinadas posteriormente mediante microscopía electrónica de barrido (Neville, 1972; Montoto y Alonso, 1982).

Estas réplicas presentan la ventaja de su sencilla elaboración y manejabilidad, siendo fáciles de conservar debido a su gran elasticidad. Por otra parte, esta técnica permite la observación de réplicas sucesivas de superficies pulidas de una misma muestra, con lo cual puede llegar a obtenerse una cierta idea de su disposición tridimensional.

El procedimiento práctico de obtención de réplicas ha sido el siguiente: en primer lugar se prepara una superficie plana y pulida de la roca, y se humedece dicha superficie mediante un pincel con una solución acuosa a la que se ha añadido una pequeña cantidad de jabón. Posteriormente, y con la ayuda de un palillo se extiende una fina capa de látex y se espera a que seque. Una vez seca esta

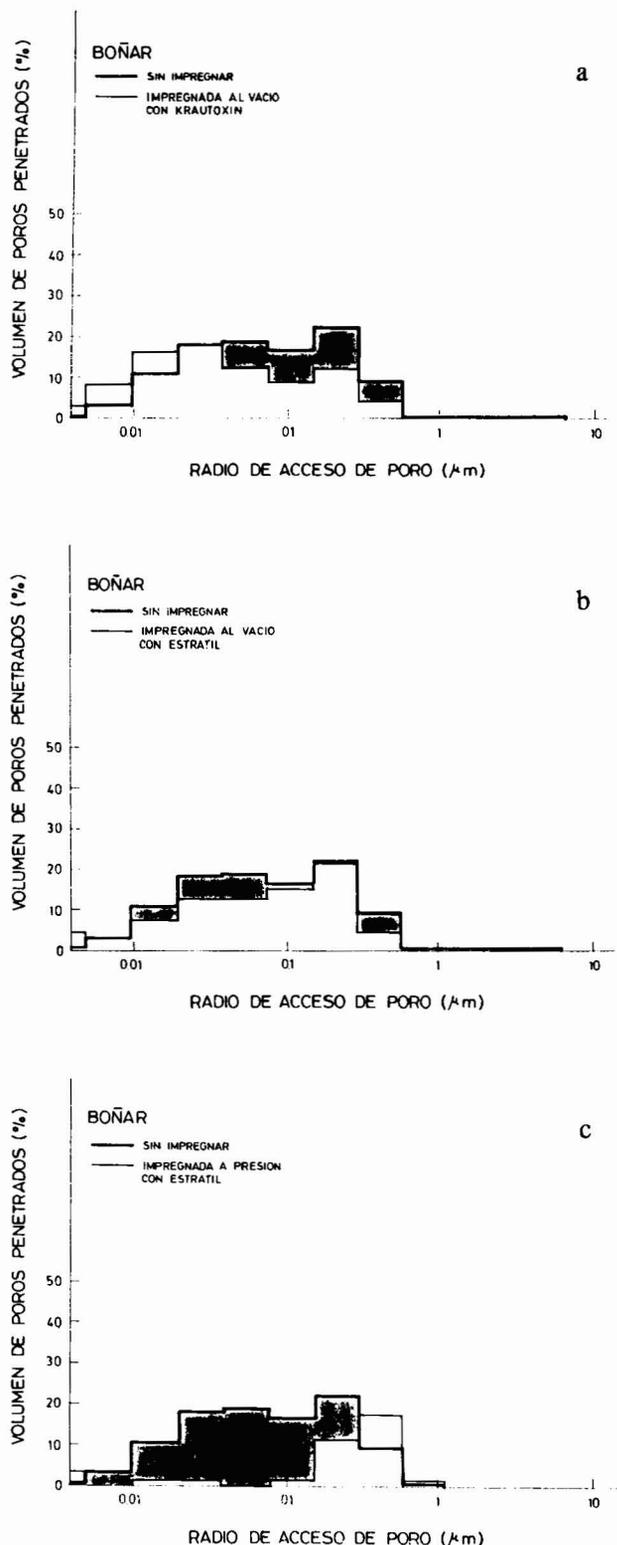


Fig. 2.—Histogramas de distribución del tamaño de los poros, en la dolomía de Boñar, correspondientes a muestras impregnadas con distintos productos y mediante diferentes métodos: a, b y c, junto al de la roca sin impregnar.

primera capa se van superponiendo capas sucesivas de látex con el fin de darle consistencia y hacer más fácil su manejo. Finalmente se separa el látex de la muestra, y se dispone de un molde de la superficie de la roca, que puede metalizarse y ser observado al M.E.B.

## Resultados

### Boñar

En las figuras 4 y 5, puede compararse la superficie de una muestra de roca, observada directamente al microscopio, y otra correspondiente a una réplica de látex. Se constata la mejor definición de los poros a partir de la réplica, pudiendo atribuirse este hecho, fundamentalmente, a que los espacios vacíos se presentan en forma de relieves positivos. En particular, cabe señalar que en la réplica de látex se presentan mejor definidos los microporos.

Los moldes de resina, sin embargo, son los que mejor reflejan la complejidad de la configuración del sistema poroso. En la figura 6 se muestra un molde de resina, incluyendo también su borde, lo que permite observar el contraste entre la resina inatacada por el ácido y los vacíos dejados por los minerales. La figura 7, correspondiente a un molde obtenido por ataque superficial de la roca, muestra más en detalle la morfología del sistema poroso.

En general, cabe destacar la abundante porosidad que presenta esta roca, la compleja estructura «esquelética» de su sistema poroso, el alto grado de interconexión entre los poros y la morfología «laminar» o «planar» de los conductos o canales de conexión, lo que confiere al sistema poroso de la roca un aspecto marcadamente «esponjoso». Este modelo se aleja sustancialmente del tradicional, excesivamente esquemático, en el que los poros «equidimensionales» se hallan unidos por conductos «tubulares».

### Hontoria

Esta roca presenta notables macroporos, ya observables a simple vista, resultando más difíciles de detectar los microporos (fig. 8). Las réplicas de látex reflejan claramente tanto los macroporos como los microporos (fig. 9), presentándose asimismo diferenciados por su tamaño y por su disposición textural: los macroporos acostumbran a ser intergranulares y los microporos intragranulares.

Los moldes de resina proporcionan una visión mucho más precisa de la morfología del sistema poroso, en particular de los microporos y sus interconexiones. Puede observarse cómo la microporosidad se dispone formando finas películas entre los pequeños granos de calcita (micrita), con una morfología planar mucho más fina y mejor definida que en el caso anterior (fig. 10). Algunas muestras presentan cierta

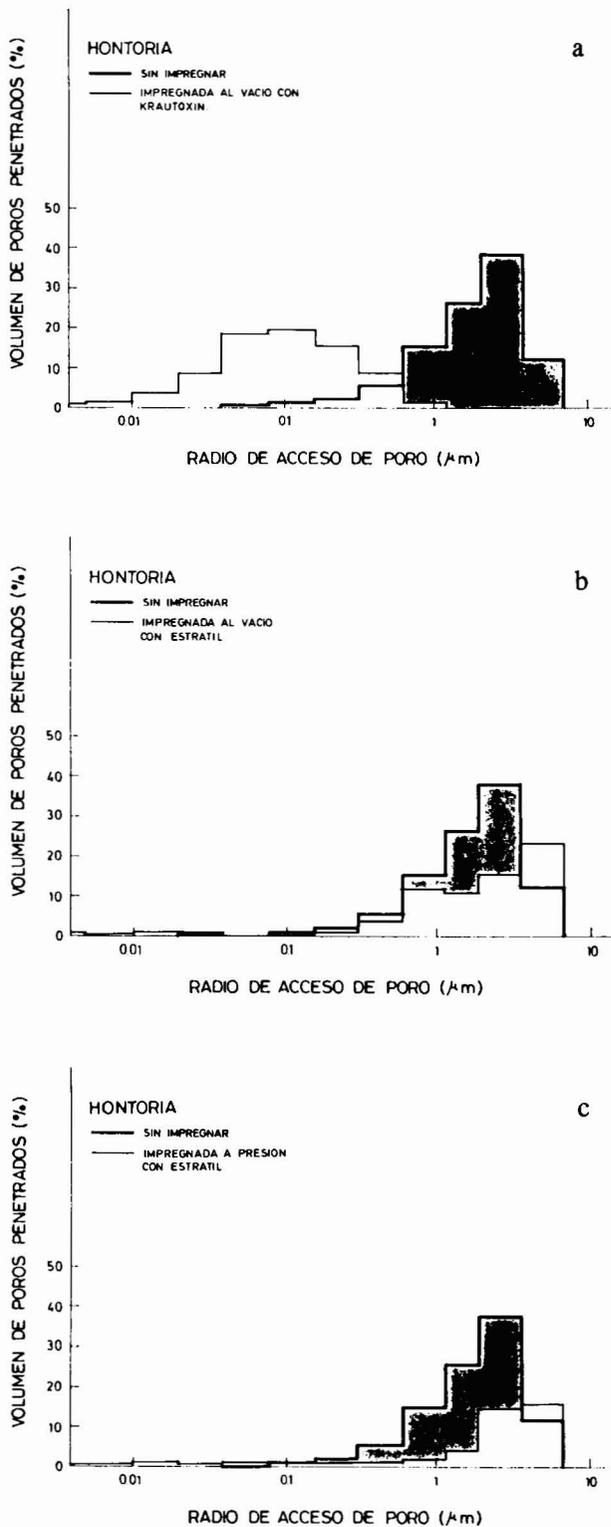


Fig. 3.—Histogramas de distribución del tamaño de accesos de los poros para la caliza de Hontoria, comparando la roca sin impregnar con muestras impregnadas con distintos productos y métodos: a, b y c.

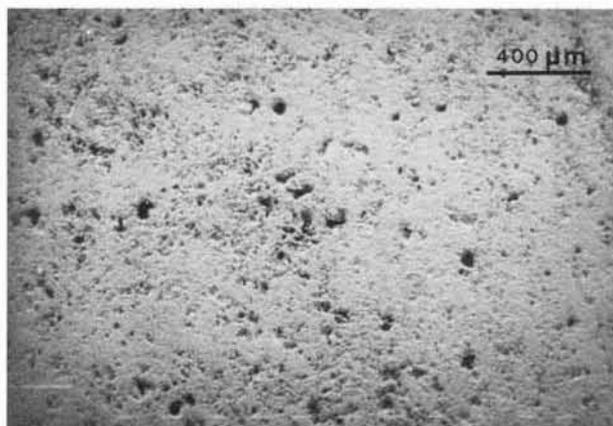


Fig. 4.—Aspecto general de la dolomía de Boñar en superficie pulida. Pueden observarse poros de diferentes tamaños (inferiores a  $100\ \mu\text{m}$ ). (M.E.B.).

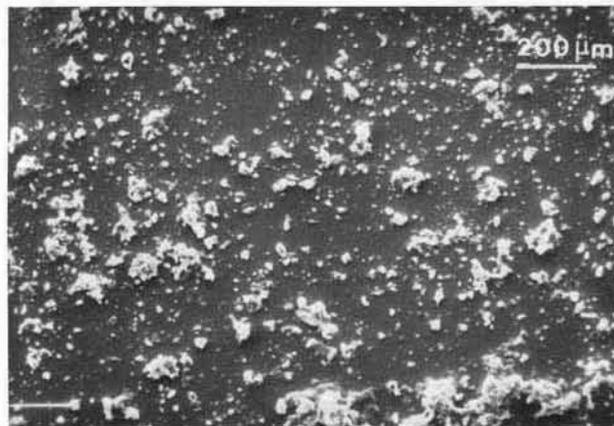


Fig. 5.—Réplica de látex realizada sobre una superficie pulida de la dolomía de Boñar. Nótese la mejor definición de los poros debido al relieve positivo con que se presentan. (M.E.B.).

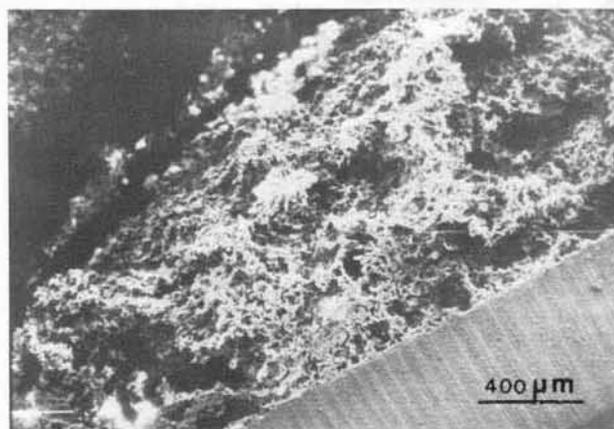


Fig. 6.—Molde de resina realizado en la dolomía de Boñar. La esquina inferior derecha corresponde a la resina del borde (M.E.B.).

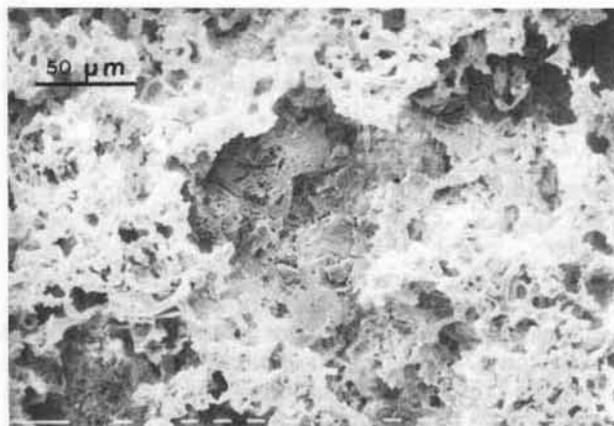


Fig. 7.—Molde de resina correspondiente a la dolomía de Boñar. Se observa la diferencia entre la zona más superficial y la parte más profunda a la que no ha llegado la disolución y en la que se aprecia algún mineral. (M.E.B.).

bimodalidad de tamaño de poros, conservando ambos tamaños similar morfología (fig. 11).

En resumen, esta roca presenta una importante proporción de macroporos, que se encuentran conectados por conductos planares de pequeño diámetro, de acuerdo con los datos suministrados por los ensayos de porosimetría de inyección de mercurio.

### Sevilla

Cabe señalar, de entrada, que esta roca presenta una abundante macroporosidad (10,2%), localizada en posiciones intersticiales respecto a los granos (porosidad intergranular); así como una microporosidad (7,4%),

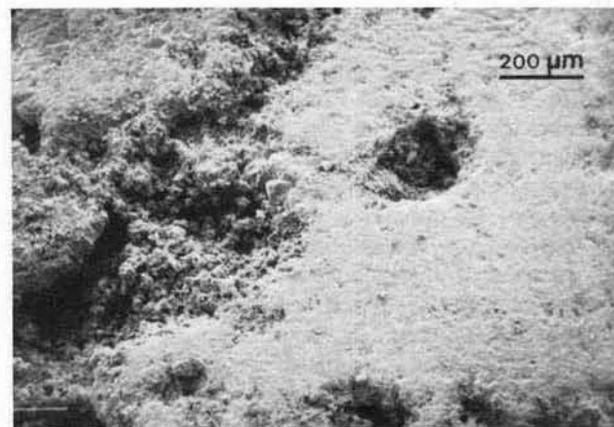


Fig. 8.—Aspecto general de la caliza de Hontoria. Destaca la gran cantidad de poros que presenta, así como el gran tamaño de algunos de ellos (alrededor de  $400\ \mu\text{m}$ ). (M.E.B.).

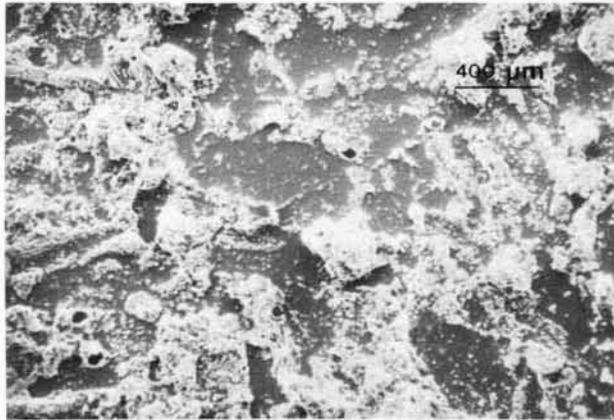


Fig. 9.—Réplica de látex realizada sobre una superficie pulida de caliza de Hontoria, en el que se observa la abundante porosidad que presenta esta roca. (M.E.B.).

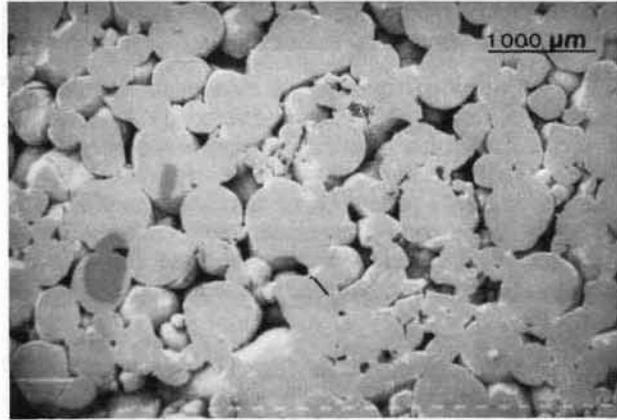


Fig. 12.—Aspecto de una superficie pulida de la caliza de Sevilla. Se observan con nitidez los macroporos intergranulares. (M.E.B.).

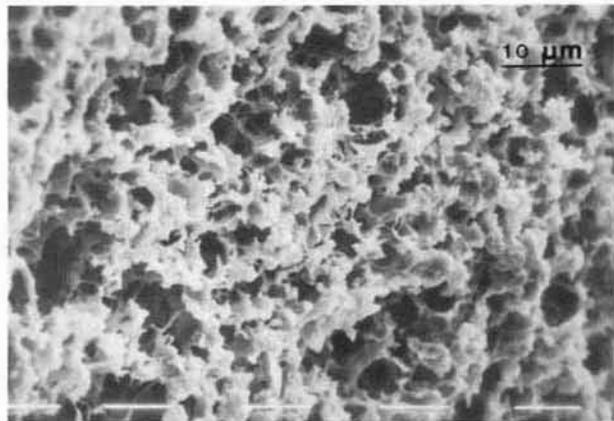


Fig. 10.—Detalle de un molde de resina realizado en la caliza de Hontoria. Nótese la estructura «esponjosa» y muy interconectada del sistema poroso. (M.E.B.).

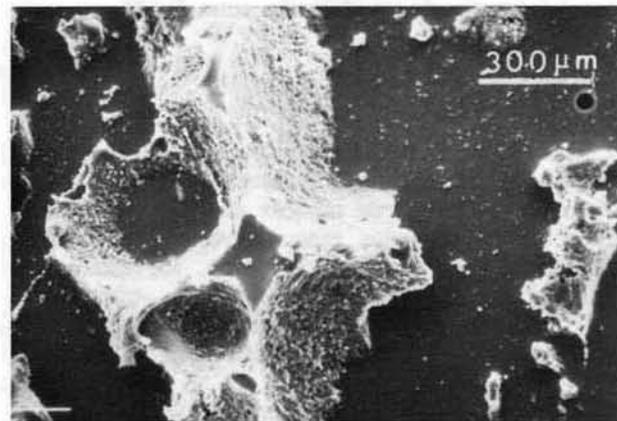


Fig. 13.—Réplica en látex realizada sobre una superficie pulida de Sevilla, resaltan la forma y rugosidad de las paredes de los macroporos. (M.E.B.).

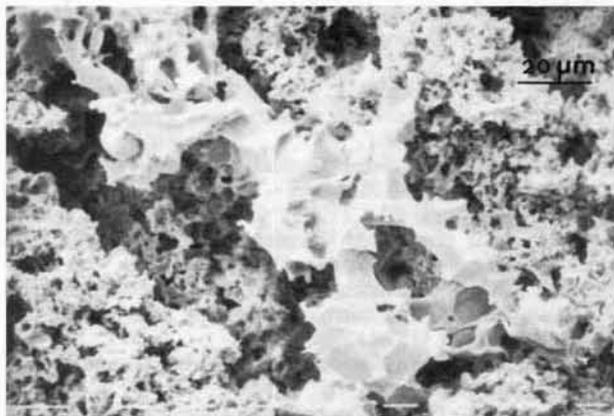


Fig. 11.—Otro detalle de un molde de resina de la caliza de Hontoria correspondiente a poros situados en una zona con cristales de mayor tamaño. (M.E.B.).

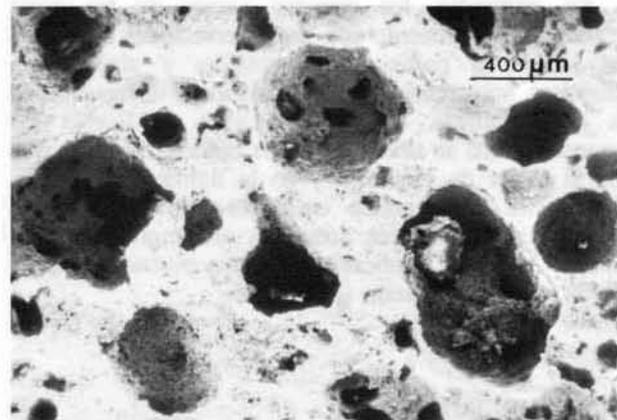


Fig. 14.—Molde de resina realizado en la caliza de Sevilla. Se observan claramente las zonas ocupadas previamente por los granos, así como los espacios vacíos impregnados, y sus interconexiones. (M.E.B.).

asociada a la micrita que constituye la mayor parte de los granos (porosidad matricial).

Los macroporos quedan ya claramente puestos de manifiesto en la observación directa de la roca, al aparecer éstos bien definidos en posiciones intergranulares (fig. 12). Sin embargo, las réplicas de látex reflejan de forma precisa las características morfológicas de estos macroporos, mostrando en ocasiones determinados detalles, como la rugosidad de sus paredes, que pueden pasar desapercibidas con otros métodos (fig. 13).

En los moldes de resina (fig. 14), los macroporos aparecen nuevamente bien diferenciados, sin que puedan verse claramente reflejados los microporos. Estos, igual que ocurría para las réplicas de látex, únicamente se manifiestan en las paredes de los grandes poros. Destaca, asimismo, el grado de comunicación entre poros (números de coordinación entre 4 y 8).

## Conclusiones

Las observaciones directas al microscopio electrónico de barrido de superficies pulidas de roca, así como las correspondientes de réplicas de látex, suministran información sobre los espacios vacíos de la roca, comunicados o no. Por otro lado, los moldes de resina tienden a reflejar la configuración «tridimensional» del sistema poroso comunicado, aportando interesantes datos sobre la conectividad entre los poros.

De todo lo anterior se deduce que el uso combinado de las citadas técnicas —dadas las limitaciones que presentan cada una de ellas por separado— es de gran interés en el estudio de la compleja estructura del sistema poroso de las rocas carbonatadas.

En particular, los espacios vacíos de las rocas estudiadas, de acuerdo con las observaciones realizadas al M.E.B. a partir de sus moldes y réplicas, se disponen mayoritariamente en posiciones intergranulares e intercristalinas. Así, en la caliza de Sevilla los grandes poros se sitúan entre los oolitos, mientras que en la caliza de Hontoria y en la dolomía de Boñar, los vacíos se disponen entre los cristales. En este último caso, los poros presentan una morfología «laminar», lo que confiere al sistema poroso, en conjunto, un cierto aspecto «esponjoso».

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica (CAYCIT, Proyecto 2573/83); y a la Fundación Ramón Areces, por el soporte económico de esta investigación.

## Referencias

- Alonso, F. J.; Eibert, R. M. y Ordaz, J. (1987): Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Bol. Geol. y Min.*, 98, 226-237.
- Castro, E. de (1977): Determination de la porosimétrie et de la surface spécifique des pierres pour des essais de suction. *Memória 390, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 16 págs.
- Choquette, P. W. y Pray, L. C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 54, 207-250.
- Eibert, R. M.; Ordaz, J.; Alonso, F. J. y Alba, J. M. (1981): Petrographic and physical study of the building stones from León cathedral (Spain). *The Conservation of Stone II, International Symposium on Deterioration and Conservation of Stone*, October 1981. Pub. Centro Conservazione Sculture, all'Aperto, Bolonia, 285-298.
- Etienne, J. (1963): Rock impregnation by colored resins for studying porosity in thin section. *Inst. Français du Pétrole Rev.*, 18, 611-623.
- Gaida, K. M.; Rühl, W. y Zimmerle, W. (1973): Rasterelektronen-mikroskopische untersuchungen des porenraumes von sandsteinen. *Erdoel-Erdgas Zeitschrift*, 79, 336-343.
- Gillot, J. E. (1969): Study of the fabric of fine-grained sediments with the scanning electron microscope. *J. Sed. Petrol.*, 39,90-105.
- IGME (1985): Mármoles españoles. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos Minerales.
- Imbt, C. W. y Ellison, P. S. (1946): Porosity in limestone and dolomite petroleum reservoirs. *Drilling and Production Practice Amer. Petroleum Institute*, 364-372.
- Lowell, S. y Shields, J. E. (1984): Power surface area and porosity. 2 ed. B. Scarlett Ed., Chapman and Hall, 234 págs.
- Montoto, M. y Alonso, J. (1982): Pulimento de áridos carbonatados en capas de rodadura. Parte II: Evolución topográfica. *Bol. Geol. y Min.*, 93, 338-345.
- Neville, G. (1972): Replica techniques for the study of roadstones by scanning electron microscopy. *Transport and Road Res. Lab.*, Crowthorne, Berkshire (U.K.). Report 445. 23 págs.
- Nissen, H. U. y Wessicker, R. (1970): Observation of superfine fabrics with the scanning microscope. *Experimental and Natural Rock Deformation*. Paulitsch Ed. New York, 263-271.
- Nuss, W. F. y Whiting, R. L. (1947): Techniques for reproducing rock porespace. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 31, 2044-2049.
- Nutting, P. G. (1929): Some physical problems in oil recovery. *Oil and Gas Journal*, 28, 44-45.
- Ordaz, J. y Alonso, F. J. (1983): Caracterización del sistema poroso de la arenisca de Villamayor (Salamanca). *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 13, 83-89.
- Pittman, E. D. y Duschatko, R. W. (1970): Use of pore casts and scanning electron microscope to study pore geometry. *J. Sed. Petrol.*, 40, 1153-1157.
- Ryder, H. M. (1949): Character of pores in oil sand. L. W. LeRoy and H. M. Grain, Ed., 583-594.
- Sarkisyan, S. G. (1971): Application of the scanning electron microscope in the investigation of oil and gas reservoir Rocks. *J. Sed. Petrol.*, 41, 289-282.
- Swanson, B. F. (1979): Visualizing pores and non wetting phase in porous rocks. *J. Petrol. Technol.*, 31, 10-18.

- Timur, A.; Hemkins, W. B. y Weinbrandt, R. M. (1971): Scanning electron microscope of pore system in rock. *J. Geophys Res.*, 76, 4932-4948.
- Waldo, M. B. y Yuster, S. T. (1937): Method of impregnating porous materials to facilitate pore studies. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 21, 259-267.
- Walker, B. M. (1978): Chalk pore geometry using resin pore casts. Geo Abstracts, Norwich (England). *Scan. Elec. Micros. in the Study of Sediment*. Proc. Sym., W. B. Whalley Ed. Swansea, 17-27.
- Wardlaw, N. C. (1976): Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 60, 245-257.
- Wardlaw, N. C. y Cassan, J. P. (1978): Estimation of recovery efficiency by visual observation of pore system in reservoir rocks. *Bull. Canadian Petroleum Geol.*, 26, 572-585.
- Wardlaw, N. C. y Taylor, R. P. (1976): Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behavior in reservoir rocks. *Bull. Canadian Petroleum Geol.*, 24, 225-262.
- Weinbrandt, R. M. y Fatt, I. (1969): A scanning electron microscopy study of the pore structure of sandstone. *J. Petrol. Technol.*, 543-548.
- Winsaucer, W. O.; Shearin, H. M., jr.; Masson, P. H. y Williams, M. (1952): Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 36, 253-277.

Recibido el 19 de enero de 1988  
Aceptado el 1 de junio de 1988