

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA POROSO DE LA ARENISCA DE VILLAMAYOR (SALAMANCA)

J. ORDAZ Y F. J. ALONSO

TRABAJOS DE GEOLOGIA Ordaz, J. y Alonso, F. J. (1983).—Características del sistema poroso de la arenisca de Villamayor (Salamanca). *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 13, 83-92.



El sistema poroso de la arenisca de Villamayor se estudia mediante observaciones microscópicas y ensayos porosimétricos por inyección de mercurio. La interrelación del espectro de distribución de tamaños de los poros con determinadas propiedades físicas, asociadas al paso de fluidos (absorción de agua, capilaridad) a través de la roca, es puesta de manifiesto. La influencia de la porosidad sobre la alterabilidad de esta arenisca (como piedra de construcción), y su dependencia de algunos aspectos petrográficos (especialmente el contenido en filosilicatos), son también tenidas en cuenta.

Pore system of Villamayor sandstone is studied by means of microscopic observations and mercury-injection porosimetric tests. Relationship of pore-size distribution range and certain physical properties, associated with fluid flow (water-absorption, capillarity) through rock, is pointed out. Influence of porosity on weatherability of this sandstone, as building stone, and their dependence on some petrographic aspects (especially phyllosilicate content) are also taken into account.

J. Ordez y F. J. Alonso, Departamento de Petrología, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo, España. Manuscrito recibido el 15 de abril de 1983.

La arenisca de Villamayor se ha venido utilizando, desde hace siglos, como material de construcción. Su aspecto agradable, patinado con el tiempo, y la facilidad de labra de la «piedra franca de Villamayor», han contribuido a proporcionar una especial vistosidad a los monumentos y edificios históricos salmantinos. Sin embargo, estas areniscas, puestas en obra, y en contacto prolongado con los agentes de la intemperie, muestran una indeclinable tendencia a deteriorarse bajo diversas formas de alteración (Ordaz, 1982). La durabilidad de este material rocoso está condicionada, intrínsecamente, por la especial configuración de la porosidad. Además, la abundancia, geometría y grado de conexión entre los poros son factores significativos que controlan el movimiento de fluidos a través del interior de la roca; por lo que el conocimiento, cualitativo y cuantitativo, del sistema poroso de la arenisca de Villamayor es de gran importancia para una evaluación e interpretación tanto de sus características físicas como de su alterabilidad potencial.

Para ello se han realizado, en el presente trabajo, observaciones directas de poros mediante técnicas microscópicas, así como mediciones

del volumen y distribución de sus tamaños utilizando la porosimetría por inyección de mercurio. Las relaciones petrofísicas entre las características de la porosidad de esta arenisca y determinados aspectos texturales y de propiedades físicas (sobre todo las relaciones con la absorción de agua) son, asimismo, objeto de atención en el trabajo.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Material seleccionado

Los bancos de arenisca de Villamayor se sitúan geológicamente en los terrenos paleógenos, de carácter detrítico de facies continental, del área de Salamanca (Arribas y Jiménez, 1972). Forman estratos horizontales o subhorizontales, de poca potencia, por lo general, con intercalaciones de conglomerados, en tránsito a menudo graduales, y recubiertos por niveles arcillo-areniscosos o conglomeráticos.

Los bloques para la obtención de muestras fueron extraídos de la cantera en explotación denominada «Sanchón», sita en el término municipal de Villamayor. Los bloques seleccionados pueden considerarse como homogéneos y

representativos de la «piedra de Villamayor» de calidad, empleada tradicionalmente en la construcción y restauración de monumentos.

Mineralogía

La arenisca de Villamayor está formada, fundamentalmente, por cuarzo, feldespatos y filosilicatos. Los porcentajes relativos de los grupos minerales constituyentes se encuadran dentro de las areniscas arcósicas, pudiendo variar ligeramente según las distintas muestras estudiadas. El aspecto general al microscopio de la arenisca se muestra en la Fig. 1 A.

El cuarzo (55-70 %) aparece en granos más o menos angulosos, bastante limpios, en ocasiones con extinción ondulante.

Los feldespatos (10-15 %) son mayoritariamente feldespatos potásicos (ortosa, microclina), y en menor proporción plagioclasas. Los feldespatos se hallan medianamente alterados, excepto algunas plagioclasas que se encuentran en un avanzado grado de alteración.

Los filosilicatos (10-20 %) forman el armazón del cemento de la roca y ocupan posiciones intergranulares, intersticiales (Fig. 1 B); o bien forman una fina película de recubrimiento continua alrededor de los granos de la fracción arenosa (Fig. 1 C y D); modos de presentación todos ellos frecuentes en las arcillas autigénicas de las areniscas (Wilson y Pittman, 1977).

Al microscopio electrónico de barrido (SEM) los filosilicatos adquieren morfologías de diversos tipos, predominando los agregados fibrosos o filamentosos, entrelazados, muy llamativos, unidos a los granos de cuarzo y feldespato (Fig. 1 E). De los datos obtenidos a partir de los análisis de difracción de Rayos X, se deduce que más de la mitad de los filosilicatos son illitas e interstratificados illita-montomorillonita. En menor proporción se encuentra clorita, montomorillonita y caolinita.

Los fragmentos líticos (< 10 %) son de diversa índole, generalmente constituidos por

agregados de cuarzo policristalinos (seguramente procedentes de cuarcitas o rocas graníticas); agregados microcristalinos (chert) y fragmentos de rocas variadas (pizarras, esquistos, filitas, limolitas, etc.). La relación feldespatos-fragmentos líticos fluctúa entre 4-2 : 1.

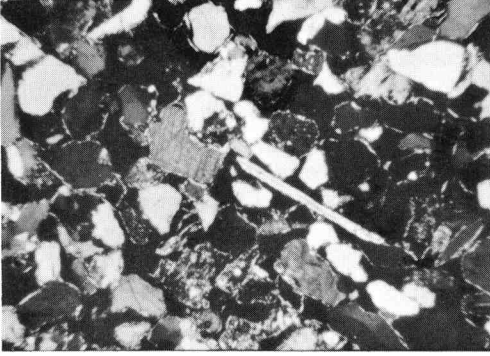
Además de los mencionados minerales esenciales se observan, en esta arenisca, minerales accesorios, muy variados en cuanto a especies minerales, aunque cuantitativamente poco relevantes, generalmente no superiores al 1 %. Entre los accesorios más comunes se pueden citar: moscovita, granate, epidota, andalucita, turmalina, zircón, opacos, etc... Oxidos e hidróxidos de hierro acostumbran a teñir los granos de cuarzo y feldespato y, en ocasiones, a concentrarse en determinadas zonas intersticiales, junto a los minerales arcillosos, formando pequeños nódulos ferruginoso-arcillosos.

Ni en los análisis difractométricos ni en las observaciones microscópicas se detectó la presencia de calcita, dolomita o yeso.

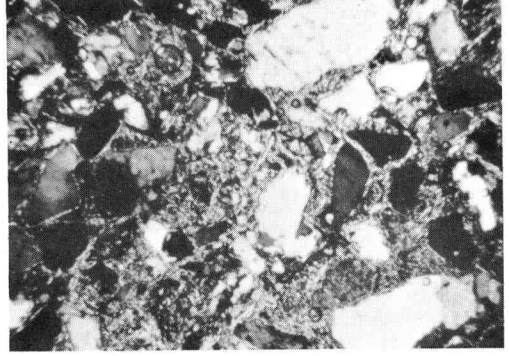
a) *Tamaño y forma de los granos.*—El tamaño medio de los granos de las muestras de arenisca seleccionadas corresponde al de arena fina (alrededor de 0,2 mm). No obstante, existen ligeras variaciones entre unas muestras y otras, pudiéndose establecer dos grupos cuyos diámetros medios de grano se sitúan en 0,25 mm (muestras tipo A) y 0,18 mm (muestras tipo B). Estos datos fueron calculados a partir de granulometrías realizadas por tamizaje, cuyas correspondientes curvas de distribución de tamaños de grano se muestran en la Fig. 2. Como puede observarse la distribución de los tamaños es, en ambas poblaciones, muy semejante, aunque ligeramente desplazadas en cuanto a valores absolutos. Ambas exhiben un buen calibrado y su distribución es simétrica.

La forma de los granos es variable, por lo general, predominando los de carácter anguloso y subanguloso. Los más angulosos son los de cuarzo, y los menos algunos fragmentos líticos

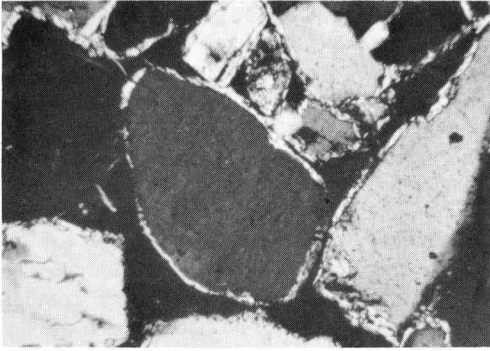
Fig. 1.—A) Aspecto de la textura de la arenisca de Villamayor. Obsérvese la abundancia de huecos (en negro) que corresponden a los espacios porosos. N.C. \times 20. B) Aspecto de la acumulación de minerales arcillosos ocupando posiciones intersticiales. N.C. \times 30. C) Filosilicatos formando películas de recubrimiento (*pore lining*) alrededor de los granos minerales. N.C. \times 200. D) Detalle de la superficie de un grano mineral tapizado por un agregado filamentosos de illita. SEM (1 marcador = 1 μ m). E) Detalle del entrelazamiento de los filamentos de illita. SEM (1 marcador = 10 μ m). F) Aspecto de la arenisca de Villamayor (superficie de fractura) al SEM. Obsérvese la abundancia de espacios porosos (1 marcador = 100 μ m). G) Aspecto de los canales de entrada o acceso de los poros, con formación de «puentes» de filosilicato entre ellos. SEM (1 marcador = 10 μ m). H) Otro aspecto de los conductos porosos. Nótese el elevado grado de interconectividad. SEM (1 marcador = 10 μ m).



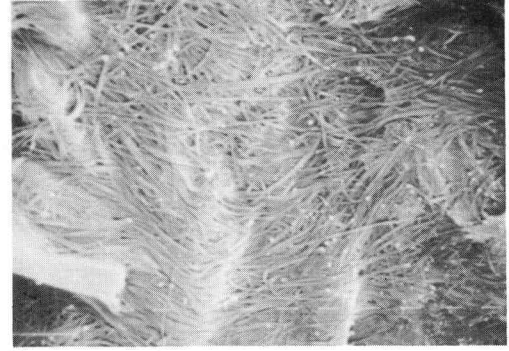
A



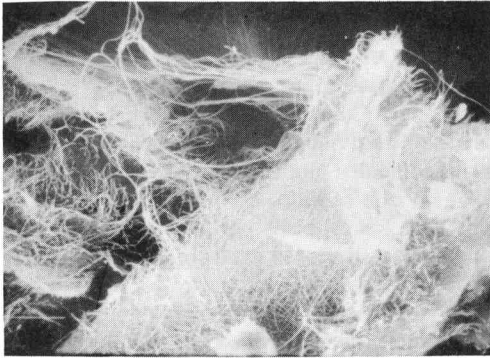
B



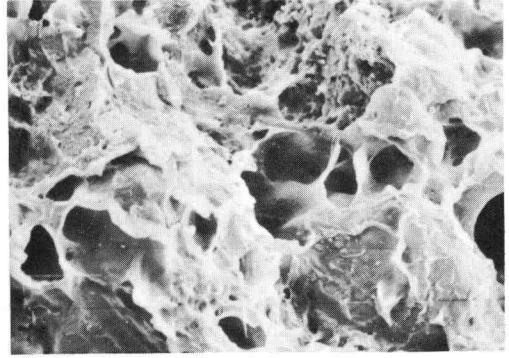
C



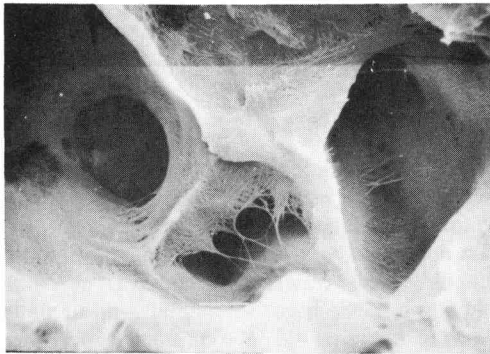
D



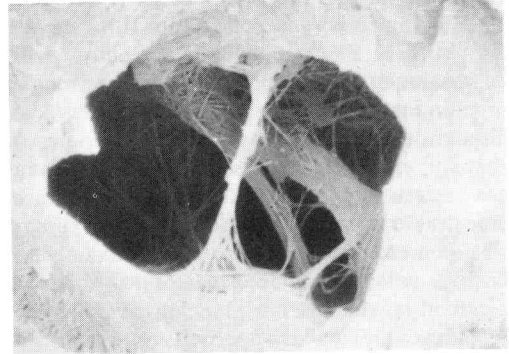
E



F



G



H

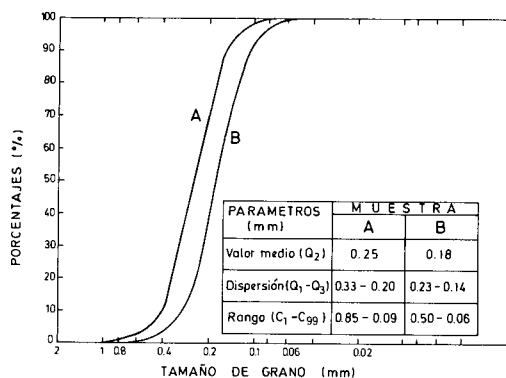


Fig. 2.-Curvas granulométricas de la arenisca de Villamayor, obtenidas por tamizaje.

y minerales pesados, que suelen presentar bordes más subredondeados o redondeados. La esfericidad de los granos es de tipo intermedio, siendo muy baja en algunos de ellos (láminas de moscovita), y preferentemente alta en los fragmentos rocosos y en los componentes accesorios. La fábrica no presenta orientación granular manifiesta.

Los contactos entre los granos son, generalmente, de tipo tangente (puntual) o largo. También pueden observarse en algunas muestras contactos completos y, más aisladamente, pequeños granos libres (flotantes, fijados por arcillas cementantes).

b) *Poros*.—Uno de los rasgos texturales más característicos de estas areniscas es la configuración de sus espacios vacíos (poros, en general). La observación directa de los espacios porosos se llevó a cabo mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. Para el primer caso, se utilizaron láminas delgadas impregnadas de resina epoxy coloreada, al objeto de hacer resaltar los espacios vacíos. Sin embargo, gran parte de los poros, sobre todo los más pequeños, quedan fuera del campo de aumentos usual del microscopio polarizante. En este sentido, el SEM, dada su gama de aumentos, poder de resolución y profundidad de campo, constituye un instrumento idóneo para la observación directa del sistema poroso de los materiales rocosos y, en especial, de su geometría y relaciones estereológicas. Para ello se prepararon muestras con superficies de fractura y superficies de corte, estas últimas realizadas con sierra de baja velocidad y deformación, al objeto de evitar al máximo la introducción de defectos o modificaciones en las superficies examinadas.

La morfología de los poros es variada, presentándose en formas aproximadamente equidimensionales, con contornos irregulares, subagudos o subredondeados, ocupando los espacios intergranulares (Fig. 1 F). Generalmente las paredes de los poros aparecen recubiertas por los filosilicatos de tipo illita que tapizan los granos minerales y que frecuentemente forman entrelazamientos de largos filamentos, los cuales rellenan parcialmente los espacios porosos intersticiales, estableciendo, en ocasiones, delgados «puentes» (*pore bridging*) entre ellos (Neasham, 1977) (Fig. 1 G y H). Este particular hábito cristalográfico de la illita hace que se formen tupidas «mallás», de elevada superficie específica, que tienden a subdividir los espacios porosos en gran número de pequeños canalículos; con lo que de este modo, se fomenta la densidad de microporos, a la vez que su anfractuosidad (tortuosidad) se ve también sensiblemente incrementada (Stalder, 1973; Keighin, 1980).

Tanto los macroporos (radio de entrada $> 7 \mu\text{m}$), como los microporos (radio de entrada $> 7 \mu\text{m}$) aparecen generalmente comunicados entre sí, a través de conductos o canales de secciones aproximadamente tubulares, de pequeño diámetro, formando una red o trama tridimensional de espacios porosos intercomunicados de evidente intrincación. Esta conectividad del sistema de poros ha sido expresada (Wardlaw y Cassan, 1978) en base a un «número de coordinación», correspondiente al número de canales que conectan un poro determinado. En este sentido, el «número de coordinación» para los espacios porosos de las muestras estudiadas es bastante variable, aun cuando poros con 4-6 conexiones con otros espacios porosos no son raros; pudiendo esperarse, en realidad, números de coordinación superiores si se atiende a la estructura tridimensional del sistema poroso que, sobre superficie planas de roca, no puede ser visualizada la mayoría de las veces en su total integridad y complejidad.

PROPIEDADES FÍSICAS

Se midieron algunas propiedades físicas relacionadas con la estructura porosa y el paso de fluidos por el interior de las areniscas.

La *porosidad total* n , o relación entre el volumen de vacíos (intercomunicados o no) y el volumen total de roca, se calculó a partir de la densidad aparente de la roca seca y del peso

TABLA I.—Propiedades físicas de la arenisca de Villamayor

| | Muestras tipo A | Muestras tipo B | Promedio |
|---------------------------------------|---|--|---|
| Porosidad (total), n | 32,3 % | 34,1 % | 33,2 % |
| Cont. en humedad de saturación, i_s | 17,2 % | 19,6 % | 18,4 % |
| Coef. de capilaridad, C | 78 Kg/m ² min ^{0,5} | 157 Kg/m ² min ^{0,5} | 117 Kg/m ² min ^{0,5} |
| Coef. de penetración A | 4×10^{-3} m/min ^{0,5} | 9×10^{-3} m/min ^{0,5} | $6,5 \times 10^{-3}$ m/min ^{0,5} |

específico de los granos minerales. Los resultados obtenidos, junto con el resto de propiedades medidas, se muestran en la Tabla I.

El contenido en humedad de saturación i_s , se midió por inmersión libre en agua de las muestras durante ocho semanas, tiempo considerado suficiente para alcanzar una saturación prácticamente completa. (Más del 70 % del agua absorbida lo fue, sin embargo, en las primeras 24 horas de inmersión). Para la medición del coeficiente de capilaridad C , se siguió el «ensayo francés», descrito por Mamillan (1981). El coeficiente de capilaridad viene dado por:

$$C = M/S t^{0,5}$$

siendo M la masa de agua absorbida (Kg); S , la superficie de la probeta ensayada (m²); y t el tiempo (min).

La ascensión capilar viene caracterizada por el coeficiente de penetración A , (Vos, 1976):

$$A = X t^{0,5}$$

en donde X es la altura (m) del agua penetrada por capilaridad en la probeta en un tiempo t (min).

Es de destacar que la ascensión capilar alcanzó, en las primeras 24 horas, una altura mínima de 7 cm en todas las probetas ensayadas, siendo la máxima, para este mismo intervalo de tiempo, en una de las probetas del tipo B, de 21 cm.

POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

Fundamentos

El principio físico en el que se basa la porosimetría por inyección de mercurio radica en que los líquidos que forman ángulos de contacto con superficies sólidas de más de 90° (es decir, los que no mojan) no pueden entrar en los pequeños poros a menos que la presión de inyección exceda la presión capilar. Cuanto mayor

sea la fuerza aplicada, más pequeños serán los poros que puedan ser penetrados por el líquido.

En un capilar de sección circular y radio r , la fuerza tendente a empujar el líquido fuera del capilar es: $2 \pi r \sigma \cos \alpha$, siendo α el ángulo de contacto. La presión externa generada por la presión de inyección p será $\pi r^2 p$. En el equilibrio, estas dos fuerzas opuestas son iguales: $2 \pi r \sigma \cos \alpha = \pi r^2 p$, de donde (ecuación de Washburn):

$$r = 2 \sigma \cos \alpha / p$$

es decir, que el radio de los poros es inversamente proporcional a la presión aplicada.

Utilizando mercurio como líquido penetrante, con una tensión superficial media de 480 dinas/cm (a 25°C es de 484,2 dinas/cm); un ángulo de contacto medio del mercurio sobre superficies minerales silicatadas, experimentalmente deducido, de 141,3°; y suponiendo los poros cilíndricos, se obtiene en la práctica, la siguiente relación:

$$r = 7,5/p \quad (1)$$

en la que los radios se expresan en micras y las presiones en Kg/cm².

En el ensayo porosimétrico, pues, se inyecta mercurio a presión y se registra el volumen de mercurio penetrado en cada nivel de presión, lo cual es equivalente a medir la cantidad de espacios abiertos para cada nivel de tamaño de dichos espacios porosos.

En cualquier caso, admitiendo que la forma de los poros y la naturaleza de sus superficies sea relativamente semejante, para una muestra dada, la relación presión/radio de poro puede presentar cierto desplazamiento en valor absoluto, pero la distribución de tamaños es correcta desde el punto de vista relativo.

Ha de tenerse en cuenta, no obstante, que lo que se determina realmente es el tamaño de la parte más estrecha de los espacios abiertos de los poros; o, dicho de otra manera, el radio de los conductos o canales de acceso a los poros

más ensanchados. Una posible limitación del método es que no todos los poros logren ser invadidos por el mercurio, dado que puedan estar «escudados» por otros poros (conductos) más pequeños en los que la presión no se ha sobrepasado.

Equipo instrumental

El equipo utilizado es un porosímetro de mercurio marca Carlo Erba (Serie 200), completado con la correspondiente unidad para el llenado, al vacío, de los dilatómetros en los que se introduce la muestra rocosa. Los datos de presión y desplazamiento del mercurio son registrados numéricamente mediante un módulo de transformación con impresora, y gráficamente en un registro X-Y.

La unidad de llenado de los dilatómetros permite obtener la curva porosimétrica comprendida entre 70 μm y 7 μm de radio. Para el porosímetro, propiamente dicho, el rango de presiones se extiende de 1 a 2.000 atmósferas, siendo el espectro de tamaños de microsporos explorado de 7 μm a 0,0037 μm .

El porosímetro dispone de un temporizador (*delay*), o sistema de retardo variable que demora la puesta en marcha de la bomba de presión, de forma que dé tiempo a que se llenen totalmente los espacios abiertos cuyos accesos presenten considerables estrangulamientos. De esta manera se garantiza un mejor equilibrio y una buena correlación entre la presión ejercida y el correspondiente tamaño deducido.

Ensayos

Los ensayos se realizaron con probetas prismáticas de unos 2,5 gr de peso, previamente secadas y pesadas. Una vez colocada en el dilatómetro la probeta fue sometida al vacío (de 10^{-3} torr) durante 12 horas. Transcurrido este tiempo, se introdujo el mercurio, manteniendo el vacío, y, a continuación, se fue restableciendo la presión atmosférica por etapas, registrando en cada una de ellas los descensos en el nivel del mercurio.

Posteriormente la muestra fue introducida en el porosímetro procediéndose a la primera inyección de mercurio a presión, quedando automáticamente registrados los descensos de nivel en el capilar del dilatómetro, junto a los valores de presión alcanzados. Terminada esta fase del ensayo, se realizó una descompresión

lenta hasta presión atmosférica. Alcanzado el equilibrio, se procedió a una segunda inyección (reinyección) de las mismas características que la primera. Los descensos en el nivel de mercurio observados fueron menores, debido a que parte del mercurio penetrado en la primera inyección quedó definitivamente «atrapado» o retenido en espacios vacíos cuyos accesos presentan acusados estrangulamientos, impidiendo de este modo su salida. La diferencia entre ambas inyecciones proporciona la constatación de una fracción de porosidad (*porosidad atrapada*) que constituye un parámetro de interés en la caracterización global del sistema poroso de la roca (Bousquie, 1979). El valor total de esta porosidad atrapada puede obtenerse, después del ensayo, a partir del peso de la probeta impregnada de mercurio en relación con el peso de la probeta en seco.

Los descensos en el nivel del mercurio del capilar dilatométrico deben ser corregidos de acuerdo con su compresibilidad. Esto se realizó a partir de un ensayo previo sólo con mercurio. Una vez compensadas, las alturas registradas resultan proporcionales al volumen real de mercurio que se introduce en la probeta y, por tanto, a la porosidad.

Los valores de presión se transforman directamente en radio de acceso de poros en base a la expresión (1), teniendo en cuenta las correcciones a realizar en los valores bajos, dado que la presión de partida no es cero sino la correspondiente a la altura de la columna de mercurio que soporta la probeta (Pellerin, 1980). A partir de ambos pares de valores se confeccionan las curvas de distribución de la porosidad relativa en función de los tamaños (radios) de los conductos de poros. Observando las diferencias en los descensos de mercurio entre la primera y la segunda inyección se puede obtener la distribución de la porosidad atrapada, en función de los radios de acceso de estos poros particulares. Una descripción general del método a efectos prácticos, puede encontrarse, por ejemplo en Moscou y Lub (1981).

Resultados

Se realizaron dos ensayos completos para cada una de los dos tipos de muestras estudiadas (A y B). La dispersión máxima entre los dos ensayos de cada muestra, respecto a las curvas de distribución, es de un 8 % (A) y un 3 % (B).

Los valores medios de la *porosidad abierta* o

TABLA II.—Porosidades obtenidas por inyección de mercurio.

| Muestras | Porosidad abierta (n_o) | Macroporosidad ($r > 7 \mu\text{m}$) | Microporosidad ($r < 7 \mu\text{m}$) | Porosidad atrapada (n_{atp}) |
|----------|-----------------------------|--|--|----------------------------------|
| A | 28 % | 13 % | 15 % | 21 % |
| B | 29 % | 1,5 % | 27,5 % | 17 % |

efectiva n , así como los diferentes porcentajes asignados de macro y microporosidad, y de porosidad atrapada $n(atp)$, para las muestras de arenisca de Villamayor ensayadas, se muestran en la Tabla II.

Los valores de porosidad abierta obtenidos con el porosímetro de mercurio concuerdan con los obtenidos por el método picnométrico (realizado a efectos comparativos), siendo en ambos casos ligeramente más bajos que los valores de porosidad total calculados. El grado de saturación S_r (relación entre n_o y n , expresada en porcentaje) es, por tanto de 86,6 % y 85 %, para las muestras de tipo A y B, respectivamente.

En cuanto a los porcentajes relativos de macroporosidad y microporosidad, se observan notables diferencias entre ambos tipos: en la muestra A la macroporosidad representa un 50 %, mientras que en la B apenas llega al 5 %. La porosidad atrapada en ambos casos es considerable, sin que presente tan marcadas diferencias: 75 % (A) y 60 % (B) de la porosidad efectiva.

Las curvas de distribución del radio de acceso de los poros se han obtenido a partir de los valores medios en cada una de las muestras (Fig. 2), existiendo marcadas diferencias entre ellas. También se han realizado los correspondientes histogramas de tamaño de poro (Fig. 3).

La muestra A presenta la mitad de su porosidad concentrada en el intervalo de 6-20 μm , mientras la otra mitad aparece homogéneamente repartida dentro de un amplio rango de 0,004 μm a 6 μm . La muestra B presenta una distribución más próxima a la normal, con la moda alrededor de 0,3 μm , y con valores altos de dispersión, siendo significativo el rango de 0,01 μm a 4 μm .

La porosidad atrapada, por su parte, presenta ciertas analogías entre ambos tipos de muestras. Los poros con canales de acceso más pequeños ($< 0,02 \mu\text{m}$) y más grandes ($> 30 \mu\text{m}$) —cuya contribución a la porosidad efectiva es poco significativa— aparecen como poros «atrapados» en un porcentaje más bien bajo (20 %). En cambio los poros de mayor significación, por su contribución a la porosidad efectiva, aparecen «atrapados» en un alto porcentaje (80 %).

La mayor diferencia entre ambas muestras se percibe en los poros cuyos accesos se sitúan alrededor de 1-2 μm . En la muestra A se trata de poros poco relevantes y fundamentalmente no atrapados, mientras que en la B son muy abundantes y atrapados en un porcentaje muy elevado.

INTERPRETACIÓN PETROFÍSICA

La arenisca de Villamayor presenta, para las muestras seleccionadas, una porosidad abierta

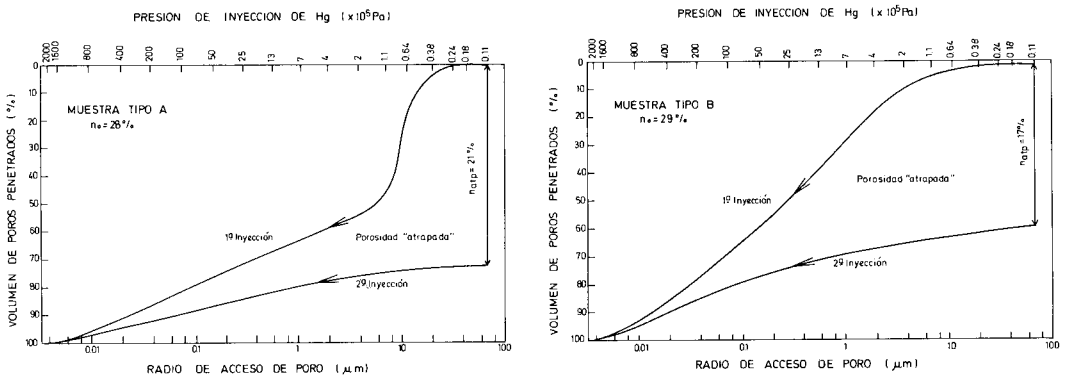


Fig. 3.—Curvas de distribución del espectro de porosidad, en función del radio de los accesos de los poros, obtenidas por inyección de mercurio. La diferencia entre la 1.ª y 2.ª inyección nos evidencia la distribución de la porosidad atrapada.

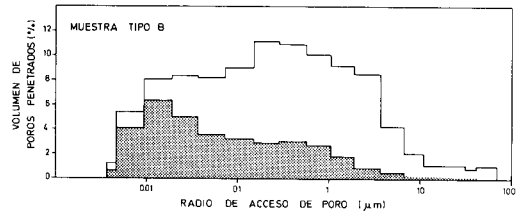
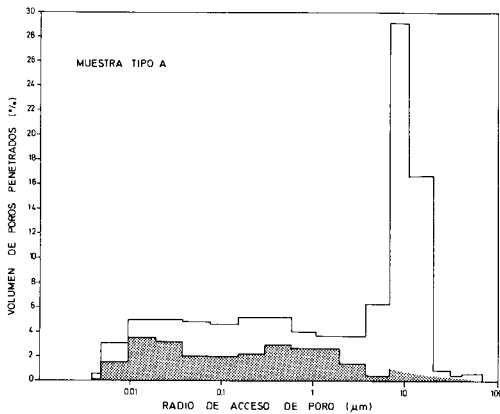


Fig. 4.—Histogramas de variación del volumen de poros penetrados por mercurio con el radio de acceso de los poros. (El volumen de poros atrapados, en cada intervalo de radios de acceso de poros, aparece sin puntrear).

bastante elevada (cerca del 30%). Sin embargo, las curvas obtenidas de la distribución de tamaños de los poros, en los dos tipos de muestras ensayadas presentan notables diferencias, con trazados bien distintos, para los segmentos preestablecidos de macro y microporosidad. Esta diferencia en el espectro poroso de esta arenisca, independientemente de su volumen relativo de poros (porosidad efectiva), constituye una de las características más relevantes de la configuración de su sistema poroso.

Por otro lado, las ligeras diferencias en ambos tipos, dentro de la general uniformidad y homogeneidad de la arenisca, tanto por lo que respecta al tamaño medio de grano, como al calibre, parecen no ser suficientes como para explicar las netas divergencias anteriormente señaladas en cuanto a la distribución de los espacios porosos. En consecuencia, deberían ser otros parámetros petrográficos, distintos a los estrictamente granulométricos, los que, de una manera más directa, vendrían a condicionar si no el valor de la porosidad abierta, sí la particular repartición de tamaños de poros en el sistema poroso, en especial por lo que se refiere a la mayor o menor importancia relativa de las fracciones de macro y microporosidad.

En este sentido, la presencia de filosilicatos, ya destacada, parece ser determinante. Así, los porcentajes de minerales arcillosos varían sensiblemente según uno u otro tipo de muestras analizadas, de forma que las de tipo A tienden a presentar mayor abundancia de filosilicatos (alrededor del 20%) que las de tipo B (alrededor del 10%). Los distintos porcentajes, sin embargo, parecen no influir, al menos de una manera decisiva, en el conjunto de la porosidad de

la roca que, como se ha visto, es bastante similar en ambos tipos. Su influencia se haría sentir, en cambio, en la distribución del tamaño de los poros. A nuestro entender, lo que condicionaría, en las muestras estudiadas, la aparición de una u otra clase de curva porosimétrica sería, más que el contenido en minerales arcillosos, su naturaleza y forma de presentación. Como ya se ha hecho notar, uno de los hábitos cristalográficos característicos de estos filosilicatos autigénicos (especialmente illitas) es la tendencia a formar películas de recubrimiento alrededor de los granos minerales, con entrelazamiento de filamentos y aparición de agregados con diminutas aberturas de conexión entre poros. La consecuencia directa de esta particular disposición es un incremento de los conductos porosos de pequeño tamaño, es decir, de la fracción de microporos. En efecto, las muestras de tipo B son las que presentan, de acuerdo con las observaciones realizadas al microscopio de barrido, un mayor desarrollo de illitas con disposición peculiar (*pore lining*), con formas filamentosas acusadamente intrincadas; mientras que en las de tipo A, las arcillas ocupan preferentemente posiciones intersticiales más difusamente esparcidas. Esto vendría a concordar con la mayor microporosidad (aproximadamente el 95% de la porosidad abierta) revelada en las muestras de tipo B.

La porosidad atrapada parece, en principio, poco influenciada por la fracción de poros de más pequeño diámetro (y también por los de mayor tamaño), de aquí que, dentro de las diferencias observadas en los dos tipos, los valores finales sean relativamente próximos (17-19%); pudiéndose pensar, en este caso, que el mayor

o menor desarrollo de esta peculiar fracción de la porosidad se deba a aspectos geométricos de los poros y canales porosos, y a sus características de conectividad, dentro del segmento medio del espectro de tamaños de poros.

En relación con las propiedades físicas medidas, asociadas al paso de fluidos, se observa que la mayor capacidad de absorción de agua (contenido en humedad de saturación) y, sobre todo, los más altos coeficientes de capilaridad, los presentan las muestras con mayor porcentaje de microporos (tipo B); tendencia evidente si tenemos en cuenta que la capacidad de succión de agua y ascensión capilar (penetración) está, en líneas generales, en relación inversa al radio de los capilares (conductos porosos) de la roca, de forma que cuanto mayor sea el número de estos conductos intercomunicados y más pequeño su radio, mayor será, en principio, la succión de agua por capilaridad.

Esta facilidad para absorber y retener fluidos se halla, por otro lado, estrechamente ligada a la alterabilidad de la roca. En este sentido, la relativa baja durabilidad de la arenisca de Villamayor, como material de construcción, estaría directamente condicionada no sólo por su elevada porosidad inicial, sino por la especial estructura de su sistema poroso (especialmente de su microporosidad); a parte de otros factores mineralógicos-texturales (p. ej., porcentaje de

minerales arcillosos expansivos, cohesión intergranular, etc...).

CONCLUSIONES

De los datos y observaciones anteriormente expuestos, se pueden entresacar las siguientes conclusiones.

1.—La combinación de observaciones visuales de los poros, por medio de técnicas microscópicas (en especial al SEM), junto con los resultados de los ensayos de porosimetría de mercurio, proporciona una base adecuada para la caracterización e interpretación de la estructura del sistema poroso de los materiales rocosos.

2.—Las muestras de arenisca de Villamayor estudiadas presentan una elevada porosidad, con escasa dispersión, aun cuando el espectro de distribución de los tamaños de los poros (o canales porosos) es muy variable. La mayor o menor abundancia relativa de microporos dependería, en este caso, de la presencia, naturaleza y hábito cristalográfico de determinados filossilicatos (illita).

3.—La mayor capacidad de succión de agua por capilaridad coincide con aquellas muestras de arenisca que exhiben una mayor gama de microporosidad. Esta facilidad para absorber fluidos condicionaría, a su vez, la alterabilidad relativamente alta de esta arenisca, como piedra de construcción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado, en parte, gracias a una Ayuda a la Investigación de la Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Salamanca (Convocatoria de

1981). También hacemos constar, por su colaboración, nuestro agradecimiento a la Dra. Rosa María Esbert.

BIBLIOGRAFIA

- Arribas, A. y Jiménez, E. (1972).—Memoria explicativa de la Hoja n.º 37 (Salamanca). *Mapa Geológico de España, E. 1 : 200.000, Instituto Geológico y Minero de España* (1.ª Ed.), 31 pp.
- Bousquie, P. (1979).—*Texture et porosité des roches calcaires*, Tesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 191 pp.
- Keighin, C. W. (1980).—Characteristics of pores in some cretaceous non-marine sandstones, Uinta Basin, Utah. *Scanning Electron Microscopy*, 1, 559-564.
- Mamillan, M. (1981).—Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs. In: R. Rossi-Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone*, II, 59-77, Bolonia.
- Moscou, L. y Lub, S. (1981).—Practical use of mercury porosimetry in the study of porous solids. *Powder Technology*, 29, 45-52.
- Neasham, J. W. (1977).—Applications of scanning electron microscopy to the characterization of hydrocarbon-bearing rocks. *Scanning Electron Microscopy*, 1, 101-108.
- Ordaz, J. (1982).—*Estado de alteración y alterabilidad futura de la piedra de Villamayor de los monumentos salmantinos: interpretación petrográfica*. Memoria inédita, Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad de Oviedo, 111 pp.
- Pellerin, F. (1980).—La porosimetrie au mercure appliqué à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bull. Lias. Lab. Ponts et Chaussées*, 106, 105-116, París.
- Stalder, P. J. (1973).—Influence of crystallographic habit and

- aggregate structure of authigenic clay minerals on sandstone permeability. *Geologie in Mijnbouw*, 52 (4), 217-220.
- Vos, B. H. (1976).—Waterabsorption and drying of materials. In: R. Rossi-Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone*, I, 679-694, Bologna.
- Wardlaw, C. N. y Cassan, J. P. (1978).—Estimation of recovery efficiency by visual observation of pore systems in reservoir rocks. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 26, 572-585.
- Wilson, M. D. y Pitmann, E. D. (1977).—Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *Jour. of Sed. Petr.*, 47 (1), 3-31.