

Petrofísica de la roca matriz

Modesto Montoto y Rosa M.^a Esbert

*Dpto. de Geología (Grupo de Petrofísica)
Universidad de Oviedo. 33005 Oviedo, España*

Recibido el 15 de Diciembre de 1998.

Aceptado el manuscrito revisado el 2 de Febrero de 1999.

Resumen: La Petrofísica estudia en la roca matriz o "intact rock" sus propiedades físicas interpretándolas en función de sus componentes y características petrográficas: vacíos –poros y fisuras–, uniones intergranulares, anisotropías, minerales, composición química, etc. Esta interpretación ha requerido el uso de nuevas microscopías para la observación de tales componentes, nuevos parámetros petrográficos para su descripción y procedimientos específicos para su evaluación.

Se resumen todos estos aspectos básicos en la Petrofísica de la roca matriz de gran interés en Geología aplicada, Ingeniería geológica, "Rock Engineering", etc.

Palabras clave: Petrofísica, componentes petrográficos, microscopía, intact rock, roca matriz, Geología aplicada, Ingeniería geológica, "Rock Engineering".

Abstract: Petrophysics referred to the intact rock or "rock matrix" studies its physical properties interpreting them in terms of its rock-forming components and characteristics (voids –pores and fissures–, grain interlocking, anisotropies, minerals, chemical composition, etc.). This interpretation has required: new microscopies for imaging the rock-forming components, new petrographic parameters and specific procedures for their quantification. The basic principles of Petrophysics referred to the intact rock and the main physical properties of interest in Applied Geology, Engineering Geology, Rock Engineering, etc. are summarized.

Key words: Petrophysics, rock-forming components, microscopy, intact rock, rock matrix, Applied Geology, Engineering Geology, Rock Engineering.

El estudio de las propiedades físicas de los macizos rocosos constituye, desde el trabajo pionero de Adams y Williamson (1923), un reconocido campo de investigación básica y aplicada. Durante las últimas décadas dicho estudio ha experimentado un importante desarrollo impulsado por las prospecciones geológico-geofísicas de recursos naturales, fundamentalmente petróleo, y por la caracterización de macizos rocosos como repositorios de residuos radioactivos de alta actividad; ambos ejemplos incluyen, a su vez, la determinación de litología, estructura y propiedades físicas del medio rocoso en el entorno próximo de un sondeo "logging" (Rider, 1986; Kobranova, 1989). Asimismo, la Petrofísica ha cubierto otro ámbito de trabajo en Geología al ocuparse, tam-

bién, de la escala de la denominada "roca matriz" o "intact rock", objeto de este trabajo.

Cabe aclarar que en Ingeniería Geológica, "Rock Engineering", Petrología Aplicada, etc. se distinguen dos escalas del medio geológico, muy diferentes y significativas: la del macizo rocoso (Fig. 1, a) y la de la denominada "intact rock" (Fig. 1, b) o "roca matriz" –volumen de roca carente de discontinuidades de macizo–, según definición de la "International Society for Rock Mechanics". Esta distinción es esencial para entender el comportamiento del medio geológico, dado que la escala del macizo contiene uno de los componentes más significativos en Petrofísica, las discontinuidades (fracturas, diaclasas, planos de estratificación, etc.) cuyas propiedades físicas gobiernan, fundamen-



Fig. 1. Esquema metodológico de aspectos y etapas implicados en los estudios petrofísicos. Se identifican dos escalas de trabajo “macizo” e “in-tact rock” o “roca matriz” (en a, b, c: escala = 1m).

talmente, el comportamiento del macizo rocoso (Priest, 1993).

La Petrofísica de la roca matriz estudia sus propiedades físicas y las interpreta en función de sus componentes petrográficos (poros y fisuras, uniones intergranulares, presencia de anisotropías, minerales, incluyendo su estado de alteración físico y químico, composición química, etc.) (Montoto, 1983); este planteamiento permite, además, intentar predicciones futuras acerca del comportamiento físico de la roca. Por todo ello la metodología petrofísica se inicia con los correspondientes estudios de campo y se complementa con los de laboratorio de tipo físico, químico y petrográfico (Fig. 1).

Bajo esta perspectiva son muy diversas las propiedades físicas que se estudian en las rocas, unas para evaluar su comportamiento mecánico y hacer un uso directo de tal conocimiento, por ejemplo módulos de elasticidad, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la cizalla,... (Franklin y Dusseault, 1989). Otras, denominadas “de transporte”, como conductividad de ondas térmicas, eléctricas, electromagnéticas, ultrasónicas, etc. constituyen el soporte teórico indirecto para la

caracterización de rocas y macizos rocosos; es decir, a partir del comportamiento de las señales mencionadas durante su tránsito por el medio geológico se deducen aspectos litológicos y estructurales, así como su precisa geometría; incluso se utilizan para evaluar, también, aspectos de funcionalidad geológica, por ejemplo, papel hidráulico de discontinuidades (Martel y Peterson, 1991). Estas señales físicas, según sea el procedimiento bajo el cual se aplican, constituyen las denominadas técnicas no destructivas que, sin duda, representan uno de los mayores logros actuales en tecnología geológica, siendo su interpretación una de las principales aplicaciones y retos de la Petrofísica.

Pero, la interpretación petrográfica de las propiedades físicas, que requiere el planteamiento petrofísico, no siempre resulta fácil; esto se debe a que, a diferencia de otros materiales, las rocas son poco homogéneas, polifásicas, con abundantes discontinuidades y anisotropías (Fig. 2) lo cual dificulta, para la interpretación de sus propiedades físicas, la aplicación de los principios básicos de la Física teórica. Ésta, en sus postulados, considera materiales continuos, homogéneos, isótropos y sin límites, es

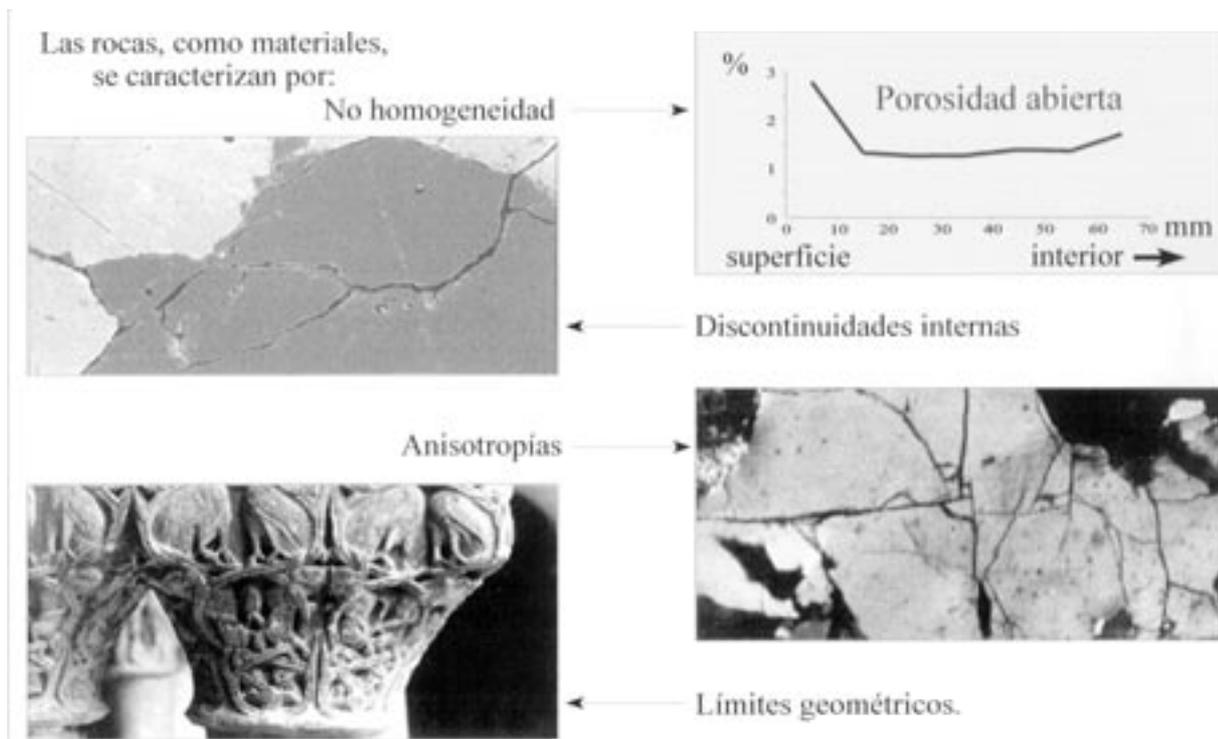


Fig. 2. La dificultad de aplicación de los principios de la Física teórica a las rocas es debido a que éstas, como materiales, se caracterizan por su falta de homogeneidad, omnipresencia de discontinuidades internas y anisotropías, así como existencia de límites geométricos.

decir, todo lo contrario de la realidad de las rocas. Este hecho, junto al amplio número de variables que pueden intervenir en el comportamiento físico del medio rocoso, contribuye a que las correlaciones entre petrografía y propiedades físicas sean difíciles de interpretar y, sobre todo, de generalizar. Por otra parte, debido a la citada falta de homogeneidad en las rocas, deben ensayarse numerosas probetas para cada muestra a fin de lograr una correcta representatividad de los datos petrofísicos proporcionados (Fig. 1, g).

Componentes petrográficos significativos en Petrofísica

Las características y componentes y petrográficos que se consideran más significativos para interpretar las propiedades físicas de la roca matriz son: textura, incluyendo los vacíos (poros o fisuras), uniones intergranulares, presencia de anisotropías (fractográficas, composicionales, estructurales,...) y minerales (considerando muy especialmente su estado de alteración físico y químico) (Fig. 3). Pero sin duda alguna el más influyente de todos ellos es

la porosidad; su dualidad funcional es evidente, por una parte representa una carencia de fase sólida en el seno de la roca, con evidente incidencia mecánica, pero por otra condiciona la movilidad del componente que más variabilidad comunica a las propiedades físicas de las rocas, el agua.

En el análisis de la porosidad deben considerarse el volumen total ocupado por los huecos y las características geométricas de éstos, así como de sus accesos, en términos de conectividad, tortuosidad, etc.; en general suele hablarse de la “geometría del sistema poroso” (Alonso et al., 1987) (Fig. 4). Para poder interpretar mejor los movimientos del agua por el seno de la roca matriz, se contabilizan todos los espacios vacíos, comunicados o no, distinguiéndose entre “porosidad total” y “porosidad abierta y, también, entre “porosidad atrapada”, con muy difícil entrada y salida del agua, y “porosidad libre o circulante o efectiva”. Sin embargo, dado que las características de los accesos a los poros son los que realmente gobiernan la capacidad de tránsito del agua, se recomienda evaluar el rango de variación de los tamaños de tales conductos y, más concretamente, el porcentaje de la porosidad

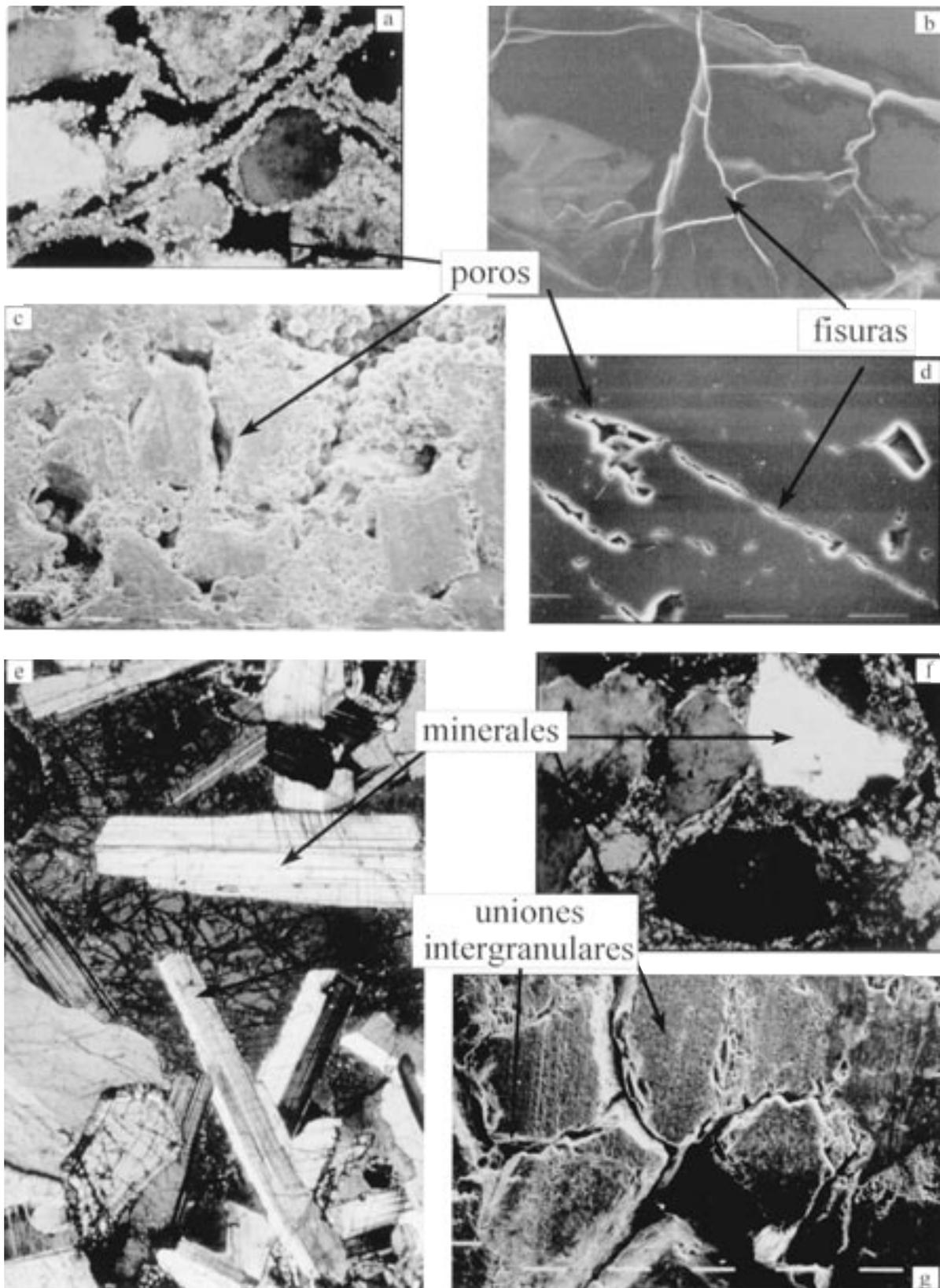


Fig. 3. Componentes petrográficos más significativos en Petrofísica observados bajo diferentes microscopías: Poros, fisuras, uniones intergranulares y minerales.

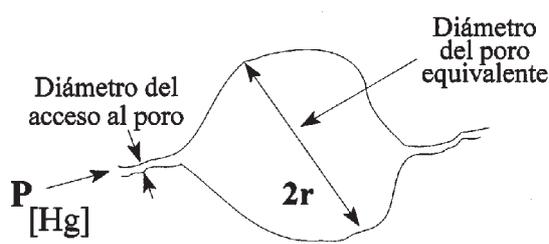


Fig. 4. Esquema de las características geométricas a considerar en el sistema poroso de una roca.

total de la roca accesible a través de cada rango de tamaños; estos datos pueden obtenerse mediante porometría de inyección de mercurio y se representan utilizando un sencillo histograma (Fig. 5); en éste el valor de 7.5 mm delimita las denominadas macro y microporosidad. Con esta técnica se determina, para cada tamaño de acceso, la porosidad de tipo efectiva y atrapada.

Si se presuponen posibles reacciones sólido-fluido, como las que tienen lugar en numerosas aplicaciones industriales y en las clásicas de interés petrogenético, debe, además, considerarse la composición química mineral y global de la roca, así como las relaciones geométricas existentes entre los espacios vacíos abiertos –efectivos para el tránsito de fluidos– y los minerales de la roca. En estos casos debe poderse discernir y cuantificar la localización de los vacíos comunicados –intra, trans e intergranulares– respecto a cada mineral de la roca.

Otro “componente petrográfico” esencial en Petrofísica es la posible presencia de anisotropías que la roca puede presentar a diversas escalas, debido a orientaciones en la red microfractográfica, bandeados composicionales, esquistosidad mineral, etc. Su valoración más adecuada suele lograrse mediante la utilización de técnicas no destructivas como las ultrasónicas (Esbert et al., 1994).

Pero, en general, el análisis de los componentes petrográficos requiere, además de ciertas técnicas instrumentales, otras más específicas de microscopía, teniendo siempre presente que la adecuada preparación y manipulación de la muestra juega un papel condicionante en la imagen finalmente obtenida. Deben, así, evitarse durante todas las etapas de estudio la creación de “artefactos” o efectos inducidos de procedencia y naturaleza muy diversa

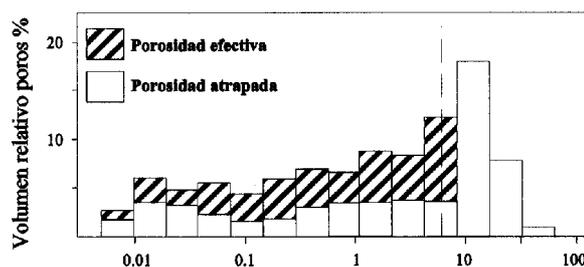


Fig. 5. Histograma de la porosidad de una roca determinada mediante porometría de inyección de Hg.

(morfológicos, analíticos, electrónicos, informáticos...), sin olvidar los que puedan producirse a causa de muestreo mediante sondeos profundos (Montoto et al., 1998). El conjunto de las técnicas microscópicas a utilizar es muy amplio; abarca desde las habituales de óptica de polarización con luz transmitida (Fig. 3: a, e, f), fluorescencia (Fig. 3: b), electrónica de barrido con electrones secundarios (Fig. 3: c, g) y retrodispersados (Fig. 3: d), hasta las menos rutinarias de láser-confocal (Montoto et al., 1995), acústica (Rodríguez-Rey, et al., 1990) y atómica de fuerzas. Todas ellas pueden aplicarse sucesivamente sobre la misma superficie de roca (Fig. 6) si se realiza una adecuada preparación de muestra (Montoto et al., 1980); de este modo se logra una mejor información global al complementar la información petrográfica que aporta cada una de ellas.

Pero la interpretación petrofísica requiere, además, la cuantificación de los componentes petrográficos, la cual puede realizarse mediante procedimientos estereológicos y, también, mediante proceso digital de imágenes. Los primeros, con fundamentos matemáticos, permiten obtener información tridimensional a partir de toma de datos en imágenes bidimensionales; los segundos se basan en el tratamiento informático de imágenes microscópicas digitalizadas y permiten, además, la cartografía de los componentes petrográficos a la escala de sección microscópica. Para un estudio más completo sobre ambos procedimientos, aplicados a componentes petrográficos de interés en Petrofísica, véase Menéndez (1992) y Martínez-Nistal (1993).

Uno de los numerosos campos de aplicación de todos estos conocimientos petrofísicos es el relativo a la denominada “solución geológica” sobre el destino final de los residuos radioactivos de alta acti-

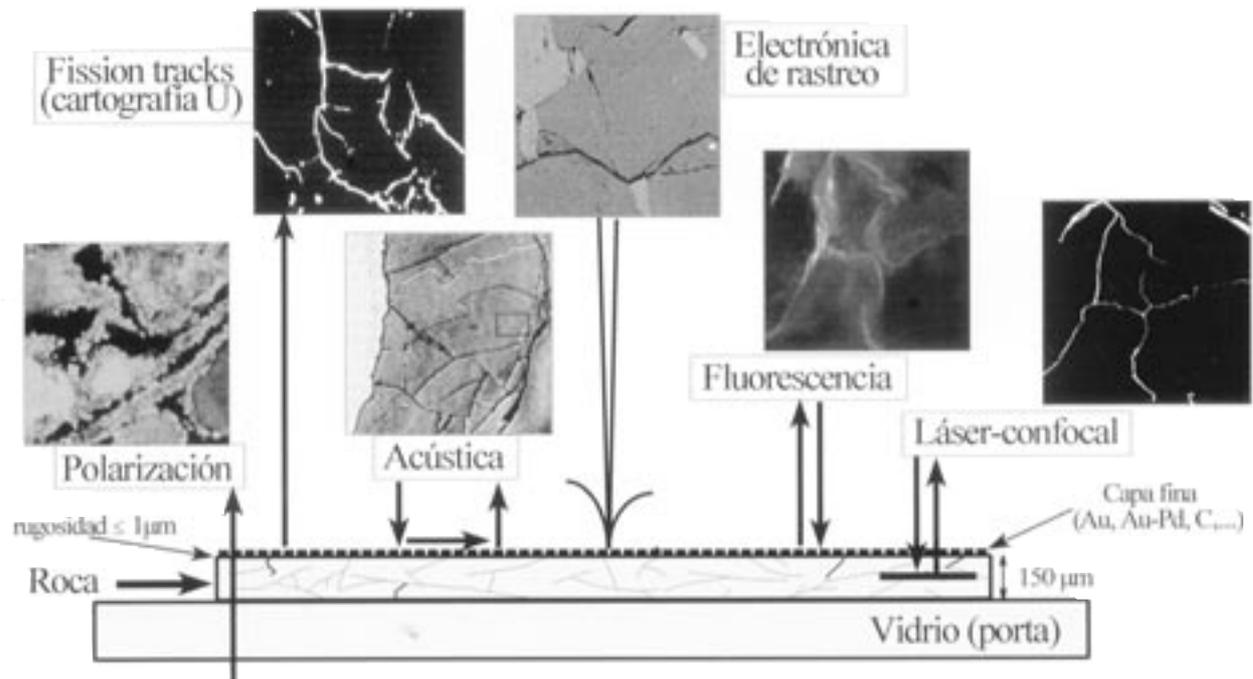


Fig. 6. La aplicación de diferentes técnicas de microscopía a la misma sección delgada de roca permite la óptima observación y cuantificación de los principales componentes petrográficos significativos en Petrofísica. Se trata de una sección delgada, plana (rugosidad $\leq 1\mu\text{m}$), pulida, metalizada con capa fina de Au-Pd e impregnada con una fluoresceína, sometida a bombardeo de neutrones en un reactor nuclear.

vidad; esta solución, internacionalmente aceptada, consiste en su almacenamiento definitivo en el seno de formaciones rocosas, bajo condiciones de estabilidad y estanqueidad. El tema implica, por su complejidad, gran diversidad de estudios especializados; así por ejemplo, en uno de ellos, de clara incidencia petrofísica, se evalúa la movilidad potencial de migración de radionúclidos en el seno del macizo rocoso almacén, habiéndose podido demostrar, aparte de otras razones hidrogeoquímicas, el papel que juega tanto la naturaleza del sistema microfractográfico de la roca matriz, como el de los contactos fisura-mineral. Así, en la roca matriz en contacto con fracturas hidráulicamente conductoras del macizo rocoso almacén y a distancias de éstas de hasta unos 10 cm. se reconoce un retardo en la migración de los radionúclidos, mediante un proceso que se viene denominando de “difusión por la roca matriz” (Neretnieks, 1980) y que constituye un claro factor de seguridad añadido en el repositorio (Montoto, 1997). La Fig. 7 presenta un perfil geoquímico-petrofísico en el seno de la roca matriz a partir de una superficie de fractura hidráulicamente conductora; se presenta en ella la imagen de la zona de roca estudiada bajo SEM (con detec-

tor de electrones retrodispersados), la variación, respecto a la distancia de la fractura, de la porosidad abierta, de la superficie específica S_v , de fisura que afecta a cada mineral petrográfico (Q, cuarzo; F, feldespato; M, mica), de la capacidad de absorción de agua y de la relación $\text{Th}^{230}/\text{U}^{234}$; el perfil pretende poner en evidencia la posible movilidad sufrida por tales radioelementos en la zona analizada (Montoto et al., 1996).

Finalmente una reflexión sobre el “aparentemente lógico” y extendido deseo de intentar establecer relaciones entre grupos petrográficos y propiedades físicas. Esto obliga a recordar los principios sobre los que descansa la clasificación de las rocas; así, la utilizada habitualmente en Petrografía considera características texturales y mineralógicas relacionadas con su historial petrogenético, pero ignora otras como poros, fisuras, estado de alteración mineral,... que son realmente las que condicionan sus propiedades físicas. Por consiguiente, resulta un error conceptual intentar asignar valores de propiedades físicas a tipos petrográficos clasificados según criterios petrogenéticos. Por ejemplo, los valores de los módulos de elasticidad en granitos, basaltos, andesitas,... dependerán fundamentalmente

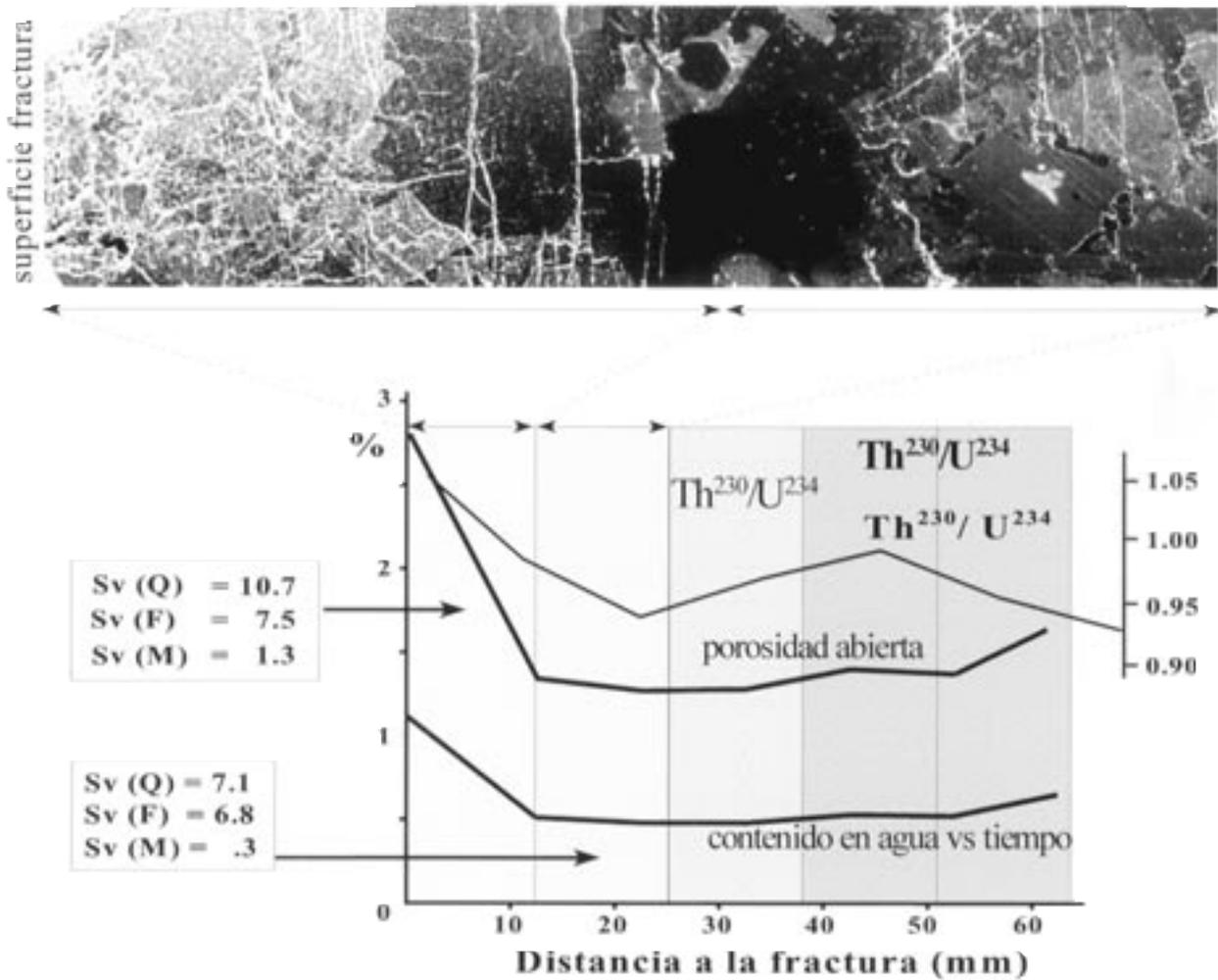


Fig. 7. Perfil petrofísico-geoquímico de la roca matriz del granito de El Berrocal (Toledo), a partir de una fractura hidráulicamente conductora.

del estado de alteración físico o químico de sus minerales, de las características de su espacio de vacíos, etc. y menos de la composición mineralógica mediante la cual han sido clasificadas. En otros términos, una variación mineralógica y textural en una roca la desplazará a otro grupo petrográfico pero, no necesariamente deberá significar una variación en sus propiedades físicas.

Por todo ello se reconoce la utilidad en Petrofísica de una antigua clasificación ingenieril de las rocas (Duncan, 1969) en cristalinas, cementadas y compactadas, según sea la naturaleza de los contactos entre los constituyentes sólidos de la roca (Fig. 8); a su vez dicha clasificación contempla las relaciones que presentan los dos constituyentes petrofísicos esenciales en toda roca: sólidos (minerales y/o fragmentos líticos) y vacíos.

De acuerdo con los anteriores criterios, las rocas cristalinas están constituidas por minerales en general bien desarrollados, de formas más o menos poliédricas y en contacto directo mutuo. Son, mayoritariamente, pero no exclusivamente, las rocas ígneas y metamórficas, entre las que se incluyen variedades masivas (granitos y mármoles) y rocas foliadas (pizarras). Suelen ser menos alterables que las cementadas, sus vacíos son de tipo fisura y muy escasos en volumen, es decir, muestran porosidades en general muy bajas, inferiores al 1% en ausencia de meteorización. Pueden denominarse rocas fisuradas y la circulación de agua en el seno de su “roca matriz” es, en condiciones ambientales, difícil y restringida a su red microfractográfica comunicada; los movimientos internos del agua suelen ser muy lentos, comparativamente con los que

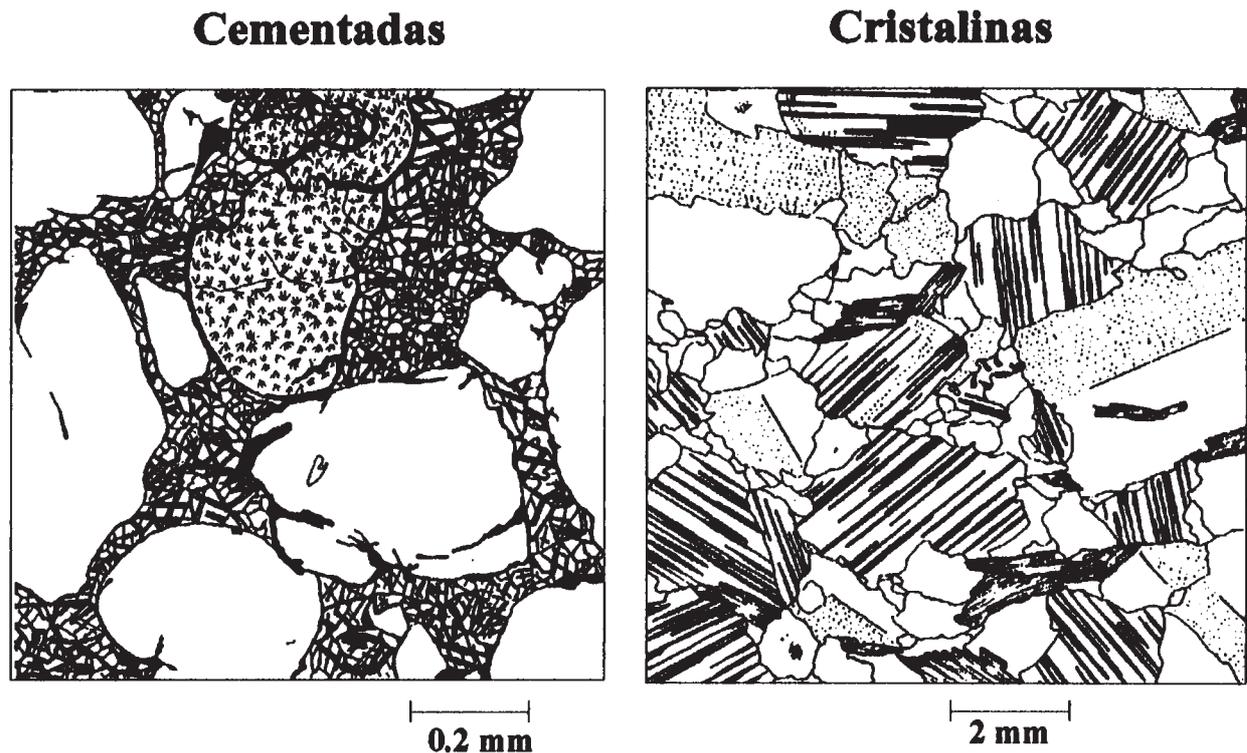


Fig. 8. Clasificación petrofísica de las rocas de acuerdo con la naturaleza de sus uniones intergranulares.

ocurren en las rocas cementadas. En muchos casos muestran una marcada alterabilidad diferencial de sus minerales.

Por su parte, las rocas cementadas se caracterizan por tener sus granos minerales unidos por una fase aglomerante de tipo cemento (material cristalino precipitado) o matriz (material fino depositado). Pertenecen a este grupo la mayoría de las rocas sedimentarias, tales como calizas y areniscas. Poseen vacíos de tipo poro, en general muy abundantes en volumen, de modo que porosidades del 20 al 30% no son anómalas. Pueden denominarse rocas porosas, en general con muy fácil circulación de agua tanto de entrada, absorción, como de salida, desorción, movimientos de agua efectivos en cortos periodos de tiempo, horas o minutos.

Propiedades físicas

Los materiales rocosos, dada su variabilidad en estado de alteración, porosidad/red microfractográfica, etc. muestran propiedades físicas muy diferentes, las cuales se determinan a partir de ensayos

normalizados y se expresan mediante parámetros adecuados.

Algunas propiedades caracterizan el aspecto y la constitución física de la roca, son las denominadas “propiedades físicas elementales” como color y densidad. Otras, como las mecánicas, caracterizan su comportamiento frente a diferentes tipos de tensiones; otras, resumidas bajo la denominación genérica de propiedades de tránsito, reflejan su comportamiento bajo la acción del tránsito de fluidos, gradientes térmicos, ondas elásticas, eléctricas, electromagnéticas, etc. Este trabajo no pretende adentrarse en ninguna de ellas, pero, a modo de sencillos ejemplos petrofísicos, se incluyen y comentan, muy brevemente, algunos aspectos de las hídricas y mecánicas.

Propiedades hídricas

Las propiedades hídricas caracterizan el comportamiento de la roca matriz frente al agua (procesos de captación, pérdida y circulación de agua –líquida o vapor–), las principales son: absorción y de-

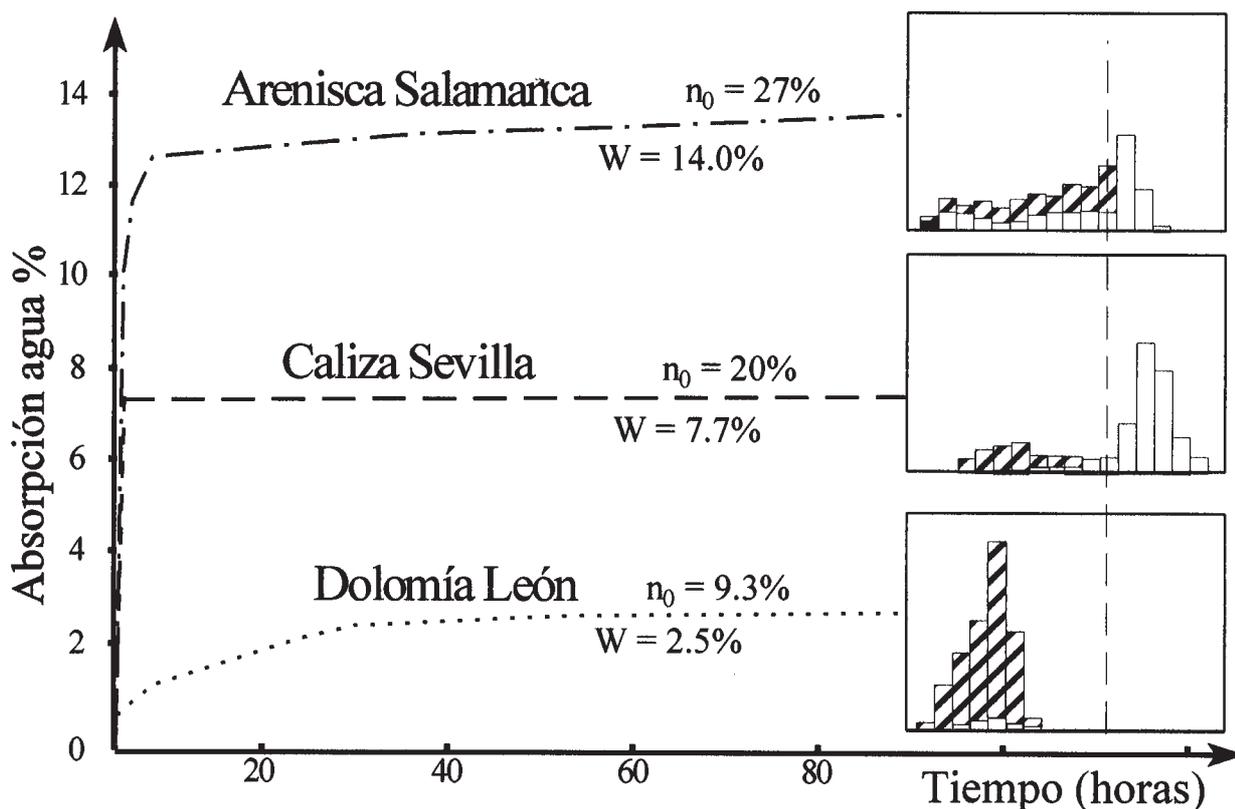


Fig. 9. Resumen del comportamiento hídrico de tres importantes piedras monumentales españolas, expresado en función de la capacidad de absorción libre de agua y geometría del sistema poroso.

sorción, succión capilar, permeabilidad, expansión hídrica... Están estrechamente relacionadas con su petrografía (en especial textura y mineralogía) y otras circunstancias geológicas del macizo, por ejemplo, su estado tensional. Su interpretación constituye uno de los pilares de la Petrofísica y, como se viene mencionando, la geometría del sistema poroso es, sin discusión alguna, el factor más condicionante; de hecho un petrofísico experto es capaz de deducir muchos aspectos de dicha geometría a partir del simple, sencillo, rápido y barato ensayo de absorción libre de agua. Todo este amplio e importante tema se resume, bajo un moderno planteamiento petrofísico enfocado hacia las rocas monumentales en Esbert et al. (1997).

Como ejemplo de la importancia de estas propiedades se resume (Fig. 9) el comportamiento hídrico (Valdeón et al., 1993) de tres tipos de piedra monumental muy conocidos en España; se trata de la caliza del Puerto de Santa María (Sevilla) una de las piedras utilizadas en la Catedral de Sevilla, la dolo-

mía de Boñar utilizada en la Catedral de León y la arenisca de Villamayor (Salamanca) con la que se ha construido mayoritariamente el conjunto monumental salmantino. En dicha figura, asociado a cada curva absorción-tiempo se acompañan los datos de porimetría de Hg, el valor de la porosidad abierta n_0 y el de absorción libre de agua W .

En la primera piedra ($n_0=20\%$, $W=7.7\%$) la rapidez y cantidad con la que se absorbe agua e inmediatamente se estabiliza indica, claramente, un alto porcentaje de porosidad efectiva y que el agua se mueve por su seno con suma facilidad a través de accesos de "gran tamaño" (rango 1-200 μm .). En la segunda, dolomía de Boñar, ($n_0=9.3\%$ y $W=2.5\%$) el agua se absorbe muy lentamente y tarda en conseguir la estabilización; este comportamiento indica que el agua se mueve por su seno con dificultad y accede a su sistema poroso a través de conductos muy estrechos o tortuosos, mal comunicados; además, puede deducirse que, aunque el valor de su porosidad abierta sea alta es poco efectiva, es decir, mayoritariamente atra-

pada. Finalmente, la arenisca de Salamanca ($n_0=27\%$ y $W=14\%$) muestra dos episodios muy diferenciados en el tiempo respecto a la absorción de agua; uno, inicial, relativamente muy rápido seguido de otro de baja “velocidad” de absorción; se deduce, pues, un sistema poroso caracterizado por un amplio rango de tamaños de acceso ($0.001-100 \mu\text{m.}$) y con un alto porcentaje de porosidad efectiva ($W=14\%$); además, la presencia de minerales expansivos en su matriz arcillosa, paligorskita, dificulta el tránsito de una cierta fracción del volumen de agua que circula por su interior, tal como se deduce del análisis mineralógico y del episodio de “baja velocidad” de la curva de absorción de agua.

Propiedades mecánicas

Se refieren al comportamiento de los materiales pétreos bajo esfuerzos mecánicos de diferentes tipos (compresión, tracción, cizalla); su estudio es, lógicamente, básico en Geología.

El ensayo de compresión uniaxial permite construir la importante curva esfuerzo-deformación y deducir de ella los módulos de elasticidad estáticos de Young (E) y de Poisson (ν). En general, y desde el punto de vista petrográfico, puede afirmarse que los comportamientos “elásticos” y “plasto-elásticos” que se reconocen en dicha curva son representativos de rocas cristalinas y los “elasto-plásticos” y “plasto-elasto-plásticos” de rocas cementadas. Además de requerirse la interpretación petrográfica de dicha curva (Fig. 10), debe extraerse un dato, petrofísicamente muy interesante, el denominado “umbral de microfisuración”; se trata del valor del esfuerzo aplicado, ya sea de origen térmico o mecánico, al cual se inician nuevas microfisuras o se desarrollan otras ya preexistentes; tiene lugar a esfuerzos inferiores al del “límite de elasticidad” durante el tramo “aparentemente” elástico de la curva esfuerzo-deformación; su determinación requiere técnicas complementarias aplicadas durante el ensayo como emisión acústica/actividad microsísmica (AE/MS) (Ruiz de Argandoña et al., 1985), permeabilidad, etc.

La mencionada emisión acústica/actividad microsísmica se genera espontáneamente en el seno de las rocas sometidas a tensión; su origen parece ser consecuencia de la liberación repentina de energía de deformación elástica almacenada en la roca. Por

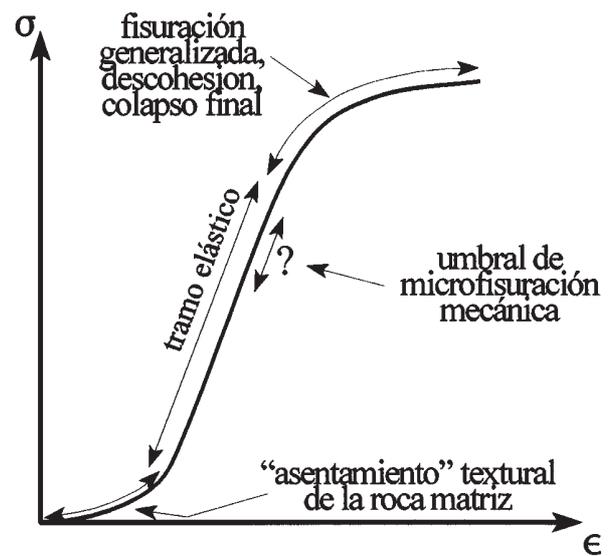


Fig. 10. Interpretación petrográfica de los posibles tramos en una curva esfuerzo-deformación correspondiente a una roca sometida a un ciclo uniaxial de carga.

consiguiente, se relaciona con procesos de deformación y rotura del medio geológico; a escala microscópica puede originarse por dislocaciones y maclaciones, a escala macroscópica, por movimiento y roce de granos o iniciación y propagación de fisuras, y a escala megascópica, por la rotura de grandes volúmenes de roca o incluso por el movimiento relativo de unidades estructurales.

Ha podido demostrarse que dicha emisión está relacionada con las características petrofísicas de la roca; así, experiencias realizadas con granitos que mostraban estados de alteración muy diferentes, reflejados en las diferencias entre parámetros petrofísicos básicos (porosidad, velocidad de propagación de ondas P), daban lugar a muy diferentes tipos de emisión acústica, desde granitos extremadamente alterados ($n=5.2\%$, $v_p=1900 \text{ m/s}$) a más “sanos” ($n=1.3\%$, $v_p=3800 \text{ m/s}$). En la Fig. 11 se expone, para uno de dichos granitos, la relación entre el esfuerzo aplicado durante un ciclo uniaxial de carga, la deformación longitudinal ϵ_L y transversal ϵ_T , la emisión acústica/actividad microsísmica generada y la evolución de su microfisuración interna (Montoto et al., 1984).

Se reconoce, en la mencionada figura, que al inicio de la carga se genera una cierta emisión acústica, la cual no puede relacionarse con fisuración interna o inestabilidad geomecánica de la roca, fenómenos

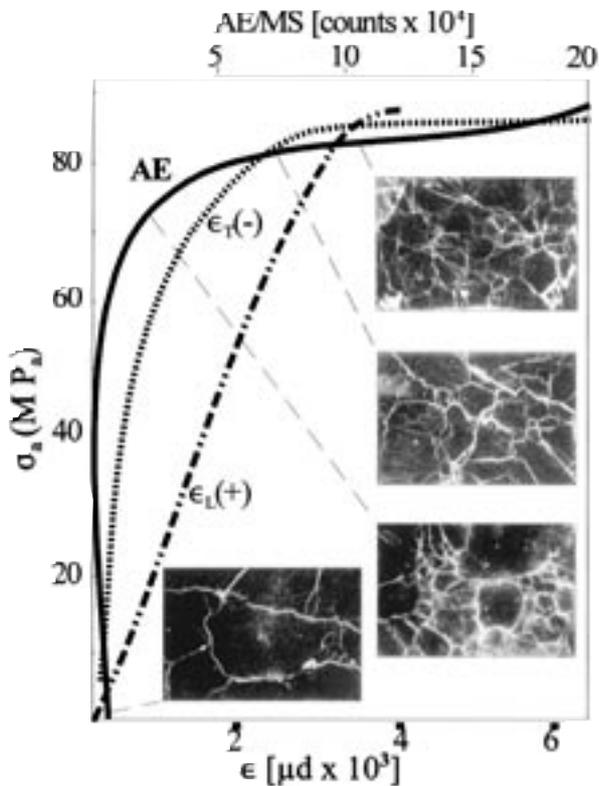


Fig. 11. Curvas esfuerzo-deformación (longitudinal ϵ_L y transversal ϵ_T) y de emisión acústica/actividad microsísmica en un granito sometido a un ciclo uniaxial de carga. Se incluye, también, la evolución de su microfisuración interna.

inexistentes a tan bajos valores de carga, sino con una importante reorganización textural interna, cierre de poros y fisuras, deslizamientos a lo largo de uniones intergranulares decohesionadas, etc. Posteriormente, una vez conseguida una mayor compactación y homogeneización textural, la emisión acústica disminuye y se mantiene con valores muy bajos durante la sucesiva aplicación de carga; sin embargo, a un determinado nivel del esfuerzo aplicado, dentro del tramo elástico de la curva esfuerzo-deformación, vuelve a iniciarse emisión acústica; dicho nivel de esfuerzo corresponde al “umbral de microfisuración mecánica” y refleja del inicio de la microfisuración interna. A partir de él la emisión progresa lentamente hasta el límite de elasticidad, es a partir de este valor –inicio de la macrofisuración interna– cuando crece vertiginosamente hasta alcanzarse el colapso final de la roca.

Es evidente la aplicabilidad de la emisión acústica en Ingeniería Geológica ya que proporciona información muy válida sobre el estado tensional interno del

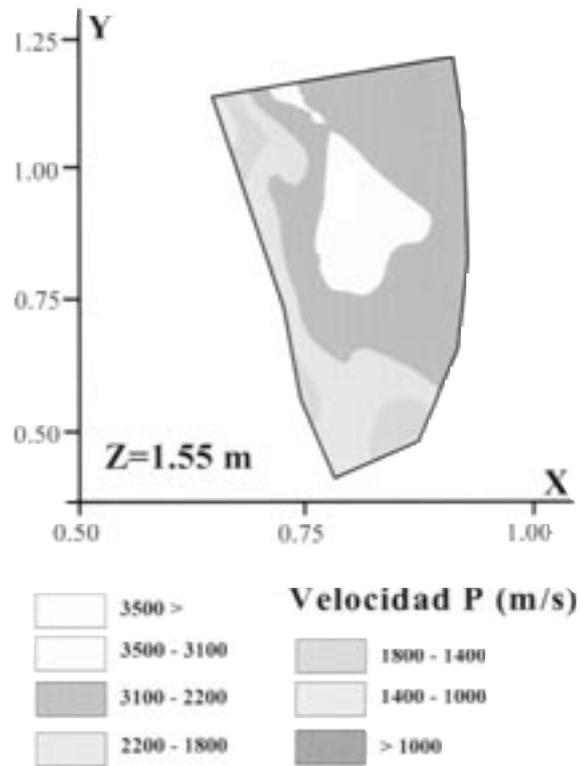


Fig. 12. Un tomograma es una “imagen física” del interior de un cuerpo; no es un mapa geológico de la masa rocosa, sino un mapa en falso color de los diversos valores de la propiedad física utilizada, en este caso velocidad de propagación de ondas P.

medio rocoso y de la evolución de su fisuración interna, pudiendo predecir situaciones de inestabilidad capaces de conducir al colapso final. También se utiliza para evaluar, a partir de la “memoria” tensional de las rocas, o efecto Kaiser (Montoto y Hardy, 1991), tensiones residuales en macizos rocosos.

Técnicas no destructivas, tomografía y Petrofísica

Los métodos convencionales utilizados para la caracterización tanto de los macizos rocosos como de la roca matriz suelen tener en común su carácter “destructivo”, sin embargo cada vez se van imponiendo más los de carácter no destructivo, NDT; en algunos casos particulares, como son los estudios conducentes a dictaminar el estado de alteración interna de piedras utilizadas en el Patrimonio Histórico, su uso resulta, en muchos casos, lógicamente imprescindible. Estas técnicas se basan en el tránsito de ondas elásticas, eléctricas, electromagnéticas, térmicas, etc. por el seno de la roca, dedu-

ciéndose a partir de su comportamiento durante el tránsito, las características litológicas y estructurales del medio geológico atravesado.

Dicha interpretación constituye uno de los cometidos más esenciales de la Petrofísica (Rider, 1986; Kobranova, 1989). Sin embargo, en tal interpretación surge, además de las dificultades señaladas en la Introducción, otras ausentes en Ciencia de Materiales donde las NDT son ampliamente utilizadas. Así, en los materiales creados por el hombre, las condiciones de su fabricación implican una composición conocida y uniforme. Por el contrario, las rocas son materiales formados por la naturaleza, bajo complejos procesos petrogenéticos y tectónicos, por lo que en su constitución petrográfica actual intervienen numerosas variables; el resultado es un material en el que permanentemente varía su porosidad, composición mineralógica, textura, anisotropías, estado de alteración, etc.; todo esto se refleja en la falta de homogeneidad de sus propiedades físicas y en la dificultad en interpretar, geológicamente, los datos obtenidos mediante NDT.

Una de las aplicaciones más prometedoras de las técnicas no destructivas en Geología es, sin duda, la tomografía o intento de “visionar” el interior del medio rocoso a todas sus escalas. Concretamente, la tomografía persigue, en su primer objetivo, la obtención no destructiva de “imágenes físicas” (Fig. 12) (conjunto de valores numéricos de una determinada propiedad física) del interior de un cuerpo mediante el análisis de señales (ultrasonidos, radar, rayos-X,...) que han sido enviadas a su través.

En lo que se refiere a la tomografía ultrasónica, una de las más utilizadas, se basa en los tiempos de tránsito (t_p) de ondas longitudinales enviadas desde posiciones E/R (emisor/receptor) conocidas, en la superficie del cuerpo rocoso, a través de recorridos internos desconocidos (Fig. 13). El conocimiento del recorrido seguido por la señal es, en general, el aspecto más crítico de la tomografía y, por descontado, el más interesante ya que la información que proporciona corresponde a la que ha ido atravesando la señal; así, en una masa rocosa, lógicamente no homogénea, la onda se transmite sufriendo constantes refracciones debido a que va atravesando zonas físicamente diferentes. El recorrido se deduce a partir de un

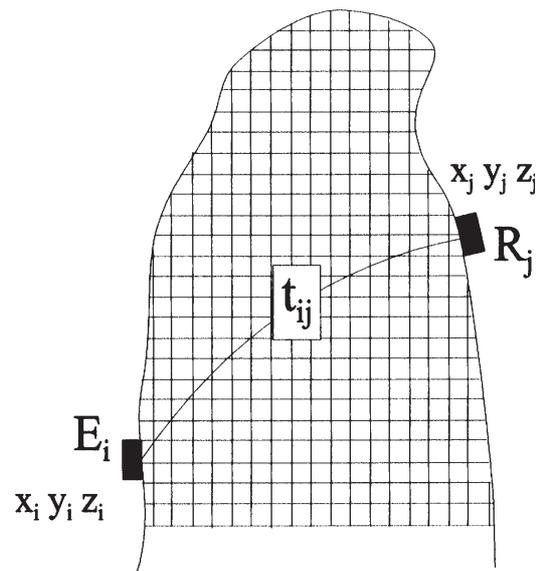


Fig. 13. En un medio no homogéneo y discontinuo, como es el rocoso, el tránsito de una señal física por su seno sigue un recorrido no rectilíneo, debido a constantes reflexiones y refracciones, deducido mediante proceso de algoritmos adecuados.

proceso informático mediante algoritmos adecuados; los algoritmos sencillos realizan una reconstrucción rectilínea del recorrido de la señal, proporcionando resultados que suelen ser poco realistas; por el contrario, otros algoritmos, mucho más complejos, realizan una reconstrucción basada en recorridos curvilíneos que son, sin duda alguna, mucho más realistas.

En síntesis la construcción de un tomograma ultrasónico implica las siguientes etapas: a) transmisión a través del cuerpo rocoso de una señal ultrasónica desde n posiciones E_i - R_j (emisor/receptor) de coordenadas conocidas, b) medición de los “tiempos de vuelo” ($t_{p_{ij}}$) para cada una de las n parejas E_i - R_j , c) asumir que el valor ($t_{p_{ij}}$) medido para cada pareja E_i - R_j integra el conjunto de valores particulares de (t_p) a lo largo de la zona de la roca por la que ha viajado la señal, d) aplicar algoritmos de reconstrucción tomográfica los cuales requieren los siguientes datos para cada pareja E_i - R_j : coordenadas (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) y valor $t_{p_{ij}}$, e) “subdivisión” del cuerpo rocoso en una matriz (2D ó 3D) de celdas regulares (pixels o voxels), f) deducción de los recorridos seguidos por las señales, g) asignación de “tiempos de vuelo” para cada celda y su conversión en velocidades de propagación (u otros pará-

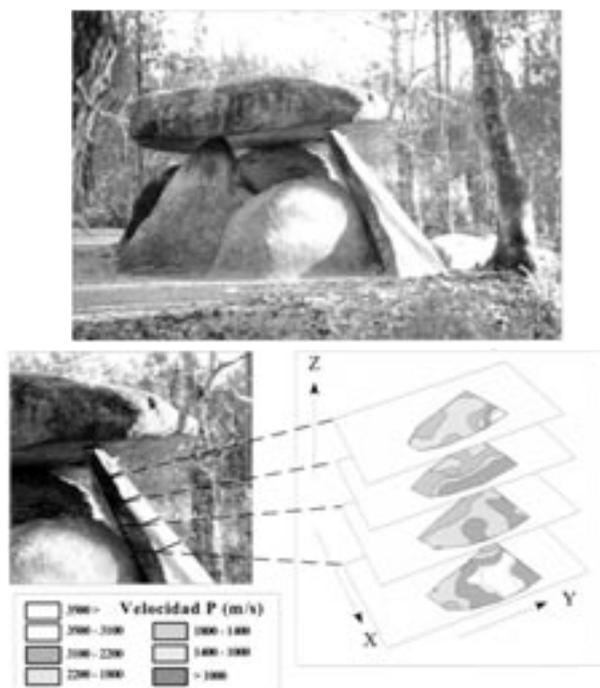


Fig. 14. Tomografía ultrasónica en un megalito granítico para evaluar su estado de alteración interna.

metros), h) elaboración de tomogramas o mapas de velocidades, i) interpretación petrofísica de los tomogramas en términos de litología, estructura, pre-

Bibliografía

- ADAMS L. H. and WILLIAMSON E. D. "The compressibility of minerals and rocks at high pressure". J. Franklin Inst. 195, pp. 475-529. (1923).
- ALONSO, F. J., ESBERT, R. M. y ORDAZ, J. "Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías". Bol. Geol. y Min., T. XCIII-IV, pp. 84-95 (1987).
- BRIGGS G. A. D., C. M. W. DAFT, A. F. FAGAN, T. A. FIELD, C. W. LAWRENCE, M. MONTOTO, S. D. PECK, A. RODRÍGUEZ-REY y C. B. SCRUBY. "Acoustic microscopy of old and new materials". En "Acoustical imaging". Ed. H. Shimizu, N. Chubachi and J. Kushibiki. pp. 1-16. Plenum Press. New York. (1989).
- DUNCAN, N. "Engineering Geology and Rock Mechanics" Leonard Hill (Londres, G.B.). Vol. 1. (1969).
- ESBERT, R. M.; PÉREZ-ORTIZ, A.; ORDAZ, J. y ALONSO, F. J. "Intrinsic factors influencing the decay of the granite as a building stone". 7th Int. Congress Int. Ass. Engng. Geology. Balkema (Rotterdam). ISBN 90 5410503 8. pp. 3659-3665. (1994).
- ESBERT, R. M.; ORDAZ, J.; ALONSO, F. J.; MONTOTO, M. "Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos". Ed. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos. Barcelona. 139 p. ISBN 84-87104-29-0. (1997).
- FRANKLIN, J. A. y DUSSEAUT, M. "Rock Engineering". McGraw-Hill Publ. Co. (1989).
- KOBRANOVA, V. N. "Petrophysics". Mir Publ. (Moscow). (1989).
- MARTEL, S. J. and PETERSON, J. E. "Interdisciplinary Characterization of Fracture System at the US/BK Site, Grimsel Laboratory, Switzerland" Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 28, No. 4, pp. 295-323. (1991).
- MARTÍNEZ-NISTAL, A. "Discriminación, cuantificación y cartografiado de componentes petrográficos mediante proceso digital de multi-íágenes mi-

sencia de discontinuidades, grado de meteorización, etc. de la roca tomografiada

El resultado final de un tomograma es, por consiguiente, una matriz de valores numéricos que cubre toda la masa rocosa. Su presentación gráfica se realiza en mapas en falso color que describen los diferentes rangos de valores de la propiedad física utilizada (Fig. 12). Por todo ello debe resaltarse que un tomograma no constituye un mapa geológico de la masa rocosa estudiada, sino una representación 2D o 3D de las variaciones de la propiedad petrofísica utilizada. El reto petrofísico lo constituye la adecuada interpretación geológica de los citados mapas físicos.

Más detalles sobre esta aplicación puede encontrarse en Montoto et al (1996) relativo a un ejemplo concreto (Fig. 14), la tomografía realizada en un cuerpo rocosa a pequeña escala, el Megalito de Axeitos (La Coruña).

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado mediante financiación procedente de diversos Organismos a los que deseamos expresar nuestra gratitud: Unión Europea (EC, Bruselas) y ENRESA (Madrid), proyectos pertenecientes al Programa de I+D sobre "Management and Disposal of Radioactive Wastes"; Fundación Paul Getty (Los Angeles, CA, USA) y CICYT (Madrid), proyectos relacionados con la conservación de rocas monumentales; CICYT y FICYT (Oviedo), equipamiento de microscopía láser-confocal.

croscópicas". Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo (España), Dpto de Geología (1993).

MENÉNDEZ, B. "Cuantificación de componentes petrográficos mediante técnicas de microscopía y estereología". Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo (España), Dpto de Geología (1992).

MONTOTO, M., L. MONTOTO, K. ROSHOFF, B. LEIJON. "Microfractographic study of heated and non-heated Stripa granite". Subsurface Space: Rockstore '80. Vol. 3, pp. 1357-1368. Pergamon Press. (1980).

MONTOTO, M. "Petrophysics: the petrographic interpretation of the physical properties of rocks". 5th. Int. Cong. of the Int. Soc. For Rock Mechanics, Melbourne (Australia), vol B, pp. 93-98 (1983).

MONTOTO, M., L. M. SUÁREZ DEL RÍO, A. W. KHAIR y H. R. HARDY. "AE in uniaxially loaded granitic rocks in relation to their petrographic character". En *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*. Trans Tech Publications, Clausthal, H.R. Jr. Hardy (Ed.), pp. 83-100. ISBN 0-87849-046-9. (1984).

MONTOTO M. and H.R. HARDY. "Kaiser effect in intact rock: current status as a feasible means of evaluating thermal and mechanical loading". Int. Gesellschaft für Felsmechanik. W. Wittke, Ed.; Balkema Publ. pp. 569-572 (1991).

MONTOTO M., A. MARTÍNEZ-NISTAL, A. RODRÍGUEZ-REY, N. FERNÁNDEZ-MERA-YO, P. SORIANO. "Microfractography of granitic rocks under Confocal Laser Scanning Microscopy". J. of Microscopy, vol. 177, Pt 2, pp. 138-149. (1995).

MONTOTO M., VALDEÓN L. and ESBERT, R. M. "Non-destructive tests in Stone Conservation: Tomography of the Axeitos (La Coruña, Spain) Megalith". En "Degradation and Conservation of Granitic Rocks in Monuments - Protection and Conservation of European Cultural Heritage". European Commission. ISBN 2-87263-166-6. pp. 281-287. (1996).

- MONTOTO M., M. T. MÉNAGER, A. RODRÍGUEZ-REY, B. MENÉNDEZ, A. MARTÍNEZ-NISTAL and N. FERNÁNDEZ-MERAYO. "Uranium transfer phenomena in rock matrix: petrophysical and geochemical study of El Berrocal experimental site, Spain". J. of Contaminant Hydrology vol. 21, pp. 35-46 (1996).
- MONTOTO M. "Microestructura de rocas y retardo de radionucleidos". Estratos, 40 pp. 12-17. (1996).
- MONTOTO, M.; HARDY H. R.; FERNÁNDEZ-MERAYO, N. and SUÁREZ DEL RÍO, L. M. "Microfractographic evolution of granitic rock cores during stress relief from deep boreholes: an AE/MS evaluation review". En "Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials". Trans Tech Publications, Clausthal. H. Reginald Hardy, Jr (Ed.), pp. 73-84. ISBN 0-87849-102-3. (1998).
- NERETNIEKS, I. "Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide migration?" J. Geophys. Res. 85, pp. 4379-4397 (1980).
- PRIEST S. D. "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", Chapman and Hall. (1993).
- RIDER, M. H. "The Geological Interpretation of Well Logs". Blackie, (Glasgow, UK). (1986).
- RODRÍGUEZ-REY A., G. A .D. BRIGGS, T. A. FIELD and M. MONTOTO. "Acoustic microscopy of rocks". J. Microscopy, Vol. 160, Pt 1, pp. 21-29. (1990).
- RUIZ DE ARGANDOÑA V. G., CALLEJA L. y MONTOTO M. "Determinación experimental del umbral de microfisuración térmica de la "roca matriz" o "intact rock"". Trabajos de Geología, 15 pp. 299-306 (1985).
- VALDEÓN, L.; ESBERT, R. M.; y GROSSI, C. M. "Hydric properties of some Spanish building stones: a petrophysical interpretation". Materials Issues in Art and Archaeology V. III, pp. 911-916. MRS. Edit. P.B. Vandiver, J. Druzik & G.S. Wheeler. (1993).