



La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación

R. M. ESBERT, F. J. ALONSO Y J. ORDAZ

*Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. c/Jesús Arias de Velasco, s/n. 33005 Oviedo. España
resbert@geol.uniovi.es*

Resumen: Se resalta la importancia de la petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación. Para ello se revisan las características petrográficas más significativas de las rocas (mineralogía y textura, incluyendo los espacios vacíos), así como las propiedades físicas que contribuyen a explicar su comportamiento respecto a los agentes de alteración. Se aportan datos de uno y otro aspecto referidos a rocas cristalinas y cementadas utilizadas en edificios históricos o actuales españoles. Las formas de alteración más frecuentemente exhibidas por las piedras de los edificios son mencionadas en relación con sus características petrofísicas. Se hace hincapié asimismo en la aportación de los estudios petrofísicos durante las diferentes etapas de intervención de un edificio o monumento. Dichos estudios resultan de gran utilidad especialmente en la fase de aplicación de productos de tratamiento, en la que las variaciones de algunas propiedades (ángulo de contacto y permeabilidad al vapor de agua), antes y después de aplicar los tratamientos, resultan determinantes para la valoración de su eficacia e idoneidad.

Palabras clave: Petrofísica, Piedra de edificación, Propiedades físicas, Deterioro, Conservación.

Abstract: The importance of petrophysics for the interpretation of deterioration and conservation of building stones is stated. For this purpose, the most significant petrographical characteristics of rocks (mineralogy and texture, including voids), as well as the physical properties that contribute to explain their behaviour in relation to weathering agents are revised. Some data about crystalline and cemented rocks used historical and present Spanish buildings are provided. The evidences of alteration most frequently shown by building stones are mentioned in relation with its petrophysical characteristics. The contribution of the petrophysical studies during the intervention works of a building or monument is also emphasized. These studies are of great usefulness especially in the phase of application of treatment products, where the variations of some properties (contact angle and water vapour permeability), before and after the treatments, become essential for evaluating their efficiency and suitability.

Key words: Petrophysics, Building stone, Physical Properties, Deterioration, Conservation.

Cuando se pretende profundizar en el estudio de los diversos procesos alterológicos que se desarrollan sobre los materiales pétreos de edificación, uno de los primeros aspectos que debe conocerse es la naturaleza petrográfica y las propiedades físicas de dichos materiales, es decir sus características petrofísicas (Montoto, 1983; Esbert et al., 1997; Montoto y

Esbert, 1999). Las propiedades físicas de los materiales rocosos son, de este modo, interpretadas en función de sus componentes petrográficos, pudiéndose establecer en los estudios petrofísicos dos ámbitos de actuación o trabajo: la escala de macizo rocoso (*rock mass*) y la escala de roca matriz (*intact rock*) (Montoto, 2004). La escala de macizo contiene grandes disconti-

nidades: fracturas, diaclasas, planos de estratificación, etc, cuyas características gobiernan, esencialmente, el comportamiento del macizo. La roca matriz, en cambio, se halla exenta de estas grandes discontinuidades, y hace referencia exclusivamente a las características intrínsecas de la roca. Trasladando estos conceptos al campo de la conservación y restauración de edificios, podría decirse que el macizo rocoso se correspondería con el edificio en su conjunto, mientras que la roca matriz equivaldría a los elementos básicos constructivos (sillar, loseta, ladrillo, etc.).

La interrelación entre componentes petrográficos y propiedades físicas no debe establecerse sólo basándose en criterios cualitativos. Existen ensayos, técnicas y procedimientos establecidos para la cuantificación de gran parte de las características petrográficas y físicas propias de un material rocoso. Dicha cuantificación permite, por ejemplo, interpretar -frente a igualdad de actuación de los agentes externos- los diferentes grados o intensidades de deterioro exhibidos por las piedras empleadas en una determinada edificación.

El “Grupo de Petrofísica, Alteración y Conservación de Materiales Pétreos”, del Área de Petrología y Geoquímica, del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, lleva unos treinta años inves-

tigando en este campo con una metodología de trabajo basada en los principios de la petrofísica. En el presente artículo se establecen los criterios petrográficos que deben tomarse en consideración para la interpretación de las propiedades físicas de las rocas, con especial mención de las técnicas instrumentales que, para su estudio, suelen utilizarse. También se hace un breve repaso a aquellas propiedades físicas que de modo más directo condicionan la alteración y la alterabilidad de dichas rocas; a la vez que se citan, a modo de ejemplo, datos petrofísicos referidos a piedras utilizadas en el patrimonio monumental arquitectónico.

Componentes petrográficos de significación petrofísica

Desde el punto de vista estrictamente geológico las rocas son agregados de materia mineral formados mediante procesos naturales y que constituyen una parte apreciable de la corteza terrestre. En arquitectura, el término roca suele restringirse generalmente a materiales geológicos consolidados, firmes y coherentes, tales como calizas, areniscas, mármoles, granitos. Algunas de estas rocas se extraen mediante métodos manuales, aunque en la actualidad la mayoría -granitos, mármoles, pizarras- se suelen extraer mediante corte con hilo diamantado, disco, etc.

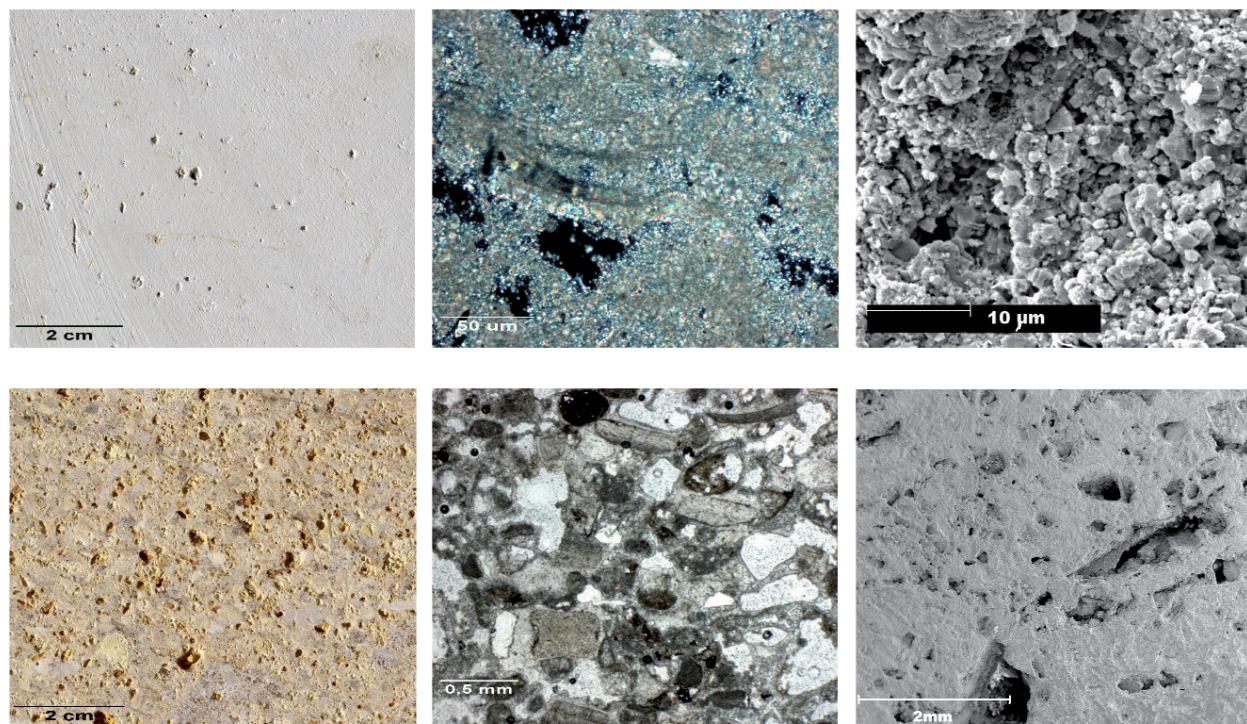


Figura 1. Aspecto macroscópico, al microscopio de polarización y al microscopio electrónico de barrido de las piedras de edificación de la catedral de Oviedo. Arriba: dolomía de Laspra. Abajo: caliza de Piedramuelle amarilla.

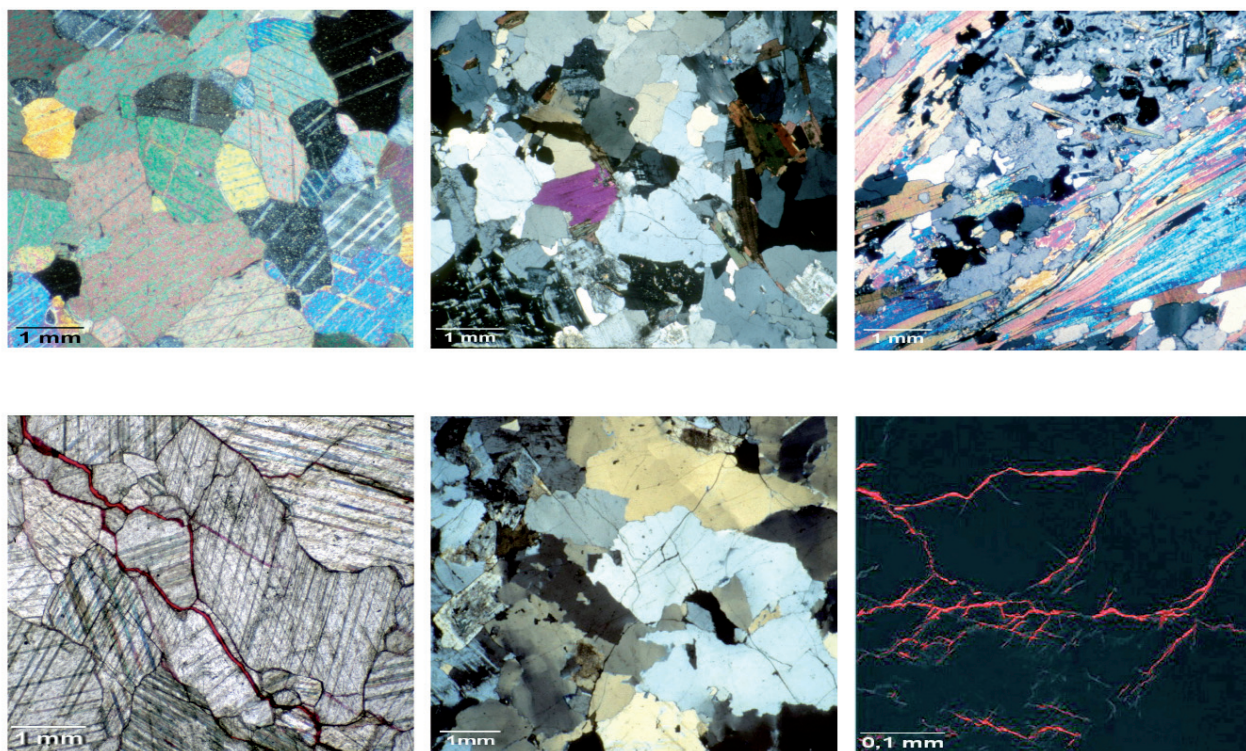


Figura 2. Arriba: Aspecto de tres rocas cristalinas al microscopio de polarización (mármol, granito y gneis). Abajo: Aspecto de las microfisuras presentes en dos rocas cristalinas (mármol y granito) observadas con microscopía óptica de polarización y microscopía láser confocal (la tercera).

Desde un punto de vista amplio, los componentes petrográficos que definen las características de las rocas y permiten interpretar sus propiedades físicas son en esencia la textura y la mineralogía. Dentro del concepto de textura -organización y relación espacial entre los diversos componentes- deben incluirse el tamaño y forma de los granos, así como los espacios vacíos, poros y fisuras. Estos últimos componentes son de gran significación en el campo de la alteración, ya que configuran la geometría del sistema poroso y, por tanto, condicionan la captación y movimientos de los fluidos –agua principalmente- por el interior de la roca. En el análisis del sistema poroso interesa conocer no sólo el volumen ocupado por los huecos o vacíos interconectados o no, sino también los rasgos geométricos de éstos: accesos, grado de conexión (conectividad), tortuosidad de los conductos... (Alonso et al., 1987).

Algunos autores resaltan la importancia de los espacios vacíos (huecos) de las rocas en el campo de la construcción, puesto que, cuando se realiza un estudio petrográfico de aplicación ingenieril, debe tenerse presente que poros y fisuras son probablemente los “minerales” más importantes (Franklin, 1974). Por ejemplo, en las piedras de edificación (calizas y dolo-

mías) de la catedral de Oviedo (España) se reconoce una clara relación entre la alteración química de las mismas, su tamaño de grano y la porosidad asociada. Así, la dolomía micrítica de Laspra, microporosa, con multitud de pequeños poros, con radios de acceso inferiores a $0,1\ \mu\text{m}$, tapizando toda la masa rocosa, se altera, en igualdad de condiciones, mucho más que otra roca carbonatada utilizada también en la catedral (caliza de Piedramuelle), con granos y poros de mayor tamaño (radio de acceso alrededor de $0,6\ \mu\text{m}$) (Fig. 1).

De este modo, los espacios vacíos, poros y fisuras y su geometría tridimensional, constituyen las características texturales más significativas para interpretar los aspectos relacionados con el comportamiento alterológico y la durabilidad de los materiales pétreos. Esto condiciona toda una serie de propiedades hídricas, relacionadas con el comportamiento de las rocas frente al agua: absorción y desorción, succión capilar, permeabilidad al vapor de agua, expansión hídrica, etc.; propiedades todas ellas que, a su vez, influyen en los procesos de alteración y de degradación física y química de las rocas.

En cuanto a la mineralogía, es necesario tener en cuenta tanto la naturaleza de las diferentes

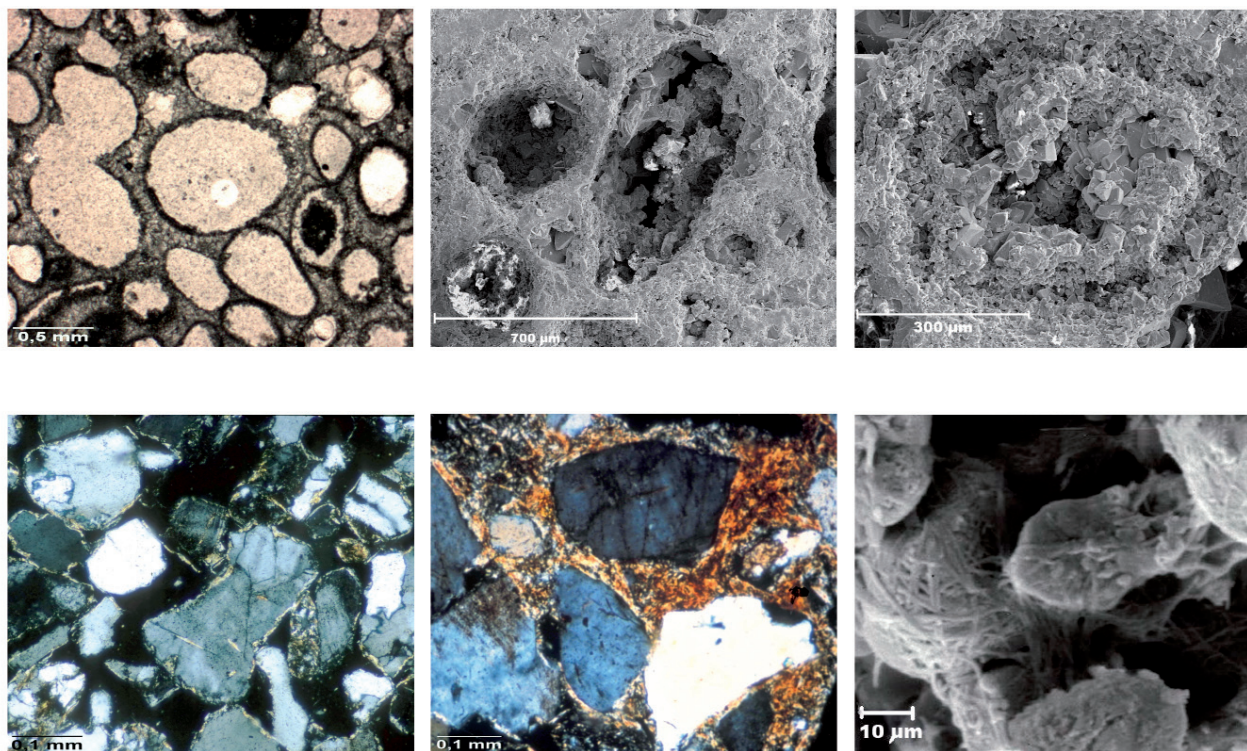


Figura 3. Arriba: Aspecto al microscopio óptico de polarización (la primera) y al electrónico de barrido de una caliza cementada (oolítica). Abajo: Aspecto de una arenisca con matriz detrítica al microscopio óptico de polarización y al electrónico de barrido (la tercera).

especies minerales como las proporciones relativas (porcentajes) y el grado de alteración de las mismas, puesto que estos aspectos condicionan de modo decisivo el comportamiento del material pétreo frente a la acción de los agentes externos.

Para el análisis de estas características mineralógicas y texturales existen hoy en día variadas técnicas de observación y cuantificación: microscopía óptica de polarización con luz transmitida, reflejada y fluorescente; microscopía electrónica de barrido; microscopía láser confocal; microscopía acústica; proceso digital de imágenes, etc. En lo que se refiere al estudio de la composición química, las técnicas de análisis más utilizadas son: fluorescencia de rayos X, cromatografía iónica, espectrometría de emisión por plasma de inducción, microanálisis por energía dispersiva de rayos X, etc. El carácter de las uniones intergranulares es otro de los rasgos estructurales de las rocas que más condicionan su aplicabilidad y durabilidad. Por ello tiene sentido petrofísico establecer una clasificación de rocas basada en la naturaleza de tal característica. Se hablaría así de: rocas cristalinas y cementadas (Montoto, 1983).

Las rocas cristalinas son aquellas que presentan sus componentes minerales cristalizados y en contacto directo unos con otros, sin ninguna fase aglomerante. Tal es el caso de granitos, mármoles, pizarras, etc. Sus espacios vacíos suelen ser de tipo “fisura”, es decir, espacios vacíos suelen con tendencia planar. Las hay masivas como el mármol, las rocas graníticas, etc., foliadas como las pizarras y bandeadas como los gneis, migmatitas, etc. (Fig. 2). En general tienen valores bajos de porosidad abierta (entre el 0,5 y el 5%).

Las rocas cementadas presentan una fase aglomerante o de unión entre los granos minerales que las constituyen. Dicha fase puede tener diferente composición química, grado de cristalinidad o tamaño de grano, que los elementos que aglutina. Los espacios vacíos suelen ser de tipo “poro” (huecos con tendencia equidimensional) o conductos (huecos con tendencia cilíndrica), por lo general interconectados entre sí, con un mayor o menor grado de tortuosidad (Fig. 3). A este grupo pertenecen la mayor parte de las rocas sedimentarias: areniscas, calizas, etc. En general estas rocas suelen tener valores altos de porosidad abierta (entre el 5 y el 30%) y muy variables. También se incluyen dentro de las rocas cementadas las dolo-

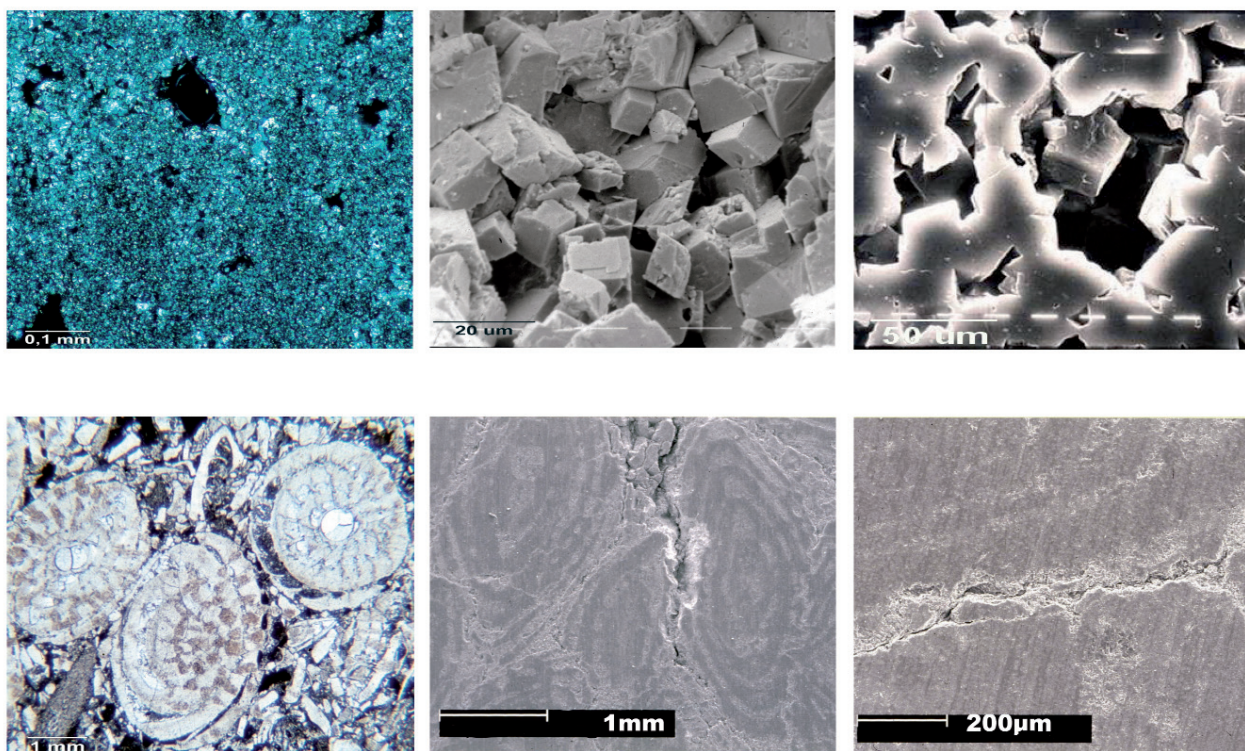


Figura 4. Arriba: Aspecto de una dolomía cristalina al microscopio óptico de polarización (la primera) y al electrónico de barrido. Abajo: Aspecto de una caliza cristalina al microscopio óptico de polarización (la primera) y detalle de las microfisuras detectadas entre los granos (nummulites) al electrónico de barrido.

más cristalinas, ya que entre sus cristales hay bastantes huecos y muestran una alta porosidad (p. ej. dolomía de Boñar) (Fig. 4).

Contrariamente hay calizas sedimentarias que deben incluirse dentro de las rocas cristalinas. Esto ocurre cuando la recrystalización genera un notable grado de cristalinidad en la caliza y, en consecuencia, la porosidad disminuye radicalmente (p. ej. caliza nummulítica de Girona). Este tipo de rocas admite pulido y se consideran comercialmente “mármoles” (Fig. 4).

Uno y otro tipo de rocas, cristalinas y cementadas, suelen mostrar valores diferentes en sus propiedades físicas. Así, debido a sus grandes variaciones texturales, las rocas cementadas suelen presentar gran dispersión en los valores de dichas propiedades, mientras que en las rocas cristalinas, más uniformes por lo general, la dispersión es menor. Por otra parte, y frente a los agentes de alteración, las rocas cristalinas suelen ser menos alterables, mostrándose las cementadas más proclives al deterioro y, en muchos casos, con una marcada alterabilidad diferencial de sus componentes petrográficos.

Propiedades físicas que inciden en el deterioro de la piedra

Varias son las propiedades físicas que en mayor o menor medida inciden en la alteración de los materiales pétreos de edificación y en especial de aquellos expuestos a la acción de la intemperie (Esbert y Ordaz, 1985; Esbert et al., 1989; Valdeón et al., 1992; Schön, 1996). Tales propiedades físicas pueden agruparse bajo los siguientes epígrafes:

- Propiedades básicas que caracterizan el aspecto y la constitución física de los materiales rocosos: color, densidad, porosidad y distribución porométrica.
- Propiedades hídricas: son las que caracterizan la captación, circulación y pérdida de agua por el interior de la piedra: absorción de agua (velocidad de absorción), desorción de agua (velocidad de evaporación), succión capilar, permeabilidad al vapor de agua y expansión hídrica o hinchamiento.
- Propiedades mecánicas: son las que caracterizan el comportamiento mecánico y deformacional: resistencia a la compresión, tracción y flexión, módulos de elasticidad y resistencia al choque.

d) Propiedades que caracterizan las cualidades de la superficie del material: resistencia a la penetración, abrasión y deslizamiento.

e) Propiedades térmicas: dilatación térmica.

f) Propiedades dinámicas: velocidad de propagación de ondas y módulo de elasticidad dinámico.

La medida, con normas estandarizadas, de estas propiedades en las variedades pétreas presentes en una edificación y su correlación con las características petrográficas resulta imprescindible para interpretar las lesiones alterológicas. Las normas y recomendaciones frecuentemente utilizadas han sido: ASTM (American Standard for Testing Materials), RILEM (Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayo de Materiales), CNR-ICR NORMAL (Centro Nazionale della Ricerca - Istituto Centrale del Restauro), UNE (Una Norma Española), etc. En la actualidad, de acuerdo con el Comité Europeo de Normalización (CEN), se han elaborado un conjunto de normas

Tabla I. Normas de ensayo utilizadas

PROPIEDADES BÁSICAS	
Densidad y porosidad	UNE-EN 1936:2007
Color	UNE-EN ISO 105-J01: 2000
PROPIEDADES HÍDRICAS	
Absorción de agua	UNE-EN 13755:2002
Evaporación	CNR-ICR NORMAL 29/88
Succión capilar	UNE-EN 1925:1999
Permeabilidad al vapor	CNR-ICR NORMAL 21/85
Hinchamiento	ISRM Doc. N°2, 1977
PROPIEDADES MECÁNICAS	
Resistencia a la compresión	UNE-EN 1926:2007
Módulo de elasticidad estático	UNE-EN 14580:2005
Resistencia a la flexión	UNE-EN 12372:2007
Resistencia a la tracción	ISRM, Doc N° 8:1977
Resistencia al choque	UNE-EN 14158:2004
PROPIEDADES DE SUPERFICIE	
Resistencia a la penetración	UNE-EN 14205:2004
Resistencia a la abrasión	UNE-EN 14157:2004
Resistencia al deslizamiento	UNE-EN 14231:2004
PROPIEDADES TÉRMICAS	
Dilatación térmica	UNE-EN 14581:2004
PROPIEDADES DINÁMICAS	
Velocidad del sonido	UNE-EN 14579:2004
Módulo de elasticidad dinámico	UNE-EN 14146:2004

européas agrupadas bajo las siglas EN y en versión española EN-UNE (Obis, 2000). En la Tabla I se recogen las normas utilizadas por el citado Grupo de Petrofísica, Alteración y Conservación en la caracterización petrofísica de las piedras de edificación.

Caracterización petrofísica de distintos tipos de piedra utilizados en edificación

En las Tablas II a V, se citan algunas rocas utilizadas en edificaciones monumentales en España. La Tabla II muestra la localización geográfica y geológica de las mismas; la Tabla III su clasificación petrográfica, junto a la composición mineralógica y el tamaño de grano como parámetro petrográfico más relevante; la Tabla IV las propiedades físicas básicas mencionadas (color, densidad y porosidad); y la Tabla V las principales propiedades relacionadas con el comportamiento de dichas rocas frente al agua (propiedades hídricas).

En el conjunto de rocas de la Tabla IV se pone de manifiesto que la porosidad abierta es mucho más elevada en las rocas cementadas (Villaviciosa, Quintanar, Igueldo, Piedramuelle Amarilla, Sepúlveda, Páramo y Laspra), que en las cristalinas (Macaél, Rosa Porriño y Fraguas). El tamaño medio de poro es variable y en cada roca puede relacionarse con la proclividad al deterioro que presenta.

En cuanto a su comportamiento frente al agua (Tabla V), las rocas cristalinas (Piedramuelle Roja, Macaél y Rosa Porriño) son las que tienen menor absorción de agua y menor capilaridad. Este hecho guarda relación con su menor porosidad y también con su menor tamaño de acceso de poro (Tabla IV). El granito de Fraguas está alterado e intensamente fisurado, lo que explica su relativamente elevada absorción de agua, en especial cuando tiene lugar por capilaridad. Las rocas cementadas tienen mayor absorción libre de agua y mayor capilaridad. Los mayores valores de capilaridad los presentan las rocas de elevada porosidad que a la vez presentan elevado tamaño de poro (Quintana, Sepúlveda, Igueldo...). Rocas de menor tamaño de poro también pueden presentar valores similares de capilaridad, debido a su mayor porosidad (Laspra). En cuanto a la permeabilidad al vapor de agua, los coeficientes obtenidos son muy variables, los más bajos y próximos entre sí se detectan en las rocas cristalinas de baja porosidad (Rosa Porriño y Macaél). Los valores más altos los presentan las areniscas (Igueldo, Quintanar, Villaviciosa) y las calizas micríticas (Laspra y Páramo).

TIPO DE ROCA	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA
Villaviciosa	Quintueles (Asturias)	Jurásico Superior (Formación Lastres)
Quintanar	Quintanar de la Sierra (Burgos)	Cretácico Inferior (Facies Weald)
Igueldo	Igueldo (San Sebastián)	Paleoceno Medio – Superior
Piedramuelle A*	Oviedo (Asturias)	Cretácico Superior (Formación Piedramuelle)
Sepúlveda	Sepúlveda (Segovia)	Cretácico Superior
Páramo	Campaspero (Valladolid)	Mioceno Superior
Laspra	Oviedo (Asturias)	Eoceno
Boñar	Boñar (León)	Cretácico Superior
Piedramuelle R*	Oviedo (Asturias)	Cretácico Superior (Formación Piedramuelle)
Macaël	Macaël (Almería)	Complejo Nevado Filábride
Rosa Porriño	Porriño-Mos (Pontevedra)	Carbonífero Superior – Pérmico
Fraguas	Pena da Croa-Fraguas (Lugo)	Carbonífero Superior – Pérmico

*Piedramuelle A: amarilla o de grano grueso, Piedramuelle R: roja o de grano fino (Alonso et al., 1999).

Tabla II. Localización geográfica y geológica de algunas piedras de edificación

TIPO DE ROCA	CLASIFICACIÓN	COMPOSICIÓN	TAMAÑO DE GRANO
Villaviciosa	Arenisca (subarcosa)	Q (70%), Fp (15%), FR (10%), Fs (5%)	Arena media (0,40 mm)
Quintanar	Arenisca (sublitarénita)	Q (70%), FR (13%), Fp (10%), Fs (7%)	Arena media (0,45 mm)
Igueldo	Arenisca (subarcosa)	Q (80%), Fp (12%), Fs (8%)	Arena fina (0,15 mm)
Piedramuelle A*	Caliza (biosparita)	C (87%), Q (10%), Fs (3%)	Arena gruesa (0,8 mm)
Sepúlveda	Caliza (biosparita)	C (98%), Q (2%)	Arena gruesa (0,7 mm)
Páramo	Caliza (dismicrita)	C (96%), Fs (3%), Q (1%)	Micrita (1 μ)
Laspra	Dolomía micrítica	D (95%), Fs (5%)	Dolomicrita (2 μ)
Boñar	Dolomía cristalina	D (83%), C (13%), Q (4%)	Doloesparita (60 μ)
Piedramuelle R*	Caliza cristalina	C (70%), Q (15%), Fs (15%)	C (0,5 mm), Q (0,1 mm)
Macaël	Mármol	C (100%)	Medio (2 mm)
Rosa Porriño	Granito	Q (30%), Fp (60%), Fs (10%)	Grueso (10 mm)
Fraguas	Granito	Q (40%), Fp (50%), Fs (10%)	Medio (3 mm)

*Piedramuelle A: amarilla o de grano grueso, Piedramuelle R: roja o de grano fino (Alonso et al., 1999).

Q = Cuarzo, Fp = Feldespatos, FR = Fragmentos de roca, Fs = Filosilicatos, C = Calcita, D = Dolomita.

Tabla III. Características petrográficas. Q, Cuarzo; Fp, Feldespatos; FR, Fragmentos de roca; Fs, Filosilicatos; C, Calcita; D, Dolomita.

La conservación de la piedra

La agresión a la que se ve expuesta la piedra de los edificios, especialmente los emplazados en áreas urbanas e industriales, induce al deterioro de la misma. Dicho deterioro se manifiesta por el desarrollo, en mayor o menor medida, de diversas formas de alteración (Esbert et al., 2005): descohesión, desagregación, descamación, desplazación, eflorescencias salinas, pátinas de diversa índole, costras negras, etc. En ocasiones, la degradación de la piedra resulta tan avanzada que es aconsejable no solo su limpieza superficial, sino la aplicación de algún producto de tratamiento que mejore su percepción estética, coherencia y durabilidad.

Dentro de los estudios previos de conservación de edificios se incluyen los relativos al diagnóstico del estado de deterioro de la piedra y de otros materiales de construcción (p. ej. ladrillos, morteros, etc.). En dicha fase los estudios petrofísicos proporcionan una herramienta fundamental a la hora de establecer el grado de deterioro de los distintos materiales, así como para averiguar las causas y mecanismos que han dado lugar al mismo y a las distintas formas de alteración.

Una vez puesta en marcha una obra de intervención de un edificio, ésta suele comportar varias etapas a fin de mantener la piedra en las mejores condiciones: limpieza, consolidación, protección, reintegración y sustitución. En el desarrollo práctico de estas etapas

TIPO DE ROCA	Color: Munsell	Densidad de la roca (kg / m ³)	Porosidad abierta (%)	Tamaño de poro ¹ (μ)
Villaviciosa	beis: 10YR 8/3	2080	21,3	8
Quintanar	beis: 10YR 8/2	2130	19,5	10
Iguelo	beis: 10YR 7/4	2110	20,4	3,5
Piedramuelle A*	amarillo: 2,5Y 8/4	2150	19,6	0,6
Sepúlveda	rosa: 2,5YR 8/2	2190	19,3	3,5
Páramo	blanco: 10YR 8/1	2090	21,4	0,03
Laspra	blanco: 10YR 8/1	2140	29,1	0,1
Boñar	beis: 10YR 8/2	2500	9,5	0,12
Piedramuelle R*	rojo: 2,5 YR 6/4	2590	4,3	-
Macael	blanco: 5B 9/1	2710	0,5	0,1
Rosa Porriño	rosa: 10R 7/4	2620	0,9	0,03
Fraguas	gris: N8/N7	2500	5,5	0,1

*Piedramuelle A: amarilla o de grano grueso, Piedramuelle R: roja o de grano fino (Alonso et al., 1999).

¹Tamaño medio de acceso de poro obtenido por porosimetría de inyección de mercurio.

Tabla IV. Propiedades físicas elementales. (1 tamaño medio de acceso de poro obtenido por porosimetría de inyección de mercurio).

TIPO DE ROCA	Absorción de agua a presión atmosférica		Evaporación		Absorción capilar	Permeabilidad al vapor de agua
	Contenido en agua (%)		Contenido en agua (%)		Coeficiente C (g/m ² x s -)	Coeficiente K _v (g/m ² x 24 h)
	2 días	7 días	2 días	7 días		
Villaviciosa	5,4	5,6	0,15	0,03	40,8	180
Quintanar	5,9	6,3	0,6	0,09	100	190
Iguelo	5,8	6,4	0,8	0,29	63,3	220
Piedramuelle A*	5,5	6,1	1,4	0,01	28,3	90
Sepúlveda	5,5	6,0	0,38	0,14	63,4	110
Páramo	9,4	9,8	3,1	0,7	30,0	160
Laspra	11,3	11,7	1,99	0,40	60,0	190
Boñar	2,3	2,6	0,6	0,1	3,34	50
Piedramuelle R*	1,5	1,7	0,50	0,32	5,67	40
Macael	0,17	0,18	0,04	0,01	0,66	20
Rosa Porriño	0,41	0,42	0,19	0,13	14,5	60
Fraguas	1,83	1,93	0,31	0,24	30,5	100

*Piedramuelle A: amarilla o de grano grueso, Piedramuelle R: roja o de grano fino (Alonso et al., 1999).

Tabla V. Propiedades hídricas.

los estudios petrofísicos resultan asimismo imprescindibles tanto para seleccionar los métodos, agentes y productos a utilizar como para valorar su grado de eficacia e idoneidad.

Cuando se aplican productos de tratamiento (consolidantes o hidrofugantes) es habitual la medida, antes y después de aplicar los productos, de ciertas propiedades físicas, como las previamente mencionadas: color, porosidad, succión capilar, permeabilidad al vapor, velocidad de propagación de

ondas...; así como la absorción de gotas y el ángulo de contacto (Esbert, 1998; Laurenzi Tabasso y Simon, 2006; Rojo et al., 2008). La determinación de estas propiedades suele acompañarse, por lo general, de los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento artificial acelerado a los que se someten las probetas tratadas. En los ciclos de envejecimiento se simula la actuación de los agentes de alteración propios del ambiente donde la piedra se ubica, a fin de intentar conocer el comportamiento futuro de la piedra tratada.

Agradecimientos

A la CICYT, por la financiación de diversos proyectos de investigación a lo largo del tiempo, entre ellos: “Durabilidad de rocas ornamentales cristalinas utilizadas en revestimientos exteriores: Criterios de calidad y suge-

rencias de uso” (MAT2004-06804-C02-01). Al Prof. Modesto Montoto, por facilitarnos algunas de las fotografías que ilustran el trabajo; así como al conjunto de colaboradores del Grupo de Petrofísica, Alteración y Conservación de Materiales Pétreos, del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.

Referencias

ALONSO, F.J., ESBERT, R.M. Y ORDAZ, J. (1987): Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Bol. Geol. y Min. de España*, 98 (2): 226-237.

ALONSO, F.J., ORDAZ, J., VALDEÓN, L., ROJO, A., DÍAZ-PACHE, F. Y ESBERT, R.M. Y (1999): Caracterización petrofísica de la caliza de Piedramuelle (Oviedo, Asturias). *Trabajos de Geología*, 21: 25-31.

ESBERT, R.M. (1998): Técnicas de consolidación y protección de la piedra. En: *Tratado de Rehabilitación: Patología y técnicas de intervención*. Editorial Munilla-Leire, 153-160.

ESBERT, R.M. Y ORDAZ, J. (1985): Alteración y alterabilidad de las piedras de la construcción: criterios petrofísicos y ensayos de laboratorio. *I Congreso de Patología de la Edificación*, C.O.A.C., Barcelona, 15 p.

ESBERT, R.M., MARCOS, R.M., ORDAZ, J., MONTOTO, M., SUÁREZ DEL RÍO, L.M., RUIZ DE ARGANDEÑA, V.G., CALLEJA, L., ALONSO, F.J. Y RODRÍGUEZ-REY, A. (1989): Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España. *Materiales de Construcción*, 39 (214): 37-47.

ESBERT, R.M., ORDAZ, J., ALONSO, F.J., MONTOTO, M., GONZÁLEZ LIMÓN, T. Y ÁLVAREZ DEL BUERGO, M. (1997): Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. *Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, 139 p.

ESBERT, R.M., MONTOTO, M., TIANO, P. AND FRATINI, F. (2005): The specific problems of monuments and art works and the contribution offered by characterisation. *Osnet Editions*, 15, EUR 20637/15, 91-107.

FRANKLIN, J.A. (1974): Rock quality in relation to the quarrying and performance of rock construction materials. *Proc. 2nd Cong. Int. Ass. Enging. Geology*. IV-PC-2, 1/11, Sao Paulo, 1-11.

LAURENZI TABASSO, M. AND SIMON, S. (2006): Testing methods and criteria for the selection/ evaluation of products for the conservation of porous building materials. *Reviews in Conservation*, 7: 67-82.

MONTOTO, M. (1983): Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *5th. Int. Cong. of the Int. Soc. for Rock Mechanics*, Melbourne, B: 93-98.

MONTOTO, M. (2004): *Petrophysics at the rock matrix scale: hydraulic properties and petrographic interpretation* (2004). ENRESA, Publicación Técnica 11/2003, Madrid, 297 p.

MONTOTO, M. Y ESBERT, R.M. (1999): Petrofísica de la roca matriz. *Trabajos de Geología*, 21: 239-252.

OBIS, J. (2000): Situación actual de los trabajos de normalización desarrollados por el CEN en el sector de la piedra natural. *Roc Màquina*, 63: 30-32.

ROJO, A., MATEOS, F. AND VALDEÓN, L. (2008): Consolidation of granite building stones used in continental climates: San Juan de los Reyes Church in Toledo, Spain. *The International Symposium: Stone, Consolidation in Cultural Heritage* (J. Delgado y J. M. Mimoso, Eds.), Lisboa, 213-222.

SCHÖN, J. H. (1996): Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of Petrophysics. Ed. Pergamon. 583p.

VALDEÓN, L., ESBERT, R.M. AND GROSSI, C.M. (1992): Hydric properties of some Spanish building stones: a petrophysical interpretation. *Materials Issues in Art and Archaeology*, 267:911-916.