

Durabilidad de las cuarcitas de A Fonsagrada (Lugo, España) explotadas como rocas industriales

Durability analysis of the A Fonsagrada quartzites (Lugo, España) exploited in civil engineering

Ana P. Pérez Fortes^{1*}, María J. Varas Muriel^{2,3}, Herminia Cano Linares¹, Rafaela Marfil Pérez³, Pedro Castiñeiras García³

Palabras clave

cuarcitas;
características
petrográficas y
petrofísicas;
durabilidad;
agentes medioambientales
(agua, temperatura y
NaCl);

Sumario

En la actualidad, las cuarcitas extraídas en A Fonsagrada (Lugo) se emplean como áridos de machaqueo en edificación y obra civil, especialmente en pavimentos y capas de rodadura. Debido a estos usos específicos, es interesante realizar una primera caracterización petrográfica y petrofísica de estos materiales mediante diferentes técnicas y ensayos que puedan servir para valorar después su durabilidad.

La finalidad de este trabajo es determinar el comportamiento a largo plazo de los materiales de estudio, de acuerdo a sus características intrínsecas más relevantes y bajo el efecto de ciertos agentes medioambientales mediante ensayos tradicionales y otras técnicas analíticas procedentes de otros campos de caracterización de los materiales. Teniendo en cuenta las condiciones climáticas de alta montaña del entorno de A Fonsagrada y su uso como árido en capas de rodadura, se ha hecho un estudio del comportamiento de la piedra mediante ensayos de durabilidad (heladicidad y choque térmico). También se ha querido simular el efecto de la sal (NaCl) como reductor del punto de congelación del agua en pavimentos y carreteras, incluyéndose este elemento en los ensayos de durabilidad realizados.

Este estudio demuestra que la denominación comercial de cuarcita en estos materiales no es idónea. En realidad las rocas extraídas son rocas sedimentarias ricas en cuarzo (cuarzarenitas). La presencia de matriz y porosidad hace que estas rocas sean menos resistentes a la degradación. El agua y la sal consiguen disgregar la piedra, por lo que no presentan unas propiedades óptimas para su uso en pavimentos o capas de rodadura.

Keywords

quartzite;
petrophysical and
petrographical properties;
durability;
environmental agents
(temperature, water and
NaCl);

Abstract

Nowadays, the quartzite exploited in A Fonsagrada, Lugo (Spain) are used as crushed aggregates in building and civil engineering, especially in pavements. For this reason, it is interesting to characterize and evaluate the long term behaviour of these materials with several techniques and standard tests.

The aim of this work is evaluate the long term behaviour of the analyzed materials in function of several parameters when they are subjected to different environmental agents with different durability tests. The erosive agents considered have been the extreme temperatures, water and salts (NaCl) because these rocks are usually used in pavements subjected to mountain weather conditions and NaCl is generally used as a de-icer chemical in roads of the North of Spain.

This study has revealed that, petrographically, the quartzite exploited is really a quartzarenite. The quartzarenite analysed present clay matrix and porosity. For these reasons, they are less resistant to the action of the erosive agents selected than quartzite rocks. After durability testing, water and NaCl get disintegrated the rock. Therefore, these materials should not be used in pavements.

1. INTRODUCCIÓN

Galicia es la primera productora nacional de “cuarcitas” como piedra natural si bien, dentro de este término comercial, se engloban sobre todo cuarcitas más o menos esquistas, areniscas, cuarzoesquistas y esquistas más o menos silíceos (Ferrero Arias et al., 2006).

La actividad extractiva actual en Galicia se concentra, sobre todo, en las unidades geológicas del Cámbrico-Ordovícico inferior: cuarcita superior de Cándana, cuarcita de O Xistral, Serie de los Cabos y cuarcita Armoricana

(Ferrero Arias et al, 2006). En concreto, en este trabajo se han analizado muestras obtenidas de una explotación activa situada en la comarca de A Fonsagrada (Lugo, España), dentro de las capas superiores del Río Eo (fig. 1), pertenecientes a la Serie de los Cabos (Ferrero Arias, 2005).

Estas “cuarcitas” son extraídas de una cantera de tipo ladera de gran dimensión constituida por un único frente de extracción (Ferrero Arias, 2005), donde se procesan como áridos de machaqueo y se comercializan para edificación y obra civil, principalmente para capas de rodadura. Como cada vez son mayores los requerimientos de calidad exigidos a los materiales de construcción y, en especial, a los empleados en edificación y obras públicas para usos especiales como son hormigones, balastos o capas de rodadura, es fundamental conocer las propiedades petrológicas y petrofísicas más relevantes de las rocas de estudio. A partir de dichas propiedades se podrá hacer una primera estimación de la calidad de la piedra mediante diferentes técnicas y ensayos

* Corresponding author: ana.p.perez@cedex.es

¹ Laboratorio de Geotecnia del Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

² Dpto. de Geomateriales. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM-CSIC), Madrid, España.

³ Dpto. de Petrología y Geoquímica. Facultad de CC. Geológicas (UCM), Madrid, España.

normalizados. Además, es importante conocer el comportamiento de los materiales una vez puestos en obra, por lo que se tiende a simular en el laboratorio las condiciones ambientales extremas más parecidas a las que sufren estas piedras una vez en uso (Esbert et al., 1997).

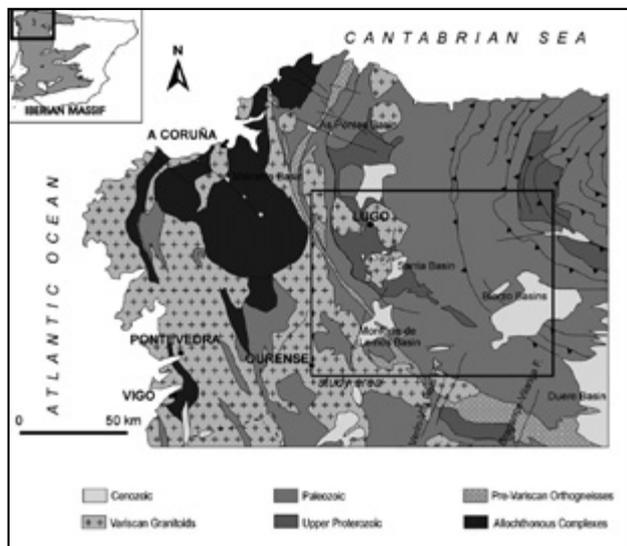


Figura 1. Esquema geológico de la zona en la que se encuentra la explotación de cuarcitas de A Fonsagrada (Martín-González, 2009).

Para conocer mejor el comportamiento a largo plazo de la piedra estudiada y en relación al clima de alta montaña del entorno de A Fonsagrada, con el dominio de bajas temperaturas y frecuentes precipitaciones en forma de nieve (Martínez Cortizas y Pérez Alberti, 2000), se han realizado ensayos de durabilidad o envejecimiento acelerado, relacionados con variaciones extremas de la temperatura.

En estos ensayos se incluyó NaCl por ser un elemento muy utilizado en carreteras y otros pavimentos de montaña para mitigar los efectos del hielo y la nieve, ya que reduce el punto de fusión del agua hasta los -21°C (Zaystev and Aseyev, 1992). Cuando llega el período estival, la sal esparcida puede permanecer en el pavimento o ser disuelta por las lluvias y depositarse en zonas colindantes (Buschbom, 1980; OECD, 1989; Pedersen et al., 2000), siendo uno de los responsables directos del deterioro que experimenta este tipo de obras públicas (Obika et al., 1989; Shi, 2005; Giuliani et al., 2012).

Finalmente, el objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de materiales pétreos de carácter metamórfico, actualmente en uso, frente a la acción erosiva del agua, las sales (NaCl) y las temperaturas extremas. Para ello, se van a combinar técnicas analíticas y ensayos normalizados tradicionales en la caracterización de las rocas de uso industrial con otras técnicas analíticas empleadas en otros campos de caracterización de los materiales. Dichas técnicas pueden ser una mejora en la evaluación de la calidad de los materiales por ser más rápidas, sencillas y económicas que las empleadas tradicionalmente.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las muestras empleadas se recogieron directamente en cantera, en función de su color y grado de alterabilidad “de

visu”. Se seleccionaron 3 bloques de piedra en rama (material obtenido directamente de voladura) de los que se cortaron 4 probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5 \pm 0,5$ cm, para analizar sus propiedades petrofísicas y evaluar su durabilidad. Además, se utilizaron otros fragmentos menores para la caracterización petrográfica.

La metodología empleada para cuantificar las propiedades petrográficas y petrofísicas de esta variedad pétreo y su evolución tras los ensayos de durabilidad (Pérez Fortes et al., 2012 y 2013), ha sido la siguiente:

1. La caracterización composicional y textural (UNE-EN 12407: 2007) de las muestras tomadas se hizo mediante *Microscopía petrográfica (MP)*, utilizando un microscopio óptico de luz polarizada (*Olympus BX51*) con cámara digital acoplada *Olympus DP12* ($6 \text{ V} / 2.5 \text{ \AA}$). Se realizaron láminas delgadas ($3 \times 2 \text{ cm} \times 30 \text{ \mu m}$) y se aplicaron dos tipos de tinciones, una roja con *Alizarin Red* para facilitar la distinción de la calcita y otra amarilla *Cobalto-Nitrato* para distinguir los feldespatos-K de las plagioclasas.
2. La presencia de poros y fisuras y su evolución tras los ensayos de durabilidad, fue constatada con la técnica de *Microscopía de fluorescencia (MF)*, utilizando el mismo MP (*Olympus BX51*), pero al que se le acopló una lámpara de mercurio *Olympus U-RFL-T*, con emisión de luz ultravioleta. Para hacer las muestras fluorescentes se embutieron con fluoresceína, antes de realizar las láminas delgadas ($3 \times 2 \text{ cm} \times 30 \text{ \mu m}$) (Varas-Muriel, 2012).
3. La caracterización mineralógica de las muestras se confirmó mediante la técnica de *Difracción de Rayos X (DRX)* por el método de polvo total (50 \mu m). Para ello, se empleó un equipo *Philips Analytical PW 1752* a 40 kV y 30 \AA m , con tubo de ánodo de Cu monocromador de grafito y software PC-ADP Difraccion. Las medidas fueron realizadas de modo continuado en un rango de 2 a 65° y con un intervalo de 0.02° min.
4. La técnica de *Fluorescencia de Rayos X (FRX)* sobre polvo total de la muestra se utilizó para conocer la composición química de los materiales de estudio. Se utilizó un equipo modelo *X PANalytical Axios Mineral*, con dispersión de longitud de onda y equipado con un generador de rayos X de alta potencia (4 kW).
5. La estructura de la red poral y la distribución porosimétrica ha sido cuantificada a través de la técnica normalizada de *Porosimetría por Intrusión de Mercurio* (De Santiago-Buey y Estaire-Gepp, 2008; ASTM D 4404-10). Se determinó la densidad aparente y real, la porosidad total accesible al mercurio, la morfología del poro, la distribución de los diferentes tamaños de poro y la relación macroporosidad/microporosidad, estableciéndose su límite en 5 \mu m de diámetro de acceso de poro (Russel, 1927; Rodríguez y Sebastián, 1994; Gómez-Heras, 2006a; Fort et al., 2011a, 2011b). La macroporosidad facilita la circulación de fluidos a través de las rocas pero la microporosidad los retiene favoreciendo la alteración de las mismas. Se empleó un equipo Micromeritics modelo Autopore IV 9500 cuyo rango de tamaño de poro es de $0.001\text{-}1000 \text{ \mu m}$, y la presión ejercida para la intrusión del Hg alcanza los 60000 psi .

6. Las propiedades dinámicas han sido determinadas mediante la técnica de *Propagación de las Ondas Ultrasónicas* (UNE-EN 14579: 2005). Se calculó a) la velocidad de propagación de las ondas P (V_p) a lo largo de los tres ejes ortogonales del espacio (x, y, z) y b) el grado de anisotropía de la piedra (Fort et al., 2008, 2011b). Para ello, se usó un equipo portátil modelo *Pundit CNS electronics LTS* con transductores de 54 KHz de frecuencia y 50 mm de diámetro. Los índices de anisotropía que se determinaron fueron la anisotropía total, $dM (\%) = [1 - (2V_{pmin} / (V_{pmed} + V_{pmax}))] \times 100$ y la anisotropía relativa $dm (\%) = [(2x(V_{pmax} - V_{pmed})) / (V_{pmed} + V_{pmax})] \times 100$ (Guydader and Dennis, 1986).

La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas depende de la densidad del material, de la porosidad existente y de los fluidos contenidos. Esta medida informa sobre la calidad del material y su estado de deterioro (altas velocidades implica materiales densos y poco porosos por lo que son más resistentes a la degradación). La anisotropía está relacionada directamente con la génesis de las rocas y con todos aquellos procesos de alteración que pueden haber sufrido las rocas con posterioridad. La anisotropía es la resistencia que ofrecen los materiales pétreos a los efectos de los diferentes agentes de deterioro, como el agua (Freire et al., 2010; Fort et al., 2011a).

7. Las propiedades hídricas de una roca están directamente relacionadas con su comportamiento frente a la acción, tanto química como física, del agua en su interior. Permiten interpretar procesos y mecanismos de alteración por lo que influyen en la durabilidad y resistencia mecánica de los materiales. Los ensayos realizados son *saturación al vacío* (UNE-EN 13755: 2002), *absorción y desorción de agua a presión atmosférica* (UNE-EN 1936: 2007; NORMAL 7/81). Los parámetros calculados fueron densidad real y aparente, porosidad abierta, saturación, compacidad, coeficiente de absorción libre y curvas cinéticas de absorción/desorción libre de agua.
8. Dentro de las propiedades mecánicas se ha estudiado la dureza de la piedra con un *Martillo de Schmidt* (ASTM D 5873-00) con el que se obtuvo la resistencia superficial de la roca al impacto del esclerómetro Digi Schmidt (2000) marca *Proceq Testing Instruments* (Betonprüfer Concrete Tester). El rango de medida de 10 a 60 unidades de Schmidt (US).
9. La medida de la rugosidad superficial se realizó con un Rugosímetro Óptico modelo Traceit patentado por Innowep GMBH (Bennett, 1992; Gadelmawla et al., 2002). El campo de medida es de 5x5 mm y la resolución de 2.5µm en los ejes x e y, siendo el número de datos recogidos en dichos ejes de 2000. Además de datos en 2D, con este equipo se pueden obtener mapas de topografía en 3D de 25 mm² de superficie. Los parámetros de rugosidad con los que se trabaja son R_a o media aritmética de todas las distancias absolutas de rugosidad, respecto a la línea media del perfil; R_q o desviación estándar de todas las distancias absolutas de rugosidad,

respecto a la línea media del perfil y R_z o diferencia entre la altura promedio de los cinco picos más altos y la altura promedio de los cinco valles más profundos (DIN-EN ISO 4287).

10. Para deducir la durabilidad de esta variedad pétreo se han seleccionado dos ensayos de envejecimiento acelerado o de durabilidad, normalizados, que reproducen las condiciones ambientales más agresivas a las que se ven sometidos estos materiales una vez colocados en obra (Bell, 1993). Los agentes combinados que intervienen son el agua, las sales (NaCl) y las temperaturas extremas.

a. El ensayo de *heladicidad* (UNE-EN 12371: 2002) reproduce el efecto de la variación cíclica de cristalización del hielo (invierno) en el interior de una roca que se encuentra saturada en agua y sales. Éste sería uno de los procesos de deterioro que puede sufrir un material expuesto a unas condiciones ambientales extremas (Freire et al., 2010). Este ensayo consistió en reproducir 35 ciclos de 24h de duración cada uno, donde durante 16h las probetas permanecieron sumergidas en agua destilada con NaCl disuelto al 22.5% y a temperatura ambiente, y las 8h restantes se sometieron a temperaturas de $-21 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, en un congelador.

b. El ensayo de *choque térmico* (UNE-EN 14066: 2003) analiza los efectos de las oscilaciones térmicas que sufren en superficie las rocas, acompañadas de variaciones en la humedad interna (Gómez-Heras et al., 2006b). Se simula el efecto de la lluvia (tormentas) que disuelve y arrastra sales sobre materiales pétreos sometidos previamente a un alto grado de insolación y con altas temperaturas (verano). Son 22 ciclos de 24h con periodos de 18h de inmersión en agua destilada con NaCl disuelto al 22.5% y a temperatura ambiente, seguidos de 6h de calentamiento a $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, en una estufa.

La evaluación de la durabilidad por efecto de estos dos ensayos se llevó a cabo estudiando las posibles variaciones acontecidas al final de los mismos, a través de la inspección visual de las probetas ensayadas (pérdida de material en aristas, caras o vértices, aparición de costras salinas y/o figuraciones, etc.), la determinación de la pérdida de peso y la nueva cuantificación de algunas propiedades petrográficas y petrofísicas para determinar la presencia de nuevas fisuras o cambios mineralógicos de interés y las propiedades estructurales, dinámicas y mecánicas (Esbert et al., 1997).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización petrográfica y petrofísica inicial de las cuarcitas de A Fonsagrada

La “cuarcita” de A Fonsagrada es una roca siliciclástica que, macroscópicamente, presenta una textura clástica y una composición general de cuarzo. Es de color gris claro azulado con moteado rojizo y su tamaño medio de grano es muy fino (0.125-0.063mm). Puntualmente está atravesada por venas blancas milimétricas. No se observaron

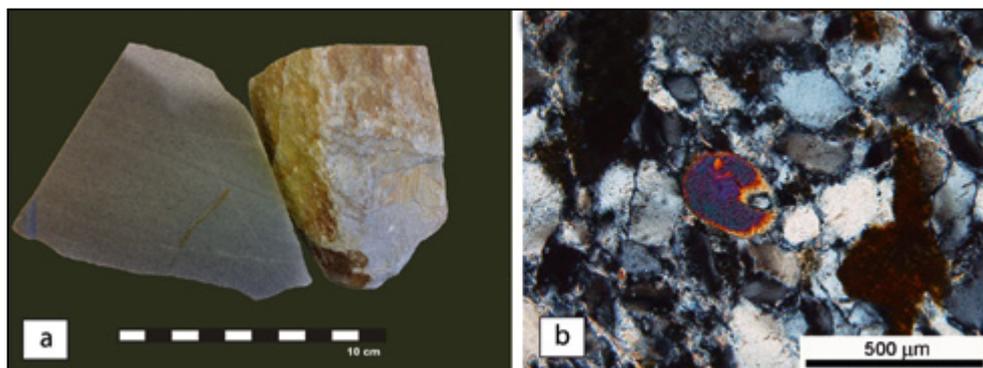


Figura 2. a) Muestra de mano de las rocas explotables de la cantera de estudio; b) Detalle al microscopio óptico y con nícoles cruzados de la roca. Presenta cementos sintaxiales de cuarzo y en parche de óxidos de hierro, matriz arcillosa de illita y minerales pesados (turmalinas).

componentes carbonáticos. El moteado de colores rojizos aparece superficialmente y puede deberse a la oxidación de diferentes compuestos de hierro (fig. 2a). Puntualmente está atravesada por venas blancas milimétricas. Es una roca muy compacta y rugosa al tacto en la que no se observa ningún tipo de porosidad.

El estudio mineralógico y químico efectuado mediante microscopía petrográfica (MP), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia (FRX) reveló que las principales fases minerales que aparecen en la muestra analizada son cuarzo y, en menor cantidad, illita y caolinita. Se han detectado también posibles trazas de microclina y calcita, además de moscovita, turmalina y otros minerales pesados (circón, apatito y rutilo) (fig. 2b).

El cuarzo es monocristalino y, en menor proporción policristalino. Presenta tamaños de grano muy finos, oscilando entre los 0.083 y los 0.11mm y bordes ligeramente suturados. La presencia de feldespatos es muy baja (<5%) debido a que están parcial o totalmente alterados a minerales de la arcilla (illita y caolinita) y que constituyen la matriz de la roca.

En general, los clastos son redondeados y están bien seleccionados (fig. 2b). Hay que mencionar que el cuarzo muestra una ligera orientación preferente y cemento syntaxial con bordes suturados (fig. 2b). Además de este cemento syntaxial de cuarzo, existe otro tipo de cemento compuesto por óxidos y oxi-hidróxidos de Fe, el cual aparece, bien en forma de parches, rellenando huecos, o bien en películas alrededor de los clastos (fig. 2b).

La matriz es escasa y está compuesta principalmente por illita y subordinadamente por caolinita ambas producto de la alteración de los feldespatos. La illita se encuentra alrededor de los poros con texturas tipo “pore-lining”. En ocasiones, la caolinita aparece impregnada por óxidos de Fe dando coloraciones marrones-rojizas muy características. La porosidad observada es muy baja (<5%), principalmente intergranular, aunque hay algo de porosidad intragranular asociada a la disolución de los feldespatos. El tamaño medio de poro ronda los 0.084mm.

El análisis bajo microscopio de fluorescencia confirma la presencia de porosidad intergranular asociada a la matriz arcillosa que procede de la alteración de los feldespatos. Dicha porosidad es muy irregular, puede aparecer interconectada y es de tamaño muy fino (<0.1μm). Se observan

además poros de mayores tamaños (10-25μm), aislados y dispersos por la lámina delgada relacionados con procesos de disolución parcial de los feldespatos presentes en la roca (fig 3a y b). Las zonas más afectadas por la pérdida de clastos son aquellas con mayores proporciones de matriz y de feldespatos alterados. No se detecta la presencia de fisuras inter-, intra- o transgranulares.

En función de los datos obtenidos, la muestra puede clasificarse como una *cuarzoarenita* (Pettijohn et al., 1987). Es decir, que este material se encuentra dentro del grupo de las rocas sedimentarias detríticas aunque presenta un grado incipiente de metamorfismo.

La estructura poral de la roca, analizada con la técnica de *porosimetría por intrusión de mercurio* refleja una densidad real de la roca de 2.66g/cm³ y una porosidad total accesible al Hg del 10% (tabla 1).

Tabla 1. Relación de parámetros obtenidos a partir de la técnica de porosimetría de Mercurio para las areniscas de A Fonsagrada.

Parámetros	Roca sana	Heladicidad	Choque térmico
ρ_{real}^* (gr/cm ³)	2.66	2.66	2.65
$\rho_{aparente}^{**}$ (gr/cm ³)	2.40	2.43	2.42
Porosidad total (%)	10.00	8.83	8.66
Microp.*** < 5μm (%)	87.00	92.00	93.00
Macrop.**** > 5μm (%)	13.00	8.00	7.00
Sup. Específica***** (m ² /gr)	3.67	3.52	3.58
Tamaño medio poro (μm)	0.04	0.04	0.04
Tortuosidad	206.00	20.00	4.65
Permeabilidad Hg (mdarcy)	0.1	9.00	262.00

* ρ_{real} = Densidad real
 ** $\rho_{aparente}$ = Densidad aparente
 *** Microp. = Microporosidad
 **** Macrop. = Macroporosidad
 ***** Sup. Específica = Superficie específica

La mayor parte de los tamaños de poro se encuentra por debajo de las 5μm de diámetro de acceso de poro, siendo el intervalo diámetro de acceso de poro más frecuentes el comprendido entre 0.1-1μm (>41%, fig. 4) y seguido muy de cerca por el intervalo de 0.01-0.1μm (>33%, fig. 4). Aunque el diámetro medio de acceso de poro se encuentra dentro del rango de la microporosidad (0.04μm, tabla 1), la forma de los mismos es bastante

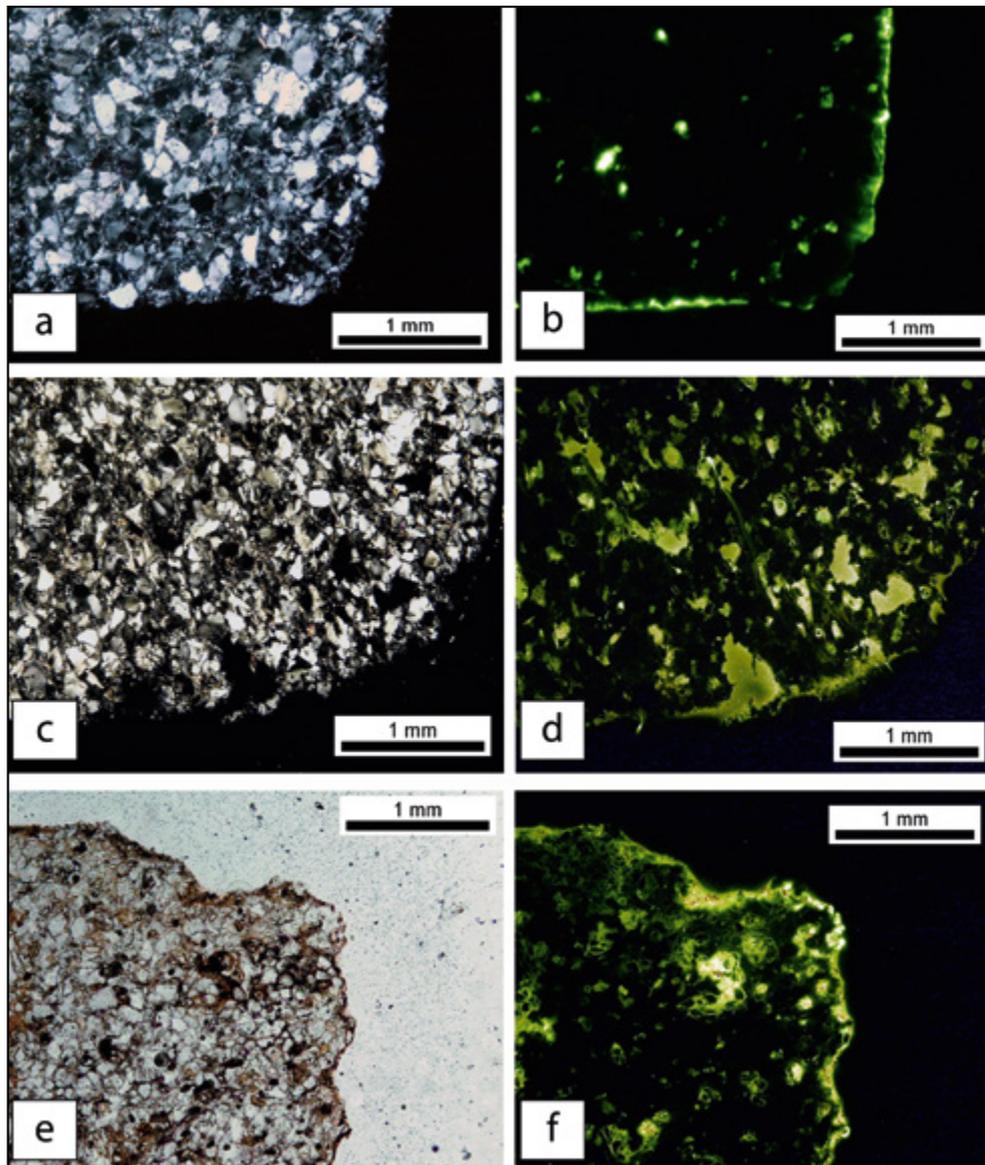


Figura 3. Detalle al MP con nículos cruzados (a) y al MF (b) de una de las probetas analizadas antes de los ensayos de durabilidad. Pérdida de material y apertura de porosidad fisural e irregular en los bordes de una de las probetas sometidas a hielo - deshielo (c y d). Intensa corrosión de los bordes y apertura de porosidad fisural e intragranular sufrida en una de las probetas sometida a choque térmico (e y f).

irregular (elevada superficie específica de $3.67\text{m}^2/\text{g}$, tabla 1). De esta manera, las conexiones capilares son bastante sinuosas (tortuosidad= 206, tabla 1) lo que dificulta la permeabilidad al mercurio de esta variedad pétreo (0.13mdarcy).

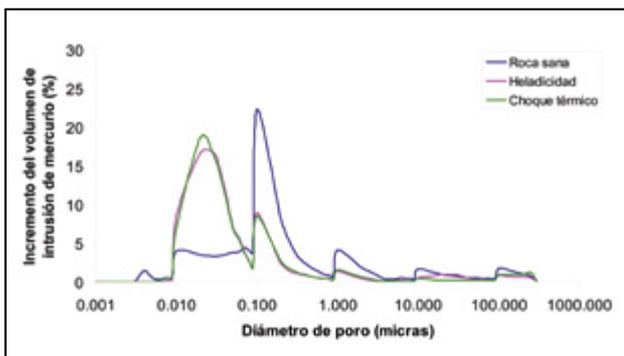


Figura 4. Distribución de tamaños de poro de las areniscas de A Fonsagrada y su evolución tras los ensayos de durabilidad.

Tabla 2. Valores medios de velocidad de propagación de ondas (Vp) medidos en las areniscas de A Fonsagrada y valores medios calculados de anisotropía total (dM) y relativa (dm).

Cuarцитas de Pena da Silvela	Vp (m/s)				dM (%)	dm (%)
	Vp (x)	Vp (y)	Vp (z)	Media		
Roca sana	4183	4199	4320	4248	14	8
Heladicidad	4155	4025	4556	4246	18	3
Choque térmico	3707	3510	3505	3574	24	10

La velocidad de propagación de las ondas P (Vp) es alta, en especial en el eje z (tabla 2) por lo que los valores de anisotropía relativa (dm) y total (dM) son muy diferentes entre sí (tabla 2) debido a la diferencia que muestra el eje z.

Los ensayos hídricos realizados muestran que estos materiales presentan una densidad real y aparente de aproximadamente $2.65\text{gr}/\text{cm}^3$, con una porosidad abierta media del 8-9%. El coeficiente de saturación es aproximadamente del 3%, mientras que el valor medio aproximado

de la absorción de agua a presión atmosférica es del 2%. Además, estos materiales tienen una capacidad de absorción del agua a presión atmosférica rápida y máxima en las primeras 24h de exposición al agua. Lo mismo ocurre en el caso del proceso de desorción o eliminación del agua por lo que este material pierde todo el agua que absorbe, no quedando nada retenida en su interior (fig. 5).

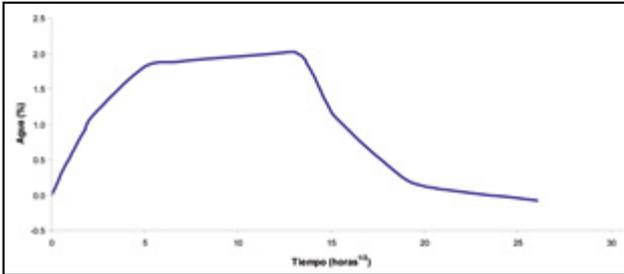


Figura 5. Curva de sorción-desorción de agua de las areniscas explotables en A Fonsagrada.

Los resultados obtenidos con el ensayo del *martillo de Schmidt* (tabla 3) reflejan una dureza media de aproximadamente 30 US aunque la dispersión de los datos obtenidos ha sido elevada lo que indica que los valores de dureza superficial en estas rocas son muy heterogéneos.

Tabla 3. Valores de dureza de las cuarcarenitas de A Fonsagrada obtenidos antes y después de los ciclos de hielo – deshielo.

Cuarcitas de Pena da Silvela	DUREZA. Unidades Schmidt 10-60 (R)			
	x	y	z	(Val. Medios)
Antes ciclos	32.1	29.3	28.9	30.1
Después ciclos hielo - deshielo	31.5	26.8	24.8	28.9
Después ciclos choque térmico	25,5	25,6	25,0	25.3

Los valores de rugosidad (R_a , R_q y R_z) medidos en las direcciones x e y (tabla 4) indican que no hay una anisotropía

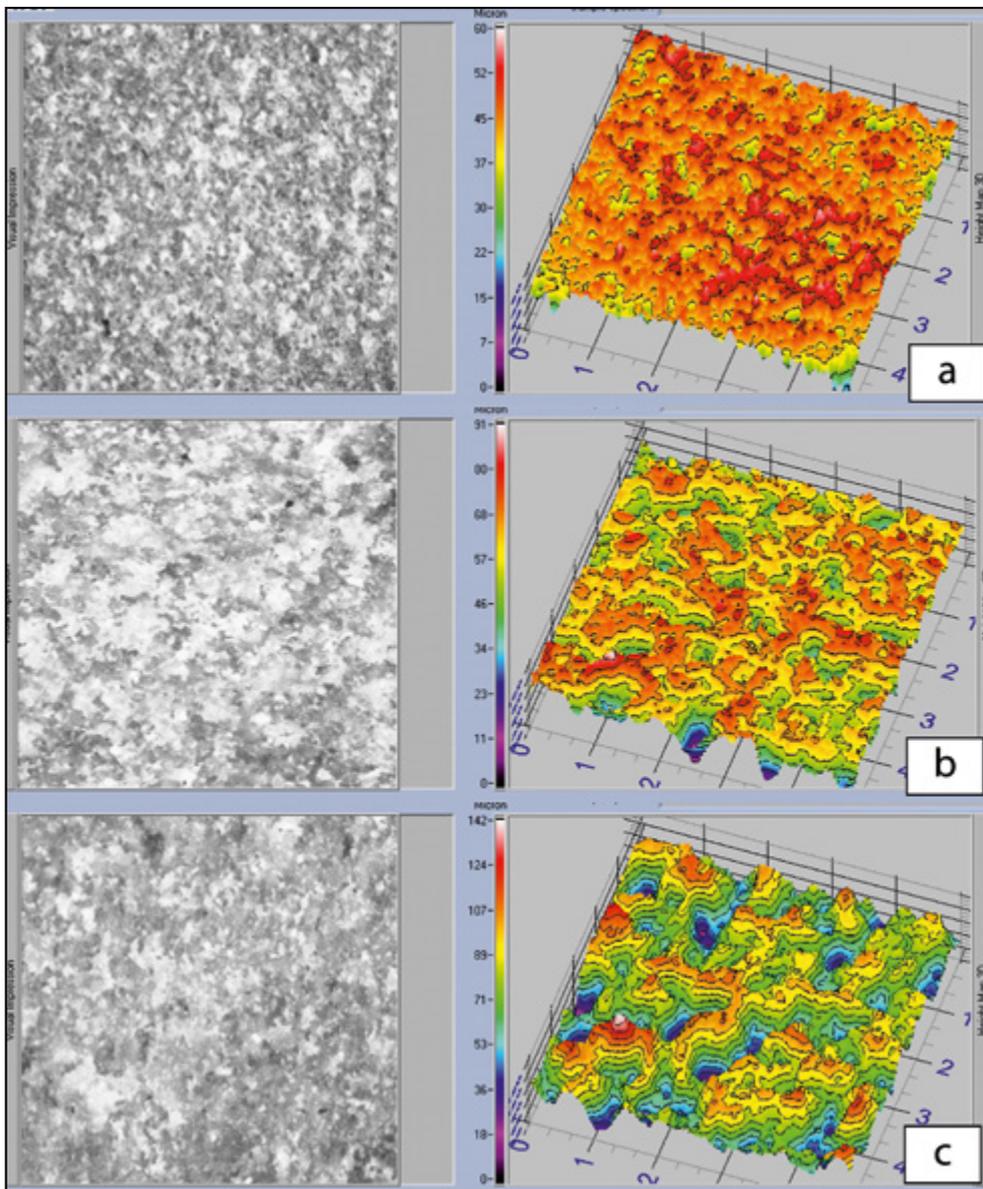


Figura 6. Representación tridimensional de la micro-rugosidad superficial de las areniscas de A Fonsagrada a) antes de los ensayos de envejecimiento; b) después del ensayo de heladicidad; c) después del ensayo de choque térmico.

marcada u orientación preferente de la rugosidad superficial de estas cuarzoarenitas. La similitud entre los valores de Ra y Rq y los valores de Ra próximos a 0 (fig. 6a) indican que la superficie de estas rocas es homogénea y poco rugosa.

Tabla 4. Evolución de los parámetros de rugosidad medidos para las areniscas de A Fonsagrada.

Areniscas de A Fonsagrada	Valores medios en x			Valores medios en y		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
Inalterada	2.87	3.83	14.25	2.69	3.51	12.87
Heladicidad	3.69	4.69	16.05	4.08	5.22	18.19
Choque térmico	5.96	7.53	24.62	5.04	6.36	19.85

3.2. Durabilidad de las cuarzoarenitas de de A Fonsagrada

Después del ensayo de *heladicidad*, se observó un considerable cambio en el color de esta variedad pétreo, pasó de gris a rojizo en las cuarzoarenitas estudiadas (fig.7a y b). A escala macroscópica, se detectó que la superficie de las probetas pasó a ser mucho más rugosa que al comienzo del ensayo debido a la formación de costras superficiales de NaCl y a la pérdida de granos de la superficie por disgregación. A pesar de ello, no se observó un desgaste importante ni en los vértices ni en las aristas de los cubos (fig. 7a y b).

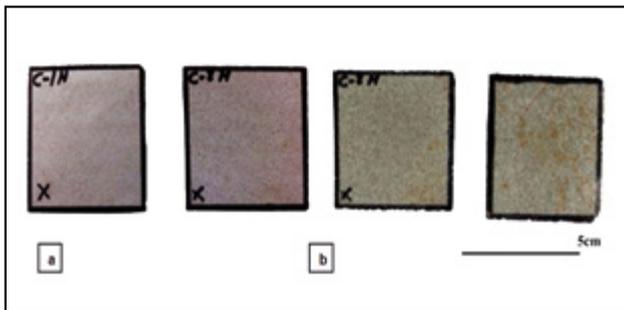


Figura 7. Detalle de la superficie de las probetas sometidas a los ciclos de hielo y deshielo antes (a) y después de los ensayos (b).

La microscopía óptica y de fluorescencia refleja una importante pérdida de granos en las aristas de las probetas, y en especial en los vértices de las mismas. Dicha pérdida de material ha ocasionado valles en dichos bordes que pueden alcanzar los 0.5mm de altura. También hay un aumento del tamaño de los poros intergranulares de hasta 0.5mm de grosor (fig. 6c y d). Dicha porosidad en ocasiones puede interconectarse entre si para dar poros de mayores tamaños, alcanzando valores casi milimétricos. Localmente se ha apreciado la formación de pequeñas fisuras (aproximadamente 2 μ m de espesor) que sólo afectan a la superficie del material.

La porosimetría de mercurio ha detectado una ligera disminución de la porosidad total en esta piedra (del 10 al 8.8% de la porosidad total accesible al Hg, (tabla 1). A pesar de ello, la microporosidad ha aumentado (del 87 al 92.4%), principalmente en el intervalo de tamaños de poro 0.01-0.1 μ m (fig. 4). El tamaño medio de acceso de poro y la superficie específica presentan valores similares antes y después del ensayo pero la tortuosidad ha disminuido considerablemente (conducciones capilares más

regulares y menos sinuosas), lo que ha favorecido la permeabilidad al Hg.

Las muestras ensayadas ganaron algo de peso durante el ensayo. Aunque se produjo una ligera disminución de los valores de Vp en el eje y (tabla 2), en el eje z los valores de Vp aumentaron. Además, la anisotropía total (dM) es más elevada y la anisotropía relativa (dm) más baja que en la variedad sana, lo que indica que se desarrolla una dirección clara de anisotropía relacionada con el eje z.

La dureza se reduce ligeramente en todos los ejes medidos en la roca después de este ensayo debido a la apertura de grietas visibles en estas caras y a la formación de costras de sal (tabla 3), siendo muy significativa la disminución de la resistencia al rebote a lo largo del eje "z".

Después del ensayo se ha producido un aumento en los valores de rugosidad (Ra, Rq y Rz) medidos en las direcciones x e y (tabla 4). Aunque Ra y Rq han aumentado, dichos parámetros siguen siendo similares lo que significa que no hay una anisotropía marcada de la rugosidad superficial (fig. 6b). El aumento de los valores de Ra y Rz con respecto al estado natural de la roca indica que la diferencia de alturas entre los picos y los valles de la superficie ha aumentado (fig. 6b).

Después de los ensayos de *choque térmico*, se observaron, a escala macroscópica pérdidas de material granular por disgregación, tanto en las aristas como en las caras y vértices de las probetas cúbicas. La superficie apareció mucho más rugosa e irregular que al comienzo del ensayo. Este material es de tipo clástico y de composición homogénea y simple lo que provoca que la disgregación sea acusada y generalizada en toda la superficie de la probeta. Se detectaron también venas blancas en relieve, es decir, más resistentes al choque térmico, y grietas oxidadas que se abrieron (fig. 8b y c) durante el ensayo de espesores casi milimétricos. Se produjo, además, un cambio de color desde el comienzo del ensayo debido probablemente a la migración y oxidación de compuestos de hierro.

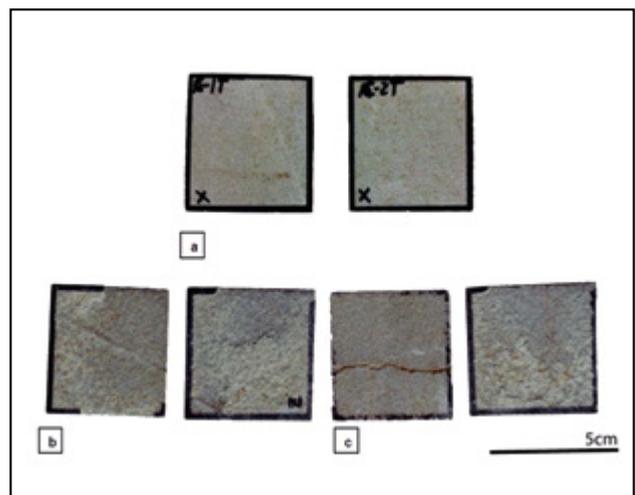


Figura 8. Detalle de la superficie de las probetas antes (a) y después (b) de someterse a los ensayos de choque térmico.

Mediante la microscopía óptica y de fluorescencia se ha observado una importante degradación de los bordes de las probetas analizadas, observándose superficies muy irregulares y pérdida masiva de granos. Además, se ha producido

un importante aumento de la porosidad intergranular asociada a la matriz arcillosa de la roca junto con un aumento del tamaño de la porosidad intergranular que previamente presentaba esta roca. De este modo, se han apreciado poros aislados de hasta 0.5mm de longitud y 0.25mm de espesor y un importante aumento de la interconexión de la porosidad intergranular. Se ha observado también la formación de fisuras especialmente intergranulares que afectan a la superficie de la piedra.

Los datos de porosimetría de mercurio muestran una ligera disminución de la porosidad, del 10% al 8.7%, (tabla 1). Además, se ha observado un considerable aumento de la microporosidad (87% a 93%), en concreto en el intervalo entre 0.01 y 0.1 μ m (tabla 1). Tanto el diámetro de acceso de poro (0.04 μ m, tabla 1) como la superficie específica (3.58m²/g, tabla 1) no han variado con respecto al material fresco, pero si se ha observado una considerable variación en cuanto a la morfología de los conductos capilares (tortuosidad= 5, tabla 1). Éstos son casi rectos y regulares, lo que se traduce en un importante aumento de la permeabilidad al Hg en esta roca (262.09mdarcy, tabla 1).

Se observó además una pérdida de peso >1% y una caída generalizada de Vp (tabla 2), en especial en el eje z. La disminución de las velocidades se tradujo en el aumento de la anisotropía total (dM) y relativa (dm). Los valores de dM aumentaron más que los valores de dm, indicando cambios en las tres direcciones del espacio aunque dichos cambios han sido más acusados en el eje z.

Después de este ensayo se detectó una caída muy acusada de los valores de dureza en los tres ejes con respecto a los valores iniciales (tabla 3), produciéndose incluso la rotura de alguna de las probetas durante el desarrollo del ensayo a favor de las grietas originas durante el ensayo.

Los valores de rugosidad también aumentaron (Ra, Rq y Rz) (tabla 4). Aunque los valores de Ra y Rq son elevados, siguen siendo similares entre sí, lo que significa que no hay una anisotropía marcada de la rugosidad superficial (fig. 6c). Es notorio el aumento de Rz con respecto al estado natural de la piedra (tabla 4). Esto indica que los valles ganan en profundidad y los picos en altura, marcándose una fuerte rugosidad superficial.

4. DISCUSIÓN

Geológicamente, la piedra que se explota en la cantera de A Fonsagrada son cuarzoarenitas (Pettijohn et al., 1987), rocas detríticas con un alto contenido en cuarzo en su esqueleto (>95%) y poca presencia de matriz arcillosa (<15%). El hecho de que esta roca tenga un origen sedimentario y no metamórfico, como cabría suponer su denominación comercial “cuarcita” implica que tanto la textura y mineralogía como las propiedades intrínsecas del material diferirán de la estimada inicialmente.

La caracterización petrofísica indica que estas rocas presentan una densidad similar a la del cuarzo mineral (2.66 gr/cm³) debido al alto porcentaje de cuarzo que presentan. La porosidad medida se encuentra en torno al 8-10%, es de tipo intergranular y está especialmente ligada a procesos de disolución y alteración de los feldspatos y de la matriz arcillosa de la roca. La diferencia entre la porosidad medida a presión atmosférica y la medida a 2KPa de presión es del 1% y refleja la presencia de

una porosidad atrapada en estas rocas (Esbert, 1997), es decir, una porosidad inaccesible al agua en condiciones atmosféricas normales. Esta porosidad inaccesible puede provocar daños futuros en la roca. Además, el dominio de la microporosidad y la morfología irregular de los poros y de la red poral detectada mediante la porosimetría de mercurio, sugiere que esta variedad pétreo puede ser susceptible a degradarse por la acción de agentes externos tales como el agua y las sales (Esbert, 1991; Varas et al., 2003).

La velocidad de propagación de las ondas P (Vp) en esta variedad pétreo es alta (Vallejo, 2002; De la Puente y Rodríguez, 2004), teniendo en cuenta que estas rocas se han clasificado dentro del grupo de las areniscas y son rocas anisótropas, es decir, que presentan una estructura interna con una orientación preferente. Dicha orientación preferente puede facilitar la degradación futura del material en esta dirección (Fort et al., 2008; Fort et al., 2011b).

Finalmente, en oposición a la estructura interna orientada que presentan estas rocas, se ha observado que su superficie es homogénea y no presentan una micro-rugosidad significativa.

Durante el ensayo de heladicidad, se produjo la formación de costras de NaCl en superficie junto con una ligera disminución de la porosidad total en esta piedra, lo que puede indicar la cristalización también de NaCl en el interior de la roca. Las muestras ensayadas ganaron algo de peso durante el ensayo lo que también señala una precipitación de NaCl, tanto en el exterior como en el interior de la roca. Estos resultados también se respaldan con las medidas de Vp que también aumentaron durante el ensayo.

Aunque la precipitación del NaCl hizo disminuir la porosidad total de la roca, también se observaron procesos de disgregación del material, tanto a escala macroscópica como microscópica, lo que se ha traducido en un aumento de los valores de la rugosidad superficial de la roca, lo que indica también una importante degradación del material a nivel superficial.

Durante el ensayo de choque térmico se ha producido una importante apertura de la porosidad a escala microscópica junto con la disgregación de material, tanto a escala macroscópica como microscópica. Estos hechos han facilitado la formación de fisuras y la entrada de los fluidos en el interior de la roca y, por tanto, han provocado que la degradación haya sido más profunda en este ensayo que en el de heladicidad.

Aún observándose una importante formación de grietas y fisuras visibles incluso a simple vista, la porosimetría de mercurio indica una disminución de la porosidad debido a la circulación de fluidos en el interior de la roca y, por consiguiente, a la cristalización de NaCl dentro de la red poral. Además, la gran diferencia entre los valores de anisotropía (dM y dm) indica que estos materiales han sido fuertemente degradados, existiendo una dirección preferente en la que se manifiesta con mayor intensidad dicha degradación. Dicha degradación también puede detectarse con los valores de dureza obtenidos tras el ensayo.

Por último, la variación de los parámetros de rugosidad producida durante este ensayo, en especial de Rz, son indicadores de la degradación superficial que han sufrido las

cuarzoarenitas analizadas durante los procesos de choque térmico, siendo este proceso superficialmente más agresivo que el que provoca la acción del hielo.

5. CONCLUSIONES

La denominación comercial de los materiales de Fonsagrada como “cuarcitas” no es correcta, se ha determinado que estos materiales son cuarzoarenitas, es decir, rocas de origen sedimentario formadas principalmente por cuarzo con matriz arcillosa y, localmente, cemento sintaxial de composición silícea.

Esta variedad, por tanto, es menos resistente a la degradación que una cuarcita en sentido estricto.

Las cuarzoarenitas estudiadas presentan poros de muy pequeñas dimensiones y morfologías irregulares, lo que dificulta la circulación de fluidos por la roca y, a su vez, facilita la precipitación de sales en su interior, haciendo que esta roca sea poco resistente a la degradación por la acción de agentes externos tales como el H₂O y el NaCl combinados con variaciones extremas de la temperatura.

Aunque las bajas temperaturas, ensayo de heladicidad, provocan un aumento del volumen del fluido dentro de la red poral cuando éste pasa a su estado sólido, generando una importante apertura de la porosidad previa, las altas temperaturas, ensayo de choque térmico, provocan la degradación de la matriz del material, lo que origina una mayor porosidad interconectada y una mejor circulación de los fluidos en el interior de la roca. Esto se traduce en una degradación más intensa durante el ensayo de choque térmico que la sufrida durante el ensayo de heladicidad.

El estudio pormenorizado de las propiedades petrofísicas y de durabilidad en rocas mediante técnicas analíticas empleadas en otros campos de caracterización de los materiales, tales como la microscopía de fluorescencia, la porosimetría de mercurio o la micro-rugosidad superficial ayudan en gran medida a conocer la calidad de las rocas empleadas en construcción y su comportamiento a largo plazo frente a diferentes agentes externos de degradación.

6. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el programa de becas de formación de personal investigador del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX del Ministerio de Fomento (BOE 27/06/2009) y por la Comunidad de Madrid a través del programa Geomateriales (S2009/MAT-1629), por el MEC a través del programa Consolider-Ingenio 2007 (CSD2007-0058). Además, forma parte de las actividades del grupo de investigación de la UCM “Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio” (ref. 921349).

Las técnicas y ensayos analíticos realizados durante este trabajo se han llevado a cabo en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, el Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias (UCM-CSIC) con certificado en la Gestión del Sistema de Calidad según la UNE-EN ISO 9001: 2008 y perteneciente a la Red de Laboratorios de la CAM (nº217) y en el Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de CC. Geológicas (UCM).

7. BIBLIOGRAFÍA

ASTM D 5873. *Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method*. American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohoken, 2000.

ASTM D 4404. *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by Mercury Intrusion Porosimetry*, American Society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania, 2010.

Bell, F.G. 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, vol. 21, 87-200.

Bennett, JM. 1992. “Recent developments in surface roughness characterization”. *Measurement Science and Technology*, 12 Vol. 3: 1119-1127.

Buschbom, U. 1980. Experiences with de-icing salts in W. Germany. *European Journal of Forest Pathology*, vol. 10 (6): 349-353.

De la Puente Crespo, J., Rodríguez Rodríguez, F. J. 2004. Análisis experimental mediante ultrasonidos para la determinación de la resistencia de la piedra. Acústica, Guimaraães, Portugal. Paper ID: 090 /p.1.

De Santiago-Buey, C., Estaire-Gepp, J. 2008. La porosimetría de mercurio. Fundamentos físicos, estado del arte, normativa, descripción del equipo y procedimiento experimental. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX. Madrid. Informe interno. 88p.

DIN-EN ISO 4287. *Geometrical product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters*. Germany, 2010.

Esbert, R. M., Montoto, M., Ordaz, J. 1991. La piedra como material de construcción: durabilidad, deterioro y conservación. *Materiales de construcción*, vol. 41 (221): 61-73.

Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F.J., Montoto, M. 1997. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Colegi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 139 p.

Ferrero Arias, Á., Valbuena García, A., Cueto Hinschberger, R. 2006. “Galicia, líder en la producción de cuarcita piedra natural”. *Tierra y Tecnología*, 29: 27-36.

Ferrero Arias, A. 2005. Proyecto “Cuarcitas de Galicia”. Zona Noroeste de Lugo. Conclusiones generales. Informe nº 4, 148p. Documentos del Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.

Fort, R., Fernández-Revuelta, B., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M., Tabora, M. 2008. Influencia de la anisotropía en la durabilidad de las dolomías cretácicas de la Comunidad de Madrid frente a la cristalización de sales. *Materiales de Construcción*, vol. 58, 289-290: 161-178.

Fort, R., de la Iglesia, A., García del Cura, M.A., Álvarez de Buergo, M., Varas-Muriel, M.J., Gómez-Heras, M., López-Arce, P., Gómez, L.S., Pérez-Monserrat, E.M., Vázquez-Calvo, C., Freire, D.M., Zornoza-Indart, A., Martínez-Garrido, M.I. 2011a. *Deterioro y conservación de los materiales geológicos del Patrimonio*. En: Instituto de Geociencias: Geología, Geodesia y Geofísica (CSIC-UCM). 1ª Reunión Científica. Eds. E.M. Pérez-Monserrat y M. Charco. Madrid. p: 76-86.

Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Álvarez de Buergo, M., Freire, D.M. 2011b. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 8: 132-144.

Freire, D.M., Varas-Muriel, M.J., Fort-González, R. 2010. Deterioro en el granito de Cadalso de los Vidrios bajo condiciones de Hielo/Deshielo. *Geogaceta*, vol 49: 55-58.

- Gadelmawlaa E.S., Kourab M.M., Maksoudc T.M.A., Elewaa I.M., Solimand H.H. 2002. "Roughness parameters". *Journal of Materials Processing Technology*, 1 Vol. 123: 133-145.
- Giuliani, F., Merusi, F., Polacco, G., Filippi, S., Paci, M. 2012. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 30: 174-179.
- Gómez-Heras, M., Hajpál, M., Alvarez de Buergo, M., Török, A., Fort, R., Varas, M.J. 2006a. Evolution of porosity in Hungarian building stones after simulated burning. In: *Heritage Weathering and Conservation*, R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras y C. Vazquez-Calvo (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 513-519.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J., Fort, R. 2006b. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology*, 78(3-4), 236-249.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería geológica*. Pearson Education, Madrid. 744 p.
- Guydader J., Denis, A. 1986. Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. *Bulletin Engineering Geology*, vol. 33: 49-55.
- Martín-González, F. 2009. Cenozoic tectonic activity in a Variscan basement: Evidence from geomorphological markers and structural mapping (NW Iberian Massif). *Geomorphology*, 107: 210-225.
- Martínez Cortizas, A. y Pérez Alberti, A. 2000. *Atlas climático de Galicia*. Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia. 210p.
- NORMAL 7/81. *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione*. Doc., CNR-ICR, Roma, 1981.
- Obika B., Freer-Hewish R.J., Fookes P.G. 1989. Soluble salt damage to thin bituminous road and runway surfaces. *Journal of Engineering Geology*, London, 22: 59-73.
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). 1989. Road Transport Research: Curtailing Usage of De-Icing Agents in Winter Maintenance. Report prepared by an OECD Expert Group. Paris, France. 125 p.
- Pedersen, L. B., Randrup, T. B., Ingerslev, M., 2000. Effects of road distance and protective measures on de-icing NaCl deposition and soil solution chemistry in planted median strips. *Journal of Arboriculture* 26(5): 238-245.
- Pérez Fortes, A. P., M. J. Varas Muriel, Cano Linares H., Castiñeiras García, P. "Caracterización y calidad de áridos pétreos empleados en las carreteras de Galicia". Comunicación III Congreso Nacional de Áridos (Cáceres). Fueyo Editores, Madrid 2012, p: 508-513.
- Pérez Fortes A. P., Cano Linares H., Varas Muriel M. J., Castiñeiras García P. and Pardo Santayana F. 2013. "Petrofísica y durabilidad de las anfíbolitas de Touro (A Coruña, España) para su uso en obra civil". *Boletín Geológico y Minero*, 124 (3), 367-369.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1987. *Sand and Sandstone*. Springer, New York, NY, 2nd ED., 653 p.
- Rodríguez, C., Sebastián, E. 1994. Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería Civil*, vol. 96: 130-142.
- Russel, S.A. 1927. Stone preservation committee report (Appendix I). H.M. Stationary Office, London.
- Shi, X. 2005. The Use of Road Salts for Highway Winter Maintenance: An Asset Management Perspective. *Institute of Transportation Engineers District 6 Annual Meeting*. Kalispell, Montana, July 10-13.
- UNE-EN 1926. *Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.
- UNE-EN 1936. *Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.
- UNE-EN 12371. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2002.
- UNE-EN 12407. *Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio Petrográfico*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.
- UNE-EN 13755. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2002.
- UNE-EN 14066. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2003.
- UNE-EN 14579. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2005.
- Varas, M. J., Molina, E., Vicente, M. A. 2003. Caracterización petrofísica de las areniscas utilizadas en la construcción del Conjunto Monumental de Ciudad Rodrigo, Salamanca, España. *Materiales de Construcción*, vol. 53 (269): 73-88.
- Varas-Muriel, M.J. 2012. *Técnicas de caracterización petrográfica (II): Microscopía Óptica de Fluorescencia (MF) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)*. En: La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. Instituto de Geociencias (UCM-CSIC). Eds. E.M. Pérez-Monserrat y R. Fort. p: 31-37.
- <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/resenas/ensayos/default.asp>
- Zaystev, I.D., Aseyev, G.G. 1992. *Properties of aqueous solutions of electrolytes*. CRC Press, Boca Raton.