

# Petrofísica y durabilidad de las anfibolitas de Touro (A Coruña, España) para su uso en obra civil

A. P. Pérez Fortes<sup>(1)</sup>, M. J. Varas Muriel<sup>(2)</sup>, H. Cano Linares<sup>(3)</sup>, P. Castiñeiras García<sup>(4)</sup>  
y F. Pardo Santayana<sup>(5)</sup>

- (1) Laboratorio de Geotecnia del Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX). C/ Alfonso XII 3, 28014, Madrid (España)  
ana.p.perez@cedex.es.
- (2) Dpto. de Geomateriales, Instituto de Geociencias (UCM-CSIC). Dpto. de Petrología y Geoquímica, Facultad de CC. Geológicas de Madrid (UCM). C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España)  
mjvaras@ucm.es
- (3) Laboratorio de Geotecnia del Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX). C/ Alfonso XII 3, 28014, Madrid (España)  
Herminia.Cano@cedex.es
- (4) Dpto. de Petrología y Geoquímica, Facultad de CC. Geológicas de Madrid (UCM). C/ José Antonio Novais 2, 28040, Madrid (España)  
castigar@ucm.es
- (5) Laboratorio de Geotecnia del Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX). C/ Alfonso XII 3, 28014, Madrid (España)  
Fernando.Pardo@cedex.es

## RESUMEN

En la actualidad, las anfibolitas de Touro (A Coruña, España) son explotadas para ser utilizadas regionalmente como áridos de machaqueo para su uso en obra civil, principalmente como materiales de préstamo o en carreteras, por lo que se ha considerado interesante profundizar en el conocimiento de las propiedades petrofísicas de esta variedad pétreo, así como en sus variaciones para poder evaluar su grado de calidad y durabilidad, antes de fijar su uso como árido. La obtención de esta información sobre la anfibolita de Touro se hace necesaria al no existir documentación accesible.

Las anfibolitas de Touro son una variedad pétreo de gran calidad, debido a que su textura cristalina condiciona la presencia de una porosidad escasa y un alto grado de compacidad. Además, también son materiales de gran durabilidad frente a la acción combinada del agua, el NaCl y las temperaturas extremas (condiciones frecuentes en la mayoría de las carreteras de montaña y del norte peninsular), aunque pueden verse afectadas superficialmente por la acción física de las bajas temperaturas, en presencia del agua y el NaCl, lo que se traduce en la aparición de una importante red de fisuras intercristalinas.

Este estudio demuestra que las anfibolitas Touro son materiales buenos para la construcción de carreteras, pero es importante controlar su grado de anisotropía y el contenido en sulfuros.

Palabras clave: agua, anfibolitas, durabilidad, petrofísicas, propiedades sales (NaCl), temperaturas extremas

## ***Petrophysical properties and durability of the Touro amphibolites (A Coruña, Spain) used in civil engineering***

### ABSTRACT

*Nowadays, Touro amphibolites (La Coruña, Spain) are exploited as crushed-rock aggregates in civil engineering. These materials are mainly used as ballast for road construction. Therefore, it is interesting to study these materials in function of several parameters obtained directly in quarry faces. For this purpose, the same techniques and tests previously applied in other fields such as natural stone have been used.*

*The aim of this work is to study the quality and durability of Touro amphibolites when subjected to extreme temperature, water and salt (NaCl) actions. The NaCl is included in this study because it is commonly used as fluxing material in pavements and roads.*

*The quality of these amphibolites, a classification based on the concrete and road tests and the techniques applied, is good. The best properties of these materials are their low porosity and high ability to compact. They also have a high durability under the action of extreme temperatures, salts and water. These results also indicate that these amphibolites can better support high temperature rather than low temperature degradation.*

To sum up, we can state that Touro amphibolites are good building materials for roads and concrete but it is important to consider their anisotropy and sulphur content.

Key-words: amphibolites, durability, quality, salts, temperature, water

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

### Introduction and methodology

Touro amphibolites are metamorphic rocks located in the Arinteiro massif. The Arinteiro massif belongs to the O Pino unit, inside the Ordenes Complex (Fig. 1). Ordenes is the largest allochthonous complex in NW Iberian and structurally, it is made up of recumbent folds limited by detachment faults (Castiñeiras et al., 2002, 2005).

In the past, the Arinteiro massif was exploited as ore mines of Cu-Ni (Ramsay, 1970; IGME, 1977; Castiñeiras et al., 2002) but nowadays, these materials are extracted as aggregates to be used in civil engineering. The uses of the Touro amphibolites have determined the scope of this work and the purpose of this research is to study the petrophysical properties of the Touro amphibolites from an in-depth knowledge of their petrographical characteristics. The results of their petrographical and petrophysical analysis could help to establish the quality and durability of these materials.

The materials analyzed have been obtained from the quarry faces based on their colour and visual weathering rate. Therefore, three blocks of crusher-run aggregates have been examined from this quarry. These blocks were cut into 4 cubic samples for petrophysical analysis and other smaller fragments for petrographical and mineralogical analysis.

The petrographical and petrophysical analysis and the durability evaluation were determined with the following techniques and tests:

1. The textural and compositional characteristics of the samples were analyzed with a petrographical microscopy Olympus BX51 provided with an Olympus DP12 (6V/2.5 Å) camera.
2. The porous system and its evolution after the durability tests were studied with the Fluorescence microscopy technique. The microscope used was the same Olympus BX51 but provided, in this case, with a mercury lamp Olympus U-RFL-T.
3. The mineralogical characterisation of the samples was verified with X Ray Powder Diffraction. The device used was a Philips Analytical PW 1752 diffractometer operated at 40 kV and 30m Å, equipped with a copper K-alpha anode tube, graphite monochromator and PC-ADP diffraction software.
4. The chemical composition was obtained with Wavelength Dispersive X Ray Fluorescence technique. The equipment used was an X PANalytical Axios Mineral with Super Sharp X-ray Tube (SST) up to 4 kW.
5. Porosity and pore size distribution was analyzed with the aid of the Intruded Mercury Porosimetry (ASTM D 4404-10). The device used was an Autopore IV 9500 from Micromeritics. The pore size range was 0.001-1000 µm and the intrusion mercury pressure was 60 000 psi.
6. The dynamic properties of the stone samples were studied with the ultrasonic wave propagation velocity (Vp) test (UNE-EN: 14579:2005). The velocities were analysed in three orthogonal directions (Vx, Vy, Vz). The aim of this test was obtain the ultrasound velocities and the anisotropy (Guydader and Dennis 1986; Fort et al. 2008, 2011) of the rock. This test was made with a Pundit CNS Electronics LTS device with 54 KHz transducers.
7. The physical properties of the Touro amphibolites were estimated from the vacuum saturation test (UNE-EN 13755:2002), and the water absorption and desorption tests (UNE-EN 1936:2007; NORMAL 7/81 1981).
8. The mechanical properties of these rocks were estimated from the Schmidt rebound hammer test (ASTM D5873-00). The device used was a Schmidt hammer Digi Schmidt (2000) from Proceq Testing Instruments. The uniaxial compressive parameter (UNE-EN 1926:2007) was obtained for an automatic load of 500 KN.
9. The durability degree of these amphibolites was determined from the freeze thaw (UNE-EN 12371:2002) and thermal shock tests (UNE-EN 14066:2003). These tests were done with water and salts (NaCl). The aim of the use of NaCl was to simulate the conditions of the aggregates, used as land-fill, on mountain roads.

### Results and discussion

#### Petrophysics

The Touro amphibolites studied are slightly foliated metamorphic rocks with bands of bluish grey and white minerals. Porous, white veins appear perpendicular to the main foliation. These veins are made up of metamorphic carbonates (marble) with a grain size of between 0.5-1mm.

Some minerals with metallic colours have been found into the samples analyzed. These minerals could be some type of sulphide and its oxidation could cause the reddish areas observed in these rocks.

The mineralogy detected by optical microscopy and XRD was made up of actinolite, diopside, plagioclase (anorthite) and quartz into a nematoblastic texture. Epidote, clinozoisite, chlorite (chamosite), microcline, calcite, sericite and opaque minerals (hematite) appear as secondary minerals.

The chemical tests of the Touro amphibolites indicate high concentrations of aluminium, calcium and iron oxides (12.8-14.5%). Some quantities of sulphur oxide have been detected which could indicate the presence of sulphide in these stones.

The porosity of the amphibolites studied with mercury porosimetry is very low (0.27%, table 1) but the real density of the analyzed rocks is extremely high (3.09 g/cm<sup>3</sup>, table 1). The porosity in these rocks is localized into the macro-porosity class (43% of the rock porosity is included into the >100 µm class, Fig. 3). Generally speaking, the connection between the pores is regular and straight (5.13 of bendiness), so the mercury permeability is relatively high (40 mDarcy).

The measurements of velocities  $V_p$  in these rocks are high ( $V_p$  average= 7188 m/s;  $V_x$  = 6957 m/s;  $V_y$  = 7140 m/s;  $V_z$  = 7466 m/s), and the anisotropy values calculated are relatively low ( $dM$  = 7 %;  $dm$  = 4 %) and homogeneous (Table 2).

The physical properties obtained for these samples show high real and apparent densities (3.09 g/cm<sup>3</sup> and 3.09 g/cm<sup>3</sup> respectively). The open porosity measured in water is very low (0.13%). This value indicates a low absorption coefficient (0.04%) and a maximum compact index. Therefore, these stones only absorb small quantities of water in atmospheric pressure conditions and, usually, in the first minutes of the tests. Otherwise, they do not completely lose this absorbed water during the tests.

The results obtained from the Schmidt hammer indicates that these rocks have a medium-high surface toughness (38 US) but the uniaxial compressive parameters show a low resistance (68 MPa with a 0.85% of deformability), compared to marble veins.

## Durability

During the freeze-thaw test, there were no changes in colour, surface roughness or in the geometry of the cubic samples. Otherwise, under the optical and the fluorescence microscope, small and new surface cracks were detected. The microscope also detected a volume increase of the pre-existing fissures (Fig. 4a y b). The areas associated with the marble veins have been more weathered than the areas with dark mineralogy.

The fissures developed during this test produced an increase in the total porosity in the rock (since 0.27 to 0.46%, table 1), specifically in its microporosity (from 16% to 28%). These results indicate that the pores are smaller and more irregular before performing the test, so the pore connections are more uneven (tortuosity = 58) and the permeability has increased (1 mDarcy).

The ultrasonic velocities,  $V_p$ , decreased into the three spatial directions ( $\Delta V_p$  = 13 %, table 2) but the degradation of the rock was more intense when a marble vein orthogonal to the measured axis appeared. This vein also caused the increase in the anisotropy values, above all, the total anisotropy ( $dM$  = 21.36%, table 2).

Finally, the surface hardness slightly changed ( $\Delta US$  = 11%).

During the thermal shock test there were no significant changes in surface roughness or in the geometry of the cubic samples but there was an important change in the colour of the rock. Reddish areas appeared all over the stone. This action was probably induced by the oxidation processes of some sulphides.

Some surface fissures and orthogonal cracks to the main foliation of the amphibolites were detected under the optical and the fluorescence microscope. Only the fissures related to the marble veins were able to penetrate the rock (Fig. 4f).

After the thermal shock test, there was an increase in the rock porosity (from 0.27 to 0.83%, Table 1, Fig. 3), specially in its macroporosity (from 84% to 95%). These rocks have large and regular pores so the bendiness has not changed at all and their Hg permeability is high (203 mDarcy).

The changes in the porosity generated in this test did not influence the results in the ultrasonic wave propagation velocity ( $V_p$ ) test. Likewise, the values calculated of anisotropy did not change after the thermal shock test. Otherwise, the surface hardness after this test significantly decreased (from 38 to 33 US). This fall in the surface hardness is similar to the results obtained by the freeze-thaw test.

In conclusion, the quality of the Touro amphibolites is good because these rocks have a high density and low porosity. Their durability grade, under the action of extreme temperatures, salts and water, is also good. However, the quality and durability of these stones decreased when marble veins or sulphides appear.

## Introducción

Las anfibolitas objeto de estudio, son unas rocas metamórficas localizadas en el término municipal de Touro (A Coruña), y forman parte del Macizo de Arinteiro.

Este macizo es conocido por su minería subterránea, donde se explotaron en el pasado minerales tales como la pirrotina y la calcopirita, para la extracción de Cu y Ni (Ramsay, 1970; IGME, 1977; Williams, 1983; Castiñeiras et al., 2002). Actualmente, con la entrada

de la "nueva minería" (productos de cantera y minerales industriales), son abundantes las extracciones a cielo abierto donde se obtienen, entre otros productos naturales, áridos destinados a la construcción y a la obra civil.

El uso regional cada vez más extendido de las anfibolitas de Touro, hace necesario establecer como objetivo principal de este trabajo, el profundizar en el conocimiento de sus propiedades petrofísicas y sus variaciones, partiendo de su caracterización petrográfica (tipos de minerales, tamaño y forma de sus cristales, volumen de poros, forma, tamaño y distribución de los mismos, fluidos que rellenan dichos poros, etc) para poder determinar así su grado de calidad y durabilidad antes de ser machacados y utilizados como áridos.

La importancia de conocer las propiedades petrofísicas de las rocas radica en las aplicaciones de las mismas, ya que condiciona su comportamiento, tanto como materiales de construcción como soportes de obra civil (Esbert *et al.*, 1997; Montoto y Esbert, 1999; Benavente *et al.*, 2004; Harvey *et al.*, 2005; Esbert *et al.*, 2008; Fort *et al.*, 2011a).

La durabilidad se define como la capacidad de un material para resistir la alteración, manteniendo sus cualidades estéticas y propiedades mecánicas con el paso del tiempo (Bell, 1993). Así pues, la durabilidad de una roca depende directamente de las características intrínsecas del propio material pétreo (mineralogía, tamaño y forma de sus cristales, volumen de poros y forma, tamaño y distribución de los mismos) y de los factores externos a los que se encuentra expuesto dicho material (humedad, temperatura, sales disueltas, acción humana...) (Esbert *et al.*, 1997; Benavente, 2004; Fort *et al.*, 2011a).

La complejidad mineralógica y textural de estas rocas metamórficas han sido factores determinantes para elaborar una primera caracterización petrofísica detallada y determinar así su grado de calidad. A partir de esta caracterización inicial, se ha intentado deducir el comportamiento de esta variedad pétreo frente a la acción combinada y degradante de una serie de agentes meteóricos (agua y temperaturas extremas) y contaminantes (sales solubles-NaCl) ligados a factores ambientales y antrópicos. Para ello, se ha realizado una serie de ensayos de durabilidad o ensayos de envejecimiento acelerado, los cuales tratan de reproducir de forma acelerada la alteración que sufrirían estos materiales una vez colocados en obra y expuestos a condiciones ambientales extremas (Esbert *et al.*, 1997). En estos ensayos se ha simulado la acción invernal de las heladas y la nieve (hielo-deshielo) y la acción veraniega de la insolación intensa y las altas temperaturas (choque térmico) sobre las anfibo-

litas. Se ha incluido el NaCl a la hora de realizar estos ensayos, porque es el método tradicional más usado en carreteras y otros pavimentos de montaña, para deshacer el hielo y/o derretir la nieve en invierno, ya que reduce su punto de fusión hasta los  $-21^{\circ}\text{C}$  (Zaystev and Aseyev, 1992). Cuando el hielo desaparece, el residuo salino permanece en la zona de deposición o es arrastrado por la lluvia a zonas colindantes, siendo uno de los responsables directos del deterioro que experimentan estas obras públicas (Obika *et al.*, 1989; Shi, 2005; Giuliani *et al.*, 2012).

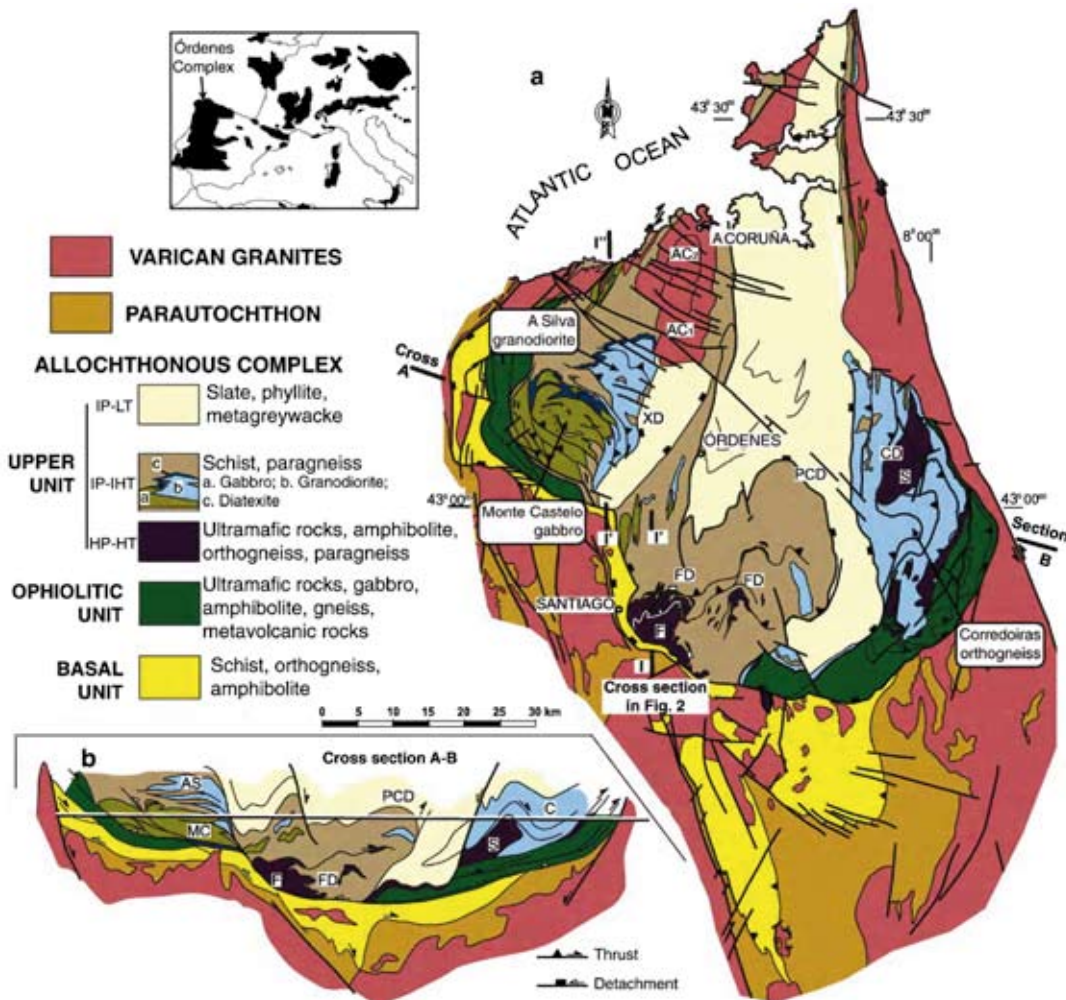
## Zona de estudio

Las anfibolitas extraídas en Touro proceden de la Unidad geológica de O Pino, englobada dentro del Complejo de Órdenes (Fig. 1). Éste es el mayor de los complejos alóctonos del Noroeste peninsular y se extiende desde la parte central de Galicia hasta la costa atlántica. Su estructura general consiste en un gran sinforme, resultado del desarrollo de pliegues de plano axial subvertical y ejes N-S a NE-SO y limitado por grandes fallas de desgarre menestral (Castiñeiras *et al.*, 2002, Castiñeiras, 2005).

En concreto, la Unidad de O Pino representa uno de los conjuntos litológicos principales de la unidad culminante del Complejo de Órdenes (Fig. 1) y está constituida por gneises pelíticos con granate, estaurolita y distena, gneises semipelíticos con granate y el macizo de anfibolitas de Arinteiro (Castiñeiras, 2005). Dichas anfibolitas se han descrito como rocas oscuras de tinte verdoso o azulado, compactas, y afectadas por una fuerte lineación mineral de los cristales de anfíbol (hornblenda). Localmente, estas anfibolitas han sufrido un proceso de retrometamorfismo, pasando a facies de esquistos verdes y adquiriendo un aspecto en el campo de "greenstone" (MAGNA nº 95, 1978).

## Materiales y metodología

Las muestras empleadas fueron recogidas directamente en cantera, en función de su color y grado de alterabilidad "de visu". De este modo, se seleccionó piedra en rama (material obtenido directamente de voladura) y se cortaron 4 probetas cúbicas de  $5 \times 5 \times 5 \pm 0.5$  cm de arista, para determinar de forma cuantitativa sus propiedades petrofísicas y deducir de forma cualitativa su durabilidad a través de la realización de una serie de ensayos de envejecimiento. Además, se utilizaron otros fragmentos menores para la caracterización petrográfica, mineralógica y geoquímica.



Para cuantificar las propiedades petrofísicas de esta variedad pétreo y su evolución tras los ensayos de durabilidad, se emplearon las siguientes técnicas y ensayos normalizados, con pequeñas modificaciones en algunas de las normas utilizadas, y que están relacionadas con el número de probetas (4 en lugar de 6-7) y puntualmente, con las dimensiones de las probetas.

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 (6V / 2.5 Å)*. Se realizaron láminas delgadas (3 x 2 cm x 30 µm) 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.
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 resinas epoxy y fluoresceína, antes de realizar las láminas delgadas (3 x 2 cm x 30 µm) (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 µm). Para ello, se empleó un equipo *Philips Analytical PW 1752* operado a 40 kV y 30 Åm, con tubo de ánodo de Cu monocromador de grafito y software PC-ADP Difracción. 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 usó un equipo modelo *X PA-Nalytical Axios Mineral*, con dispersión de lon-

gitud de onda y equipado con un generador de rayos X de alta potencia (4 kW).

5. La estructura de la red poral de esta variedad pétreo 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 y distribución de tamaño de poro y la relación macroporosidad/microporosidad, estableciéndose su límite en 5µm 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 0.001-1000 µm, 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  $dm (\%) = [(2 \times (V_{pmax} - V_{pmed}) / (V_{pmed} + V_{pmax}))] \times 100$  (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 (altas velocidades implica materiales buenos y/o sin deterioro al ser densos y poco porosos) y su estado de deterioro (bajas velocidades indican un material deteriorado o de baja calidad). 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 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 y la resistencia a la compresión simple. Para calcular la dureza se ha utilizado un *Martillo de Schmidt* (ASTM D 5873-00) con el que se obtuvo la resistencia superficial de la anfibolita 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). La *resistencia a la compresión simple* (UNE-EN 1926: 2007) del material se determinó con una prensa automática de 500KN de Mecánica Científica, S.A.

9. 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. 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  $-18 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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 disuel-

ve y arrastra sales sobre materiales pétreos sometidos previamente a un alto grado de insolación y con altas temperaturas (verano). Son 21 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 fisuraciones, etc.), la determinación de la pérdida de peso y la nueva cuantificación de algunas propiedades petrofísicas como: las propiedades petrográficas con el MP y MF para determinar la presencia de nuevas fisuras o cambios mineralógicos de interés y las propiedades estructurales, dinámicas y mecánicas (Esbert *et al.*, 1997).

## Resultados

### Caracterización Petrofísica de la anfibolita de Touro

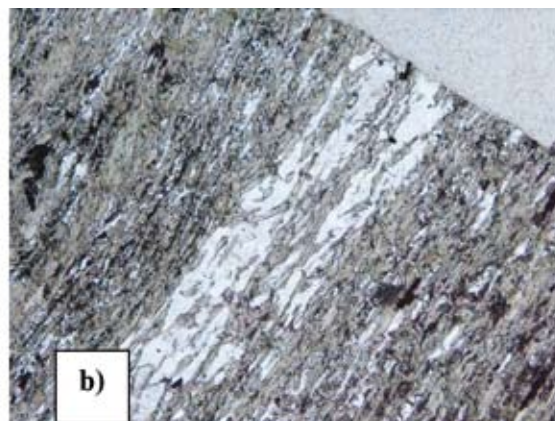
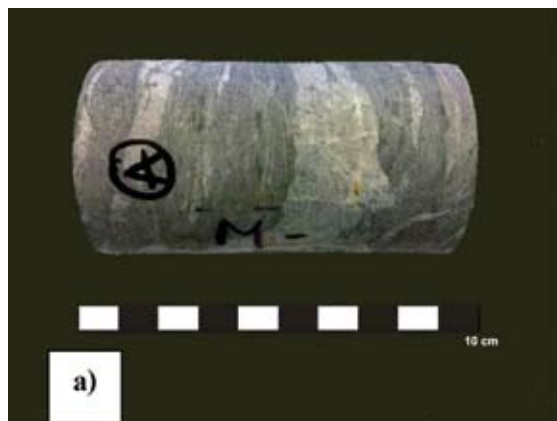
La anfibolita de Touro es una roca metamórfica (Fig. 2a) y desde el punto de vista macroscópico tiene una ligera foliación en tonos blancos, gris azulado claro y gris azulado oscuro. Presenta zonas de alteración rojizas probablemente debidas a la disolución de algún mineral y/o a la oxidación de diferentes compuestos de hierro. Tiene además importantes zonas blancas y porosas que cortan la foliación principal. Son zonas masivas, formadas por cristales de gran tamaño (0.5 - 1 mm). Es una roca muy compacta con algo de porosidad secundaria asociada a las zonas de minerali-

zación blancas. Cabe destacar que en algunas de las muestras con las que se ha trabajado se han encontrado minerales de brillo metálico que por su morfología, características y por los antecedentes de la zona se ha concluido que podrían ser sulfuros, los cuales al oxidarse pueden generar los colores rojizos localizados. Es frecuente también en estas rocas la aparición de pequeñas fracturas y fisuras, perpendiculares a la foliación y que en muchos casos aparecen rellenas o tapizadas por óxidos u otros minerales, como cuarzo o carbonatos.

La mineralogía detectada tanto por microscopía (MP) como por difracción de rayos X (DRX) está constituida por actinolita, diópsido, plagioclasa (anortita) y cuarzo. Como minerales accesorio aparecen la epidota, clinozoisita, clorita (chamosita), opacos (hematites), sericita y microclina y calcita (Fig. 2b).

Se ha observado que la roca presenta una textura nematoblástica dominante con zonas más claras y blancas (paragénesis inicial: anortita, cuarzo y diópsido) y zonas oscuras y verdes (paragénesis metamórfica: actinolita, epidota y clinozoisita). La actinolita y la anortita dominan composicionalmente en toda la roca junto con el cuarzo y en menor medida el diópsido. La actinolita presenta tamaños de grano muy fino (0.016 mm) y el diópsido algo mayores (0.18 mm). En algunas zonas la anortita está muy anubarrada, probablemente debido a su alteración a sericita. Localmente, también hay vetas de mármol que se adaptan a la estructura general de la roca.

La composición química de esta roca revela un contenido en sílice inferior al 50%, destacando los óxidos de aluminio, calcio y hierro (13-14%), y seguidos del óxido de magnesio (6%). Esto indica una mayor presencia de minerales cálcicos, férricos y/o aluminicos en la roca tales como la actinolita frente a la presencia de minerales más silíceos como son el cuarzo. La concentración de óxidos de sodio (2.5%) también es notoria y posiblemente se relaciona con sustituciones



**Figura 2.** a) Anfibolita de Touro con venas de mármol paralelas a la foliación. b) Aspecto al MP (nícoles paralelos) de la anfibolita de Touro (marcada lineación de sus componentes mineralógicos).  
*Figure 2.* a) *Touro amphibolite with marble veins parallel to the foliation.* b) *PM image (one nicol) of the amphibolite (marked lineation of their mineralogical components).*

Parámetros/Parameters	Roca sana Bedrock	R. Envejecida (heladicidad) After freeze-thaw cycles	R. Envejecida (choque térmico) After heat shock cycles
$\rho_{real}^*$ (g/cm <sup>3</sup> )	3.09	3.05	3.06
$\rho_{aparente}^{**}$ (g/cm <sup>3</sup> )	3.08	3.04	3.04
Porosidad total (%) / Total porosity (%)	0.27	0.46	0.83
Microp. *** < 5µm (%)	16	28	5
Macrop **** > 5µm (%)	84	72	95
Sup. Específica ***** (m <sup>2</sup> /g) / Specific Surface. (m <sup>2</sup> /g)	0.001	0.003	0.001
Tamaño medio de acceso de poro (µm) / Medium pore size (µm)	4.4	1.9	7.9
Tortuosidad / Tortuosity	5	58	5
Permeabilidad (mdarcy) / Permeability (mdarcy)	40	1	203

\* $\rho_{real}$  = Densidad real / Real density  
 \*\* $\rho_{aparente}$  = Densidad aparente / Bulk density  
 \*\*\*Microp. = Microporosidad / Microporosity  
 \*\*\*\*Macrop = Macroporosidad / Macroporosity  
 \*\*\*\*\*Sup. Específica= Superficie específica/ Specific Surface.

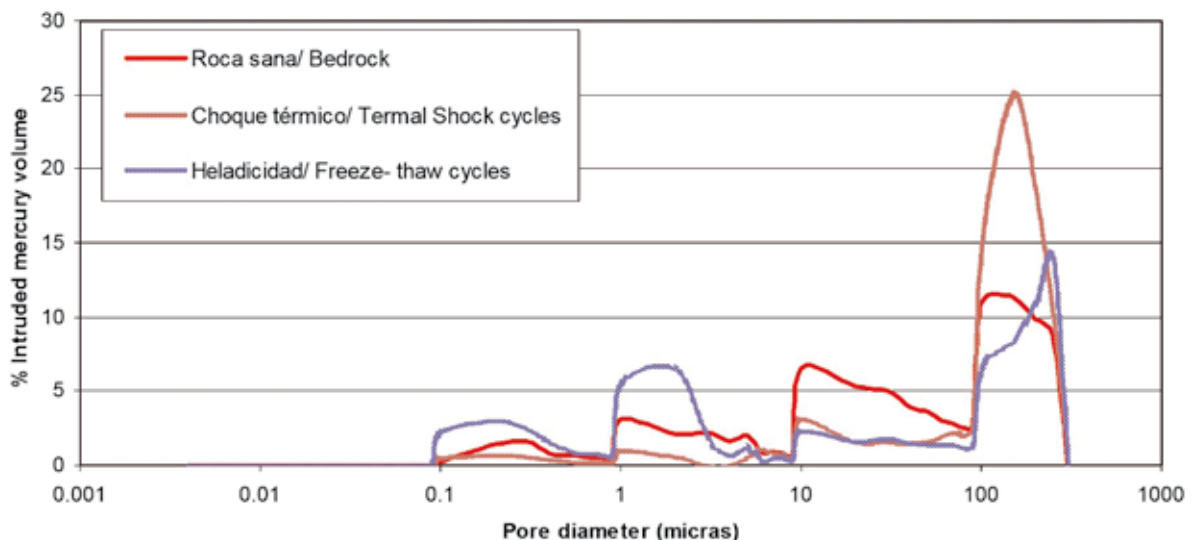
**Tabla 1.** Estructura de la red poral de la anfibolita de Touro, antes y después de los diferentes ensayos de durabilidad.  
**Table 1.** Poral structure of Touro amphibolites measured before and later to different durability tests.

en la anortita. Se ha detectado además una cierta cantidad de óxidos de azufre y titanio (1.5%), que, en el primer caso, pueden estar relacionados con la presencia de algún sulfuro (piritas).

En la tabla 1 se reflejan los aspectos más significativos de su estructura poral. Puede verse como la porosidad total accesible al Hg de esta variedad pétrea es escasa (0.27%) y su densidad real muy elevada (3.09 g/cm<sup>3</sup>). De esta escasa porosidad, más del 84% está por encima de las 5 µm de diámetro de acceso de poro (Russel, 1927), y se concentra en el intervalo >100 µm de diámetro de acceso de poro (43%, Fig. 3), seguido

del intervalo 10-100 µm (35%). Entre ambos intervalos se supera el 75% de la porosidad total accesible al Hg. En general, son poros de gran tamaño (4.4 µm de diámetro de acceso de poro) y forma regular (0.01 m<sup>2</sup>/g de superficie específica). Además, sus conexiones capilares son bastante regulares y rectas (tortuosidad = 5, tabla 1), lo que favorece la permeabilidad al Hg (40 mdarcy).

Las velocidades de propagación de las ondas P en las tres direcciones del espacio son elevadas y muy similares (Vp media= 7188 m/s; Vx = 6957 m/s; Vy = 7140 m/s; Vz = 7467 m/s), coincidiendo con la baja po-



**Figura 3.** Distribución de tamaño de poro en las anfibolitas de Touro y su evolución después de los ensayos de durabilidad.  
**Figure 3.** Pore size distribution of Touro amphibolite calculated before and later durability tests.



Anfibolitas de Touro/ <i>Touro Amphibolites</i>	Vp media (m/s) <i>Vp average (m/s)</i>	dM (%)	dm (%)
Roca sana/ <i>Bedrock</i>	7188	7	5
Envejecida (hielo – deshielo)/ <i>After freeze-thaw cycles</i>	6469	21	7
Envejecida (choque térmico)/ <i>After heat shock cycles</i>	7012	11	8

**Tabla 2.** Velocidad de propagación de ultrasonidos (Vp) y anisotropía total (dM) y relativa (dm), para las anfibolitas de Touro (A Coruña), antes y después de los ensayos de envejecimiento.

**Table 2.** *Ultrasound propagation velocity (Vp) and absolute (dM) and relative (dm) anisotropy, measured for the Touro amphibolites, before and after durability tests.*

rosidad y elevadas densidades (tabla 1) de las muestras ensayadas. Los valores de anisotropía son bajos (dM = 7 %; dm = 5 %) y homogéneos (tabla 2).

Las propiedades hídricas de estos materiales reflejan altas densidades reales y aparentes (3.1 g/cm<sup>3</sup> y 3.07 gr/cm<sup>3</sup>, respectivamente) con una porosidad abierta prácticamente inexistente (0.13%), por lo que su índice de saturación es prácticamente del 0% (0.04%) y su índice de compacidad máximo (1). Esta variedad pétreo absorbe poco agua en condiciones atmosféricas normales y siempre lo hace en los primeros minutos. El coeficiente medio de absorción libre es sólo del 0,07% a las 48h. Por otra parte, la desorción refleja una pérdida rápida (<1h) y casi total del poco agua absorbida. Ninguna de las cuatro probetas empleadas para este ensayo ha llegado a perder totalmente la poca cantidad de agua que han absorbido.

Las propiedades mecánicas de estas rocas son bastante buenas. La dureza refleja valores medios-altos (38 US) y bastante homogéneos aunque su *resistencia a la compresión simple* presenta valores medios de 68 MPa para una deformación del 0.85%.

### **Durabilidad de la anfibolita de Touro**

Tras el *ensayo de heladicidad*, las probetas no han sufrido variaciones significativas, ni en el color, ni en la rugosidad superficial de sus caras, conservando además la totalidad de sus vértices y aristas. A escala macroscópica, se observó que la matriz, compuesta por minerales oscuros, prácticamente no se había alterado, salvo por un ligero cambio de color y la aparición de algunas pequeñas fisuras en su superficie o, a escala microscópica, donde se detectó el aumento del tamaño de las fisuras preexistentes (Fig. 4a y b). Estas fisuras, aunque son superficiales, siguen la dirección de la lineación metamórfica. Por el contrario, las zonas asociadas a las venas de mármol, se degradaron más, detectándose un aumento significativo en el número de fisuras (Fig. 4c y d). Estas fisuras aparecen tanto entre los cristales de calcita de la propia vena de mármol, como en los bordes de contacto de la propia veta con el resto de la mineralogía más oscura.

Todo esto se tradujo en un importante aumento de la porosidad que presentaba esta roca (del 0.27 al 0.46%, porosidad total accesible al Hg - tabla 1) y, más concretamente de su microporosidad, que pasó del 16 al 28%, siendo el intervalo 1-5 µm de diámetro de acceso de poro, el más importante. Así, el tamaño medio de acceso de poro se redujo hasta 1.9 µm de diámetro y aumentó ligeramente su superficie específica (0.003 m<sup>2</sup>/g), lo que se tradujo en poros más pequeños e irregulares. Al mismo tiempo, sus conexiones capilares se volvieron más sinuosas (tortuosidad=58), lo que dificultó la permeabilidad al Hg (1 mDarcy).

El peso de las anfibolitas disminuyó ligeramente ( $\Delta$ Peso = 0.35%), aunque es destacable la caída que experimentaron las Vp en todas las direcciones del espacio ( $\Delta$ Vp = 13%, tabla 2), y que coincide con la apertura de fisuras y grietas superficiales por las que se ha introducido el agua y el NaCl, aumentando la porosidad superficial de la roca. El eje "x" es el más afectado por la disminución de la propagación de la velocidad debido a que perpendicularmente a él se encuentra una banda centimétrica de mármol que se ha agrietado y degradado durante el ensayo. Cabe destacar que la anisotropía ha aumentado en relación a la disminución de los valores de Vp. La anisotropía total (dM) de estas probetas se ha triplicado (21%; tabla 2) después del ensayo, siendo la evolución de la anisotropía relativa (dm) casi despreciable (tabla 2). Los altos valores de dM confirman que es este eje "x" el más afectado por el ensayo. Los valores de dureza también se han visto afectados, reduciéndose ligeramente (34 US), lo que implica una variación del 11%.

Al finalizar el ensayo de *choque térmico*, a escala macroscópica, las superficies de las probetas no modificaron su rugosidad ni se apreció el desprendimiento de material en aristas y vértices, aunque sí se detectó una importante apertura de las fisuras antiguas y la aparición de algunas nuevas, siempre relacionadas con los bandeados minerales. Se observó también un cambio de color en la superficie de las probetas, que era más apreciable en las zonas oscuras de la roca. En estas zonas, se observaron manchas pardo-rojizas, debidas a la oxidación de los sulfuros. A escala mi-

croscópica, y tanto al MP como al MF, se observó que estas probetas habían sufrido cierta degradación después del ensayo. El principal efecto fue la disgregación a escala de micras de la superficie perpendicular a la lineación de la roca (Fig. 4e), lo que indica que a escala microscópica sí se había modificado la rugosidad superficial de sus caras. Las nuevas fisuras aparecidas después del ensayo eran principalmente superficiales, siendo pocas las que penetraban hacia el interior del material y siempre relacionadas con los bandeados de minerales félsicos (Fig. 4f).

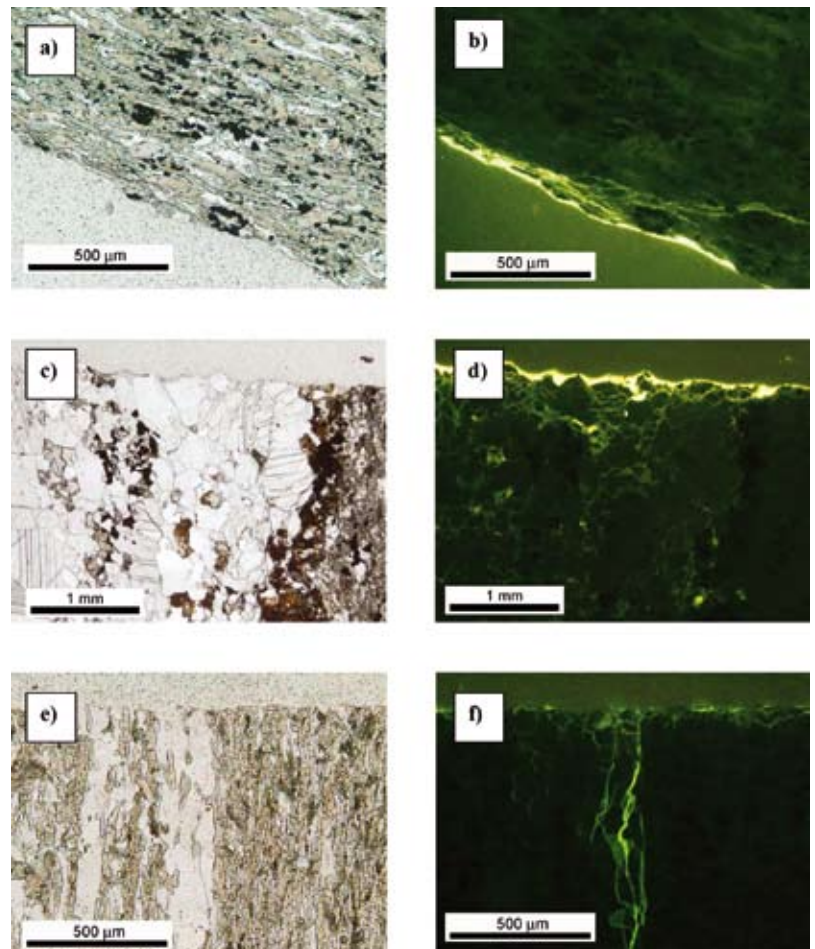
Después de este ensayo, su escasa porosidad total accesible al Hg se triplicó (0.27 a 0.83%, tabla 1, Fig. 3), experimentando un enorme aumento la macroporosidad (95%), y sobre todo en el intervalo 100-500  $\mu\text{m}$ . El tamaño medio de acceso de poro aumenta bastante (8  $\mu\text{m}$ ), pero su superficie específica no varía (0.001  $\text{m}^2/\text{g}$ ) por lo que los poros son más grandes y regulares. Sus conexiones capilares apenas varían (tortuosidad = 5), y siguen siendo regulares y rectas, lo que unido a la morfología de poro que presenta, se traduce en un material bastante permeable al Hg (203 mdarcy).

Las variaciones de peso fueron mínimas o nulas ( $\Delta\text{Peso} = 0.01\%$ ), así como las variaciones de Vp, las cuales fueron menores que en el caso de los ensayos de heladicidad ( $\Delta\text{Vp} = 6\%$ , tabla 2). Esta leve caída en las velocidades se produce en todos los ejes por igual. El aumento que experimentan las anisotropías total (dM) y relativa (dm) es escaso y equitativo (tabla 2), aunque sigue siendo el eje "x", el que destaca ligeramente sobre el resto.

La dureza disminuye en relación con los valores iniciales (38 a 33 US) y es similar a la obtenida después del ensayo de heladicidad ( $\Delta\text{R} = 12\%$ ). El eje "x" es el que presenta también valores menores de dureza.

### Interpretación

Desde el punto de vista geológico, las anfibolitas de Touro (A Coruña), son rocas metamórficas de media presión y temperatura, en tránsito a las facies de esquistos verdes. Presentan una fuerte lineación provocada por la orientación de su mineralogía máfica dominante (actinolita) y además, frecuentes intercala-



**Figura 4.** Marcada lineación metamórfica de la roca al MP (nícoles paralelos) (a) y al MF (b), después del ensayo de heladicidad. Contacto entre los cristales de anfíbol y una vena de mármol vistos al MP-nícoles paralelos (c) y MF (d), después del ensayo de heladicidad. Imágenes al MP con nícoles paralelos (e), y MF (f), después del ensayo de choque térmico.

**Figure 4.** Amphibolite metamorphic lineation of the PM (one nicol) (a) and FM (b) detected, after freeze-thaw cycles. Contact between the amphibole crystals and a marble vein to PM-one nicol (c) FM (d), after freeze-thaw cycles. PM -one nicol- (e) and FM (f) images, after heat shock cycles.

ciones de venas blancas de mármol y minerales félsicos (diópsido y/o anortita), paralelas a dicha lineación. Todo ello puede influir en sus propiedades petrofísicas y, en definitiva, en su grado de durabilidad como material natural de construcción. Además, la presencia de sulfuros puede provocar procesos de disolución y oxidación, dando lugar a sulfatos. En ambos casos, son formas de deterioro que afectan en mayor o menor medida a la durabilidad de estos materiales, según el uso que se les quiera dar, por ejemplo, piedra natural o como áridos para hormigones (Vázquez y Toral, 1980; Chinchón *et al.*, 1995; Ballivy *et al.*, 2002; Mourice *et al.*, 2006). Además, en esta reacción pueden generarse óxidos o porosidades que pueden ser perjudiciales para el empleo de este material en carreteras.

En general, la caracterización petrofísica de estos materiales indica que son muy densos ( $3.1 \text{ g/cm}^3$ ), compactos y poco porosos ( $< 0.3\%$ , porosidad total accesible al Hg), por lo que su capacidad de absorción de agua es muy baja ( $< 0.1\%$ ) y se limita a las zonas superficiales de las probetas y a las venas blancas de mármol o de minerales félsicos. Es en estas zonas donde se localiza la escasa porosidad detectada, la cual es principalmente del tipo fisural e intercrystalina (Choquette and Pray, 1970). Domina la macroporosidad, es decir, poros con más de  $5 \mu\text{m}$  de diámetro de acceso de poro (Russel, 1927; Rodríguez y Sebastián, 1994) y de forma regular, que junto con conexiones capilares rectas, definen las fisuras intercrystalinas observadas con los microscopios. Estas fisuras, al localizarse en superficie o cerca de ella (a pocas micras), pudieron ser producto del corte y manipulación de las probetas de esta roca durante los ensayos.

La presencia de estas venas blancas de mármol y de minerales félsicos, junto con su porosidad intercrystalina (fisuras) asociada, suponen una importante zona de debilidad ante la acción de los ensayos de durabilidad, aunque los daños se hacen más evidentes cuando las vetas son de mármol. La porosidad se duplicó durante el ensayo de heladicidad y se triplicó durante el ensayo de choque térmico. Durante ambos ensayos, los ciclos diarios de contracción y dilatación ocasionados por los cambios de temperatura ( $-18$  a  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $22$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), provocaron tensiones intercrystalinas en los bordes y dentro de estas venas, donde se halla la mayor parte de la escasa porosidad que tiene esta variedad pétreo, aumentándola. En el caso del ensayo de heladicidad, la porosidad que aparece es principalmente microporosidad ( $1 - 5 \mu\text{m}$  de diámetro de acceso de poro; Russel, 1927; Rodríguez y Sebastián, 1994) con poros irregulares y capilares sinuosos. Son microfisuras intercrystalinas (Choquette and Pray, 1970) que dificultan el paso del agua y de las sales

disueltas por lo que precipitan en su interior durante los periodos de mayor temperatura, dañando más la zona y aumentando el número de microfisuras y su tamaño, al cristalizar parcialmente el NaCl (aumento de volumen dentro de las fisuras) (Freire *et al.*, 2010). El agua puede no llegar a congelarse dentro de estas fisuras, ya que el ensayo no bajó de los  $-21 \text{ }^\circ\text{C}$ , condición necesaria para que el agua con NaCl se congele (Bornand, 1998). Afecta más a las vetas formadas por cristales calcita (vetas de mármol). Por el contrario, en el ensayo de choque térmico, la porosidad que aparece es principalmente macroporosidad y de gran diámetro ( $100 - 500 \mu\text{m}$  de diámetro de acceso de poro), con poros regulares y capilares rectos. Son microfisuras intercrystalinas (Choquette and Pray, 1970) que facilitan el paso del agua con NaCl disuelto, lo que implica que al precipitar y cristalizar el NaCl, durante los periodos de altas temperaturas ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), aumenta más si cabe el tamaño de las fisuras presentes en estas venas y sus bordes.

La aparición de esta fisuración entre los cristales de calcita (más fisuras) o de diópsido (menos fisuras), y entre sus venas blancas y el resto de roca puede ocasionar incluso la rotura de probetas por estas zonas durante los ensayos, debido a que provoca una disminución de su dureza y resistencia y, en consecuencia, de su durabilidad. También provocan una disminución considerable en los valores de resistencia a la compresión simple ( $68 \text{ MPa}$ ). La caída que experimentan las  $V_p$  en la dirección perpendicular a estas venas blancas confirma la aparición de este tipo de daños en esta variedad pétreo, aunque sólo se limita a los 2 primeros centímetros, profundidad máxima a la que puede penetrar el  $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$  disuelto.

## Conclusiones

Las anfibolitas de Touro (A Coruña) son rocas metamórficas utilizadas actualmente en esta región de Galicia como materiales de construcción, principalmente como áridos para obra civil. En general, son materiales de alta calidad por sus elevados índices de densidad y escasa porosidad. Aunque su resistencia a la agresión de los distintos agentes meteóricos (agua y temperaturas extremas) y contaminantes (NaCl) es buena, se hace evidente que la elevada presencia de venas de mármol influye decisivamente en su durabilidad, al ser estas zonas el área principal de concentración de la escasa porosidad detectada. Por consiguiente, las anfibolitas analizadas son poco susceptibles de ser degradadas y sus propiedades petrofísicas apenas se han visto modificadas durante los ensayos de durabilidad. Pero es quizás el ensayo de heladicidad el que

más las afecta, favoreciendo la aparición de nuevas microfisuras, responsables directas de la importante degradación que sufren muchas de las variedades pétreas en la sociedad actual (Esbert *et al.*, 1997; Fort *et al.*, 2011a). El carácter superficial de dichas microfisuras hace que la piedra sólo se vea ligeramente degradada en su superficie.

La presencia de venas de mármol disminuye la calidad de este material para ser utilizado como piedra de construcción u ornamental en edificación, ya que las anisotropías que presentan pueden indicar una rápida degradación del material una vez puesto en obra, al ser estas venas zonas de debilidad y rápido deterioro. Pero estas venas no influyen cuando se utilizan como áridos, ya que en este caso las propiedades van a depender de sus posibles aplicaciones en hormigones, carreteras, etc. Por ejemplo, la presencia de sulfuros en esta variedad pétreo, desaconsejan su uso como áridos para hormigones (UNE-EN 12620: 2003).

## Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado 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) y 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). 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 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), en el Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de CC. Geológicas (UCM) y en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

## Referencias

- ASTM D 5873-00. *Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method*. American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohocken, 2000.
- ASTM D 4404-10. *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.
- Ballivy, G., Rivard P., Pépin C., Tanguay M. G. and Dion A. 2002. Damages to residential buildings related to pyritic rockfills: field results of an investigation on the south shore of Montreal, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29, 2. 246-255.
- Bell, F.G. 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21, 87-200.
- Benavente, D., Bernabéu, M.A., and Cañaveras, J.C. 2004. Estudio de propiedades físicas de las rocas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12 (1), 62-68.
- Bornand, E. 1998. Physical bases of freezing point measurement using active and passive probes. *Proceedings of the 9th SIRWEC Conference* 15-17 March 1998, Luleå, Sweden 273-286.
- Castiñeiras, P., Gómez Barreiro, J., Martínez Catalán, J. R. and Arenas, R. 2002. Nueva interpretación petrológica y tectónica de las anfibolitas pobres en calcio del antiforme de Arinteiro (NO del Macizo Ibérico). I: Descripción de las anfibolitas pobres en calcio y rocas asociadas. *Geogaceta*, 32, 83-85.
- Castiñeiras, P. 2005. *Origen y evolución tectonotermal de las unidades de O Pino y Cariño (Complejos Alóctonos de Galicia)*. Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid. Ediciós do Castro. Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Área de Xeoloxía e Minería do Seminario de Estudos Galegos. Serie Nova, 28. Coruña, España. 279 pp.
- Castiñeiras, P., Díaz García F. and Gómez Barreiro J. 2010. REE-assisted U-Pb zircon age (SHRIMP) of an anatectic granodiorite: Constraints on the evolution of the A Silva granodiorite, Iberian allochthonous complexes. *Lithos*, 116, 153-166.
- Chinchón, J.S., Ayora, C., Aguado, A. and Guirado, F. 1995. Influence of weathering of iron sulphides contained in aggregates on concrete durability. *Cement and Concrete Research*, 25 (6), 1264-1272.
- Choquette, P.W. and Pray, L.C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 54, 207-250.
- De Santiago-Buey, C. and 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. 88pp.
- Esbert, R. M., Ordáz, J., Alonso, F.J. and Montoto, M. 1997. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 139 pp.
- Esbert, R.M., Alonso, F.J. and Ordaz, J. 2008. La petrofísica en la interpretación del deterioro y conservación de la piedra de edificación. *Trabajos de Geología*, 28, 87-95. Universidad de Oviedo.
- Fort, R., Fernández-Revuelta, B., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M. and Taborda, 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*, 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. and 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. 76-86.
- Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Álvarez de Buergo, M. and Freire, D.M. 2011b. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8, 132-144.
- Freire, D.M., Varas-Muriel, M.J. and Fort-González, R. 2010. Deterioro en el granito de Cadalso de los Vidrios bajo condiciones de Hielo/Deshielo. *Geogaceta*, 49, 55-58.
- Giuliani, F., Merusi, F., Polacco, G., Filippi, S. and Paci, M. 2012. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 30, 174-179.
- Gómez-Heras, M., Hajpál, M., Alvarez de Buergo, M., Török, A., Fort, R. and 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, 513-519.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J. and 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.
- Guydader J. and Denis, A. 1986. Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. *Bulletin Engineering Geology*, 33, 49-55.
- Harvey, P.K., Brewer, T.S., Pezard, P.A., Petrov, V.A. (Eds.) 2005. *Petrophysical properties of crystalline rocks*. Geological Society. Special Publication 240. London. 351pp.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1977. *Estudio básico de los yacimientos de Cu - Ni tipo Arinteiro*. Tomo I. Memoria. Madrid, ITGE. 232pp.
- Mapa Geológico de España (MAGNA) 1978. Escala 1:50 000, hoja nº 95, "El Pino". Instituto Geológico y Minero Español. Madrid.
- Mourice, A., Czerewko, M. and Cripps, J.C. 2006. Sulfate and sulfide minerals in the UK and their implications for the built environment. *IAEG2006 Paper number 121*. 12pp.
- Montoto, M. and Esbert, R.M. 1999. Petrofísica de la roca matriz. *Trabajos de Geología*, 21, 239-252. Universidad de Oviedo.
- NORMAL 7/81. *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione*. Doc., CNR-ICR, Roma, 1981.
- Obika B., Freer-Hewish R.J. and Fookes P.G. 1989. Soluble salt damage to thin bituminous road and runway surfaces. *Journal of Engineering Geology*, 22, 59-73.
- Ramsay, J.G. 1970. *Report on the geological structure of the region East of Santiago de Compostela, with special reference to mine prospects at Arinteiro, Bama, Fornas and Barca*. Informe para la empresa Río Tinto-Patiño, 15pp.
- Rodríguez, C. and Sebastián, E. 1994. Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería Civil*, 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 12620. *Áridos para hormigón*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2003.
- 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-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. 31-37.
- <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/resenas/ensayos/default.asp>
- Vázquez E. and Toral, T. 1980. Influence des sulfures de fer des granulats du maresme (Barcelone) sur les bétons. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 22, 1, 297-299.
- Williams, P.J. 1983. The genesis and metamorphism of the Arinteiro-Bama Cu deposits, Santiago de Compostela, northwestern Spain. *Economic Geology*, 78, 1689-1700.
- Zaystev, I.D. and Aseyev, G.G. 1992. *Properties of aqueous solutions of electrolytes*. CRC Press, Boca Raton, 1729 pp.

Recibido: octubre 2012  
Revisado: noviembre 2012  
Aceptado: enero 2013  
Publicado: julio 2013