

Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo, 25 : 105-115 (2005)

Durabilidad en ambientes húmedos de la Arenisca de la Marina (Formación Lastres, Jurásico Superior de Asturias)

V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA¹, L. CALLEJA¹, L. M. SUÁREZ DEL RÍO¹,
A. RODRÍGUEZ-REY¹ Y C. CELORIO².

¹ Dpto. de Geología (Universidad de Oviedo). Jesús Arias de Velasco s/n. 33005-Oviedo (Asturias).

² Servicio de Radiología. Hospital Álvarez-Buylla (SESPA). 33616-Mieres (Asturias).

Resumen

Se ha estudiado la alterabilidad de dos variedades (gris y amarilla) de una roca ornamental asturiana, denominada Arenisca de la Marina, perteneciente a la Formación Lastres (Jurásico Superior). Además de las clásicas técnicas de microscopía, para el estudio textural se han utilizado la velocidad de propagación de ondas elásticas y la tomografía axial computerizada de rayos-X. Se ha determinado la variación de algunas propiedades físicas (densidad, porosidad abierta y velocidad de propagación de ondas elásticas) antes y después de los ensayos de alterabilidad (humedad-sequedad, hielo-deshielo y cristalización de sales), comprobándose que los ciclos de cristalización de sales son los más agresivos y que la variedad amarilla es más susceptible al deterioro que la variedad gris. La textura ejerce una gran influencia en la durabilidad de ambas muestras, de modo que las bandas con más matriz y mayor porosidad presentan una mayor desagregación superficial, determinándose la existencia de un comportamiento anisótropo, más marcado en el caso de la variedad amarilla que en la gris.

Palabras clave: areniscas, durabilidad, roca ornamental, ondas elásticas, tomografía de Rayos X.

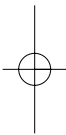
Abstract

The alterological behaviour of two varieties (grey and yellow) of an Upper Jurassic dimension sandstone from Asturias (Spain) known as La Marina Sandstone has been studied. Besides the classical microscopic techniques, the velocity of propagation of longitudinal waves and the computerized X-ray tomography have been used for the textural studies. The variation of some physical properties (bulk weight, effective porosity and P-wave velocity) has been measured in the specimens before and after the ageing test (drying-wetting, freeze-thaw and salt crystallization cycles), showing that the salt crystallization test is the most aggressive one and that the yellow variety is more susceptible to the deterioration than the grey one. The texture has a high influence on the durability of both sandstone varieties: zones with higher matrix content or higher effective porosity show a more accused surface damage. The presence of an anisotropic behaviour more marked in the yellow variety than in the grey one has been detected.

Key words: sandstone, durability, dimension stone, elastic waves, x-ray computed tomography.

Uno de los estudios más importantes a realizar cuando se pretende utilizar una roca con fines ornamentales es la caracterización de su durabilidad, es decir, la resistencia que ofrece el material al deterioro producido por diferentes agentes de meteorización (agua, temperatura, cristalización de sales solubles, etc.). En España, la normativa vigente para la Piedra Natural contempla una se-

rie de ensayos que se encuentran recogidos en las normas publicadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) y que han sido elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) de la Piedra Natural (normas UNE-EN); en cada apartado correspondiente aparecen citadas las utilizadas en la presente investigación.



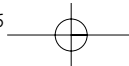


Tabla I. Valores medios de las propiedades físicas. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_p); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

Muestra	ρ (kg/m ³)	n_p (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Variedad gris	2120 \pm 7	19,4 \pm 0,3	2389 \pm 121	2476 \pm 117	2219 \pm 64
Variedad amarilla	1979 \pm 12	25,3 \pm 0,4	1734 \pm 201	1744 \pm 172	1542 \pm 270

En este trabajo se estudia el comportamiento de las dos variedades gris y amarilla de una arenisca asturiana, denominada Arenisca de la Marina, perteneciente a la Formación Lastres (Jurásico Superior), frente a la acción alterante del agua, ya sea en fase líquida (natural o saturada en sales) o en fase sólida (hielo). Siguiendo la normativa vigente para Piedra Natural, se han realizado los ensayos de humedad-sequedad, heladicidad y cristalización de sales.

El material estudiado ha sido utilizado como roca de construcción (piedra de sillería) en algunos monumentos emblemáticos asturianos (Iglesia de San Salvador de Valdediós, Convento de Santa María de Valdediós, Palacio de Revillagigedo, Iglesia de Santa María de la Oliva, etc.) y sobre él ya se han realizado algunos estudios previos (por ej., Esbert y Valdeón, 1984); la importancia comercial del material estudiado no es grande, ya que actualmente solamente se sigue utilizando como roca ornamental (piedra de sillería y de revestimiento) en edificaciones unifamiliares, preferentemente en zonas próximas a las explotaciones, y para restauraciones de edificios antiguos construidos con dichos materiales; por ello el conocimiento de la durabilidad de dichos materiales frente a la acción del agua es de sumo interés científico con vistas a futuras restauraciones.

Aunque la manera de expresar los resultados de la durabilidad frente a los agentes alterantes depende del ensayo realizado, en esta investigación se ha unificado para todos los ensayos; así, se ha determinado la pérdida en peso, la variación de algunas propiedades físicas (densidad, porosidad y velocidad de propagación de ondas elásticas) y la variación de su morfología externa, aspecto de gran importancia en el caso de las rocas ornamentales.

Material y Metodología

Actualmente existen dos canteras (*El Nene* y *Los Gemelos*, en el Municipio de Villaviciosa) que explotan las dos variedades de arenisca (amarilla y gris) de la Formación Lastres; una amplia descripción de las características de campo y de las explotaciones pueden verse en Suárez del Río et al. (2002 a).

Macroscópicamente ambas variedades son areniscas de grano medio con unas marcadas anisotropías; la variedad amarilla presenta anillos de Liesegang que, en el

bloque estudiado, son casi paralelos a la estratificación; la variedad gris presenta un bandeo composicional asociado a la presencia de matriz arcillosa y óxidos de hierro, también casi paralelo a la estratificación; ambas características determinan el comportamiento anisótropo detectado en algunas de las propiedades físicas.

Petrográficamente pueden clasificarse como sublitarenitas (Pettijhon et al., 1972). Una descripción macro y microscópica, siguiendo la norma europea UNE-EN 12407 (2001), puede verse en Suárez del Río et al. (2002 b).

Para la realización del trabajo se seleccionaron en las canteras varios bloques con un aspecto macroscópico razonablemente similar; es necesario resaltar que la variedad gris presenta una mayor homogeneidad macroscópica que la amarilla.

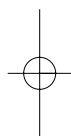
De cada uno de los bloques seleccionados se obtuvieron probetas cúbicas de 5 cm de arista, escogiéndose 24 probetas (12 para cada variedad), con características macroscópicas similares.

Se utilizaron 4 probetas para cada uno de los ensayos de alterabilidad, según estudios estadísticos realizados para la determinación en laboratorio de propiedades físicas de rocas (Gill et al., 2005); las aristas fueron rotuladas con tinta indeleble con la finalidad de resaltar el posible deterioro superficial; se orientaron según tres direcciones ortogonales, asignando la letra Z a la dirección perpendicular a la estratificación y X e Y a las dos direcciones paralelas a la misma; posteriormente y antes de la realización de los ensayos de envejecimiento artificial acelerado, fueron fotografiadas con objeto de poder comparar el aspecto externo antes y después de los mismos.

Previamente a los ensayos, se han determinado algunas propiedades físicas que pueden verse afectadas por los ensayos de alterabilidad, como pueden ser la densidad y la porosidad abierta, y se ha valorado el comportamiento de la velocidad de propagación de ondas longitudinales en las tres direcciones ortogonales antes definidas.

Por otra parte, con el fin de evaluar la posible presencia de variaciones texturales en el interior de las muestras, los cubos se han estudiado mediante tomografía axial computerizada de Rayos-X (TAC) siguiendo la metodología expuesta en Ruiz de Argandoña et al. (1999a).

Posteriormente se realizaron los ciclos de alterabilidad (humedad-sequedad, hielo-deshielo y cristalización de sa-



les) siguiendo la normativa en vigor (con algunas modificaciones que se citan en el apartado correspondiente). Una vez finalizados los ensayos, se ha determinado el porcentaje de pérdida en peso y la variación de las propiedades físicas anteriormente citadas; además, se han realizado estudios en detalle de la superficie mediante lupa binocular (pérdida de material en las aristas, picoteado, cambios de color, etc.), para poner de manifiesto los cambios superficiales experimentados por los materiales tras los ciclos de alterabilidad. Estas características se han utilizado para la interpretación de la durabilidad de los materiales estudiados frente a los diferentes agentes de deterioro.

Caracterización petrofísica

Para la determinación de la densidad y la porosidad abierta se ha seguido la norma UNE-EN 1936 (1999). En la determinación de la velocidad de ondas ultrasónicas longitudinales se ha utilizado un equipo *Oyo Sonic-viewer* con una pareja de transductores de titanato de bario de frecuencia de resonancia nominal de 45 kHz, utilizando miel de abeja como interfase roca-transductor (se disuelve fácilmente en agua y no interfiere en los resultados de posteriores ensayos). Los resultados aparecen en la Tabla I; los valores de densidad y porosidad abierta son típicos de este tipo de materiales sedimentarios con un importante volumen de poros; las desviaciones no son muy elevadas, pudiéndose considerar como muestras bastante homogéneas.

En los valores de la velocidad de propagación de ondas longitudinales se observa un notable descenso en la dirección Z con relación a las otras dos direcciones, lo que se interpreta como debido a la presencia de anisotropías texturales: anillos de Liesegang y estratificación (en el caso de la variedad amarilla) y bandeado composicional y estratificación (en la variedad gris) que, en ambos casos, se disponen casi paralelas. El análisis de la desviación típica de los valores medidos en las tres direcciones es importante, al ser reflejo de en qué medida los datos numéricos están agrupados o no alrededor de la media y, por lo tanto, su mayor o menor valor suministrará información de la disposición de las anisotropías texturales (anillos de Liesegang y bandeado composicional) respecto a la estratificación.

Así, en la Tabla I puede observarse que las desviaciones típicas son claramente mayores en la variedad amarilla que en la variedad gris, lo cual nos permite interpretar que, en la primera, la disposición y tamaño de los anillos de Liesegang respecto a la estratificación varían significativamente de unas muestras a otras, mientras que, en la variedad gris, el bandeado composicional está claramente influenciado por la estratificación, presentando una menor desviación.

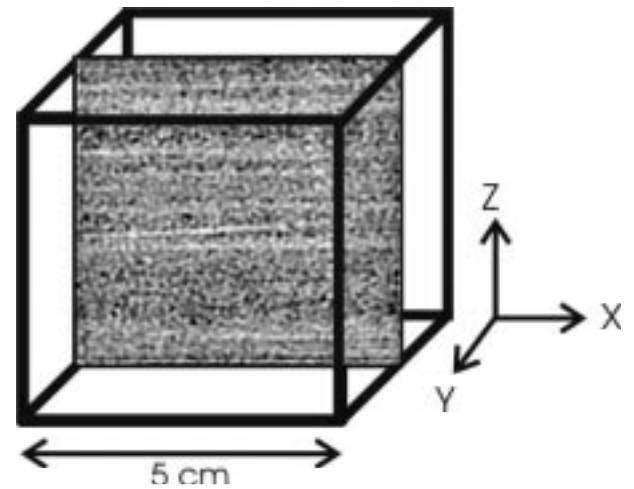


Figura 1. Esquema en el que se muestra la sección realizada con TAC en el plano central de cada probeta.

Estos aspectos se han corroborado mediante los estudios efectuados con Tomografía Axial Computerizada de Rayos X (TAC). Las imágenes generadas están relacionadas con el coeficiente de atenuación (m) del medio atravesado; en la práctica se utiliza el número CT , relacionado con dicha atenuación:

$$CT = 1000(m - \mu_w) / \mu_w,$$

siendo μ_w el coeficiente de atenuación del agua.

Un desarrollo más amplio de dicha técnica y sus aplicaciones pueden verse en Ruiz de Argandoña et al. (1999b) y Ketcham y Carlson (2001).

Dichos estudios se han realizado con un scanner helicoidal *General Electric HiSpeed QX/i*, con una resolución espacial de 310 μm , a 120 kV y 120 mA; las imágenes corresponden a un espesor integrado de 0,63 mm. En esta investigación las observaciones se han realizado a partir de un único corte en un plano central perpendicular a la estratificación (Fig. 1). En el mosaico de la Figura 2, correspondiente a la variedad gris, se observa una cierta homogeneidad en la textura, presentando, a veces, unas trazas más blancas que representan el bandeado composicional (minerales más densos); también se puede ver que entre las probetas no hay variaciones muy significativas, tanto en el número de ellas como en su anchura y dirección. Por el contrario, la variedad amarilla (Fig. 3) presenta unas bandas claras (anillos de Liesegang, formados por minerales de hierro de alta densidad) y otras oscuras (debidas a una mayor porosidad asociada a la estratificación) que, en las probetas estudiadas, presentan una gran variabilidad tanto en el número de ellas, como en su anchura

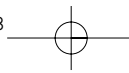


Tabla II. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de humedad-sequedad en la variedad gris. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_o); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Pérdida de peso (%)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	n_o (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	---	2116 \pm 9	19,5 \pm 0,4	2436 \pm 63	2392 \pm 73	2193 \pm 55
Post ciclos	---	2115 \pm 7	19,6 \pm 0,4	2434 \pm 61	2390 \pm 71	2191 \pm 53
Variación (%)	0,05	- 0,05	+ 0,2	- 0,08	-0,08	-0,09

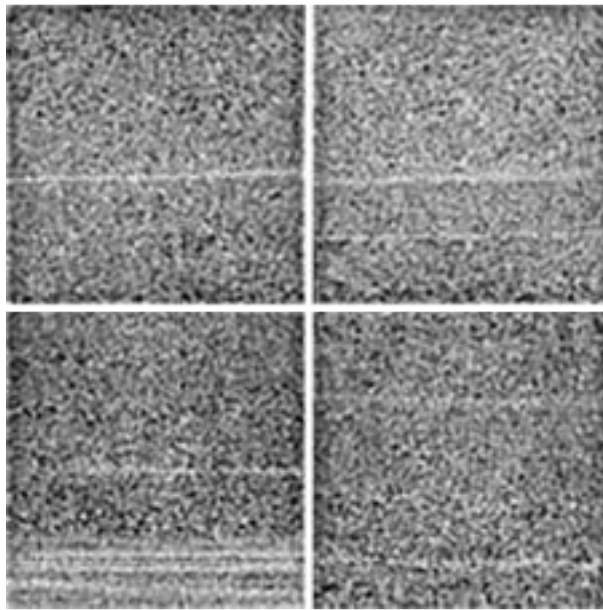


Figura 2. Mosaico con cuatro secciones de TAC de cuatro probetas de arenisca de la variedad gris (lado: 5 cm).

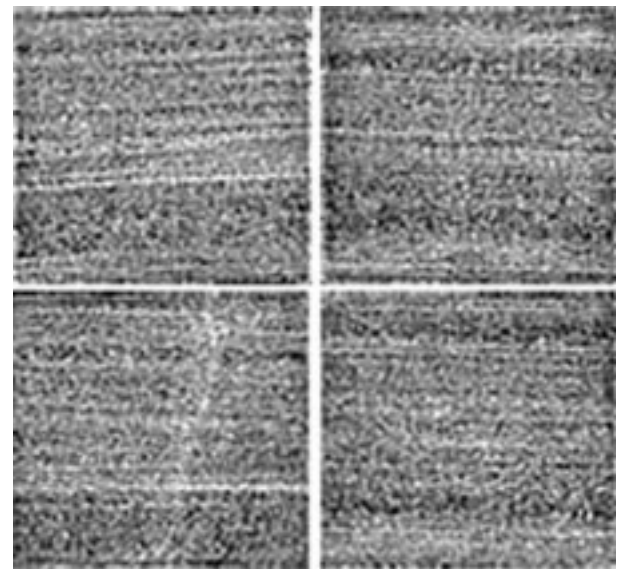


Figura 3. Mosaico con cuatro secciones de TAC de cuatro probetas de arenisca de la variedad amarilla (lado: 5 cm).

y dirección, lo que hace que esta variedad sea más heterogénea que la gris.

Para cada uno de los tres tipos de ensayos se han seleccionado cuatro probetas, de tal forma que los valores de las propiedades determinadas antes de los ciclos fuesen similares entre cada uno de los grupos, con la finalidad de que los datos obtenidos fuesen representativos de la variabilidad del comportamiento de las rocas estudiadas.

Ciclos de humedad/sequedad

Metodología experimental

Este ensayo tiene por objeto determinar la tendencia a la alteración como consecuencia de las variaciones en el contenido en humedad, intentando simular la acción de etapas lluviosas y secas alternantes; los daños originados suelen interpretarse como debidos a la acción disgregadora y disolvente del agua (Vos, 1976).

Por el momento no existe norma UNE-EN para la realización de este ensayo. En la literatura existen propuestas basadas en sucesivos ciclos de inmersión en agua y

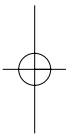
secado (evaporación) en estufa, variando tanto el tiempo de inmersión y secado, como la temperatura a la cual se realiza éste. En este estudio se ha seguido el procedimiento que se describe a continuación:

En primer lugar se secaron las muestras a 60°C en un horno eléctrico con ventilación de aire forzada hasta peso constante (variación de peso inferior al 0,1% en 24 horas) y posteriormente se dejaron enfriar en un desecador durante 2 horas con gel de sílice; se pesaron para obtener el peso inicial de las muestras. Los ciclos de humedad/sequedad (30 en total) se realizaron con los siguientes pasos:

- Inmersión total en agua a temperatura ambiente durante 24 horas.
- Secado a 60°C durante 22 horas.
- Enfriamiento durante 2 horas en desecador con gel de sílice.

Resultados y Discusión

En las Tablas II y III pueden verse los valores de las propiedades físicas estudiadas antes y después del ensayo y sus respectivas variaciones. A la vista de los resultados se concluye que, para las rocas estudiadas y en las



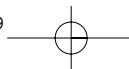


Tabla III. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de humedad-sequedad en la variedad amarilla. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_o); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Pérdida de peso (%)	ρ (kg/m ³)	n_o (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	---	1979 \pm 6	25,2 \pm 0,3	1689 \pm 103	1723 \pm 116	1465 \pm 98
Post ciclos	---	1974 \pm 4	25,4 \pm 0,3	1680 \pm 93	1714 \pm 112	1452 \pm 92
Variación (%)	0,2	- 0,2	+ 0,8	- 0,5	- 0,6	-0,8

condiciones de ensayo antes descritas, los ciclos de humedad-sequedad no modifican de manera significativa el comportamiento de estas rocas.

En concreto, la pérdida en peso apenas es significativa (0,05% para la variedad gris y un 0,2% para la amarilla) y es en forma de pequeños granos que se desprenden de la superficie. En cuanto a la densidad de la roca seca y la porosidad abierta, los cambios también son poco significativos, presentando unos incrementos de la porosidad máximos de un 0,4% para la variedad amarilla y un 0,05% para la variedad gris.

La variación de los valores de la velocidad de ondas elásticas está en consonancia con los pequeños cambios en la porosidad; dentro de ellas, los mayores cambios los presenta la variedad amarilla y dentro de ella en la dirección Z (perpendicular a los anillos de Liesegang y la estratificación), lo que se interpreta como debido a que los ciclos de humedad-sequedad provocan mínimos cambios en la porosidad asociada a la estratificación y, muy probablemente, a la presencia de pequeñas proporciones de arcillas expansivas presentes tanto en la matriz como asociadas a procesos de alteración en los feldespatos y las micas. Respecto al aspecto externo, no se han detectado cambios significativos dignos de mencionar.

Ciclos de hielo-deshielo

Metodología experimental

El paso de agua líquida al estado sólido comporta un incremento en volumen de aproximadamente un 9%; por ello, el agua contenida en los poros y fisuras de las rocas genera importantes esfuerzos de tracción internos, que tras repetidos ciclos y por un proceso de fatiga, pueden llegar a deteriorar seriamente a los materiales. En este sentido, son varias las características petrográficas y físicas que pueden afectar al comportamiento de las rocas, entre ellas, el tamaño, forma, distribución y proporción de los espacios vacíos, el grado de saturación en agua de las rocas, etc.

Existen diversas recomendaciones y normas referidas a este ensayo, pero en este estudio se ha seguido la norma UNE-EN 12371 (2002) en su apartado B (ensayo de identificación), con algunas pequeñas variaciones que se

especifican más adelante. El número de probetas ensayadas ha sido de 4 (7 en la Norma UNE-EN), con forma cúbica de 5 cm de arista (5 x 5 x 30 cm en la Norma).

Antes de realizar los ciclos se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Secado de las muestras a 60°C en un horno eléctrico con ventilación de aire forzada hasta peso constante (la Norma UNE-EN fija la temperatura de secado en 70°C).
- Enfriamiento en un desecador durante 2 horas con gel de sílice.
- Inmersión de las probetas en agua durante 48 horas.

La metodología seguida para cada ciclo ha sido:

- Las probetas se mantuvieron a -12°C durante 12 horas.
- Posteriormente se descongelan inmersas en agua, durante 12 horas a una temperatura de 20°C (la Norma UNE-EN fija tanto el periodo de congelación como el de descongelación en 6 horas).

El número total de ciclos ha sido de 30 (la norma no especifica el número de ciclos a realizar).

Resultados y Discusión

En las Tablas IV y V aparecen los valores de las propiedades físicas estudiadas pre y post ensayo con sus respectivas variaciones. Para este ensayo la norma específica que el grado de deterioro debe valorarse en función de la pérdida de volumen aparente; en ambas variedades los resultados obtenidos (0,5% para la variedad amarilla y 0,06% para la gris), son claramente insignificantes (la norma considera que no se produce deterioro cuando la variación de dicho valor es menor del 1%). En cuanto a la pérdida de masa, también es insignificante: 0,5 y 0,08% para las variedades amarilla y gris, respectivamente.

La densidad y porosidad presentan también pequeñas variaciones: la variedad amarilla tiene un mayor incremento de la porosidad (3,9% frente a un 1% de la gris), lo que se traduce en unos descensos del 1,3% y del 0,5% respectivamente en sus densidades aparentes.

La velocidad de propagación de ondas longitudinales sí que presenta disminuciones significativas en las muestras ensayadas, siendo mucho más acusadas en la variedad amarilla que en la gris (del orden de 3,5 veces más). En cuanto al comportamiento de las velocidades en cada

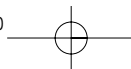


Tabla IV. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de hielo-deshielo en la variedad gris. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_p); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Volumen aparente (%)	Pérdida de peso (%)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	n_p (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	143,4	---	2123 \pm 4	19,3 \pm 0,1	2456 \pm 77	2387 \pm 53	2185 \pm 70
Post ciclos	143,3	---	2112 \pm 3	19,5 \pm 0,1	2359 \pm 41	2302 \pm 66	2063 \pm 61
Variación (%)	-0,06	0,08	- 0,5	+1,0	- 3,9	-3,6	-5,6

Tabla V. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de hielo-deshielo en la variedad amarilla. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_p); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Volumen aparente (%)	Pérdida de peso (%)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	n_p (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	128,9	---	1976 \pm 4	25,4 \pm 0,2	1592 \pm 37	1622 \pm 60	1351 \pm 44
Post ciclos	128,3	---	1951 \pm 5	26,4 \pm 0,2	1381 \pm 42	1390 \pm 65	1054 \pm 66
Variación (%)	-0,5	0,5	-1,3	+3,9	- 13,3	-14,3	-22,0

dirección, se observa que en las direcciones X e Y (en ambas variedades) los descensos, aún siendo significativos (del orden del 13% para la variedad amarilla y del 4% para la gris), son claramente inferiores a los determinados en la dirección Z (22% y 6% respectivamente), lo que se interpreta como debido al desarrollo preferencial de la figuración inducida por los ciclos de hielo-deshielo en planos más o menos paralelos a los bandeados composicionales y texturales presentes originalmente en las muestras.

Los cambios experimentados en el aspecto externo en las muestras post-ciclos no son muy marcados (Figs. 4 y 5), asignándoles (según la norma) una escala 1: “daños mínimos (redondeo mínimos de esquinas y bordes) que no comprometen la integridad de la probeta”.

Además se ha observado la existencia de una pequeña desagregación superficial con pérdida de material que es más marcada en las zonas que presentan el bandeo composicional; en el caso de la variedad amarilla y preferentemente en las zonas donde se presentan los anillos de Liesegang dicho efecto es aún más manifiesto, lo que puede interpretarse como debido a que en dichas zonas existe una menor cementación y, por lo tanto, mayor porosidad inicial, lo que aumenta la agresividad de los ciclos.

Ciclos de cristalización de sales

Metodología experimental

Este ensayo está diseñado para evaluar la resistencia a la cristalización de sales de la Piedra Natural cuando pueda ser utilizada en zonas de ambientes ricos en sales, por ejemplo, marinos, desérticos o zonas en las que el agua de absorción capilar pueda estar cargada de sales (procedentes del subsuelo, de los morteros de unión,

etc.); las consecuencias se observan en las fachadas de algunos edificios: manchas blanquecinas con un aspecto pulverulento (eflorescencias) que son debidas a la evaporación del agua produciéndose la precipitación de las sales (Ordaz y Esbert, 1988).

Este hecho, muy extendido en las partes bajas de los edificios (asociado al fenómeno de capilaridad), es debido a la existencia en el interior de los poros y fisuras de las rocas de agua con sales solubles que, debido a las variaciones de humedad o de concentración, pueden cristalizar (con la consiguiente presión de cristalización sobre las paredes de los espacios vacíos), o bien pasar del estado anhidro al hidratado, con el correspondiente aumento de volumen, lo que se traduce en la aparición de esfuerzos mecánicos que conducen al aumento de la fisuración y porosidad y, por ello, a la degradación de la roca. En este trabajo se ha seguido la norma UNE-EN 12370 (1999), con algunas variaciones (que se especifican cuando procede).

Se utilizaron muestras cúbicas de 5 cm de arista (4 cm señala la norma). La razón de escoger este tamaño fue la de unificar el tamaño de las probetas (con la misma superficie específica) en todos los ensayos realizados con el fin de interpretar mejor los resultados. Para cada variedad se han ensayado cuatro muestras con el siguiente procedimiento previo:

– Secado de las probetas a 60°C en un horno eléctrico con ventilación forzada de aire hasta peso constante (la norma específica que la temperatura de secado debe ser de 105 \pm 5°C; los autores opinan que esta temperatura puede ser claramente excesiva para determinados tipos rocosos a la vista de estudios experimentales previos; ver, por ejemplo, Calleja, 1991 y Ruiz de Argandoña, 1991).

– Enfriamiento en un desecador durante 2 horas con gel de sílice.

Las etapas correspondientes a cada uno de los 15 ciclos (indicados por la norma) han sido:

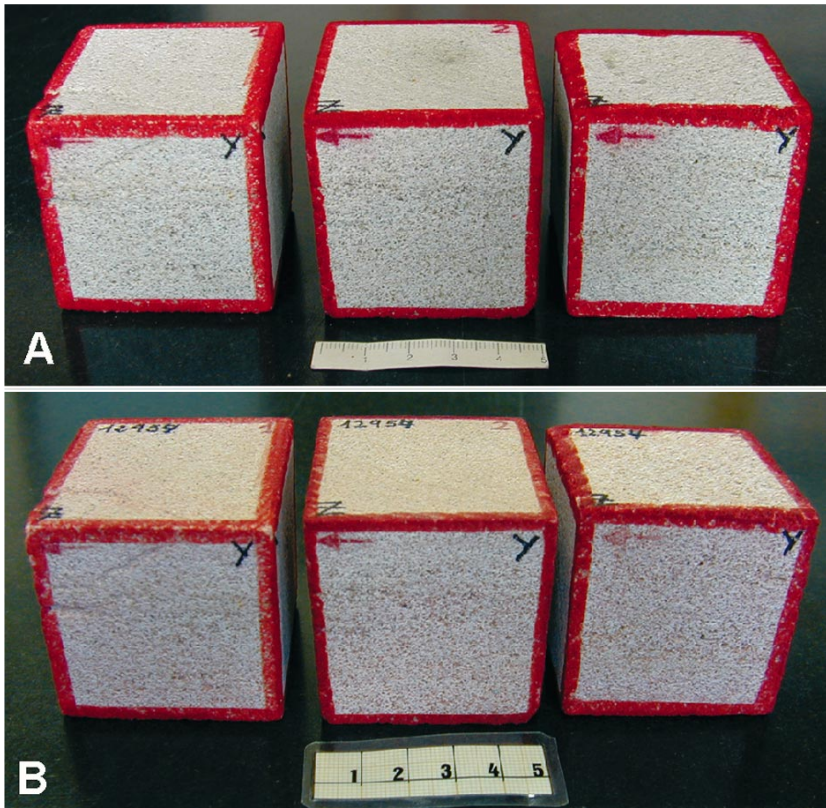
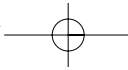


Figura 4. Aspecto de las probetas de arenisca gris antes (A) y después (B) de los ciclos de hielo-deshielo. Escala en cm.



Figura 5. Probetas de la variedad amarilla de la Arenisca de La Marina antes (A) y después (B) de los ciclos de hielo-deshielo. Escala en cm.

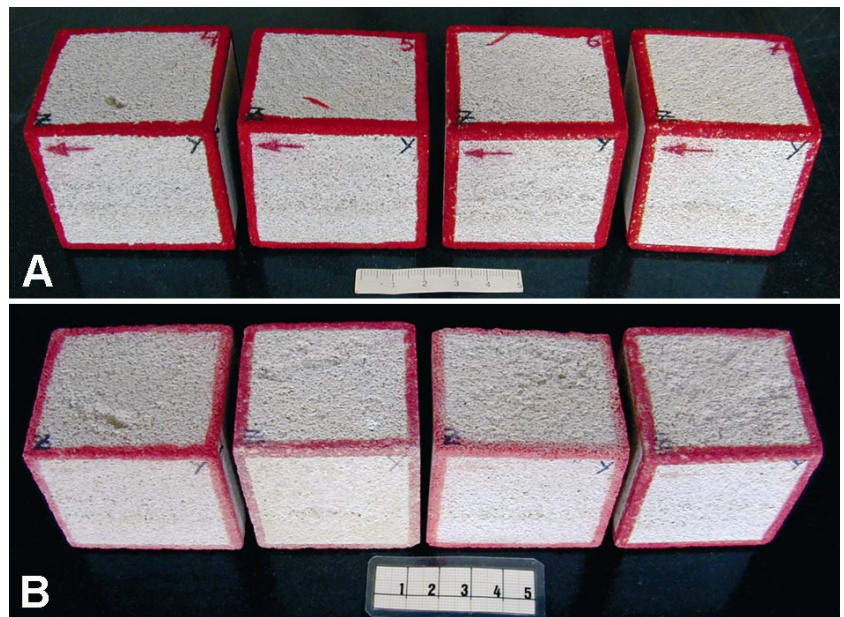
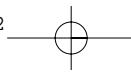


Figura 6. Aspecto de las probetas de arenisca gris antes (A) y después (B) del ensayo de cristalización de sales. Escala en cm.



Figura 7. Aspecto de las probetas de arenisca amarilla antes (A) y después (B) del ensayo de cristalización de sales. Escala en cm.

Tabla VI. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de cristalización de sales en la variedad gris. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_o); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Pérdida de peso (%)	ρ (kg/m ³)	n_o (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	---	2117 \pm 9	19,5 \pm 0,3	2469 \pm 23	2443 \pm 31	2245 \pm 58
Post ciclos	---	2103 \pm 11	20,1 \pm 0,4	2302 \pm 27	2316 \pm 53	2062 \pm 75
Variación (%)	1,1	- 0,6	+ 3,0	- 6,8	- 5,2	-8,2

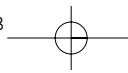


Tabla VII. Valores medios de las propiedades físicas pre y post ciclos de cristalización de sales en la variedad amarilla. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_o); velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones X (V_{LX}), Y (V_{LY}) y Z (V_{LZ}).

	Pérdida de peso (%)	ρ (kg/m ³)	n_o (%)	VLX (m/s)	VLY (m/s)	VL Z (m/s)
Pre ciclos	---	1996 ±37	24,8 ±,3	1876 ±126	1865 ±138	1733 ±120
Post ciclos	---	1930 ±83	27,3 ±6	---	---	---
Variación (%)	16,6	- 3,4	+ 10,3	---	---	---

Tabla VIII. Variación de algunas propiedades físicas pre y post ciclos en las variedades estudiadas. Densidad de la roca seca (ρ); porosidad abierta (n_o); velocidad de las ondas longitudinales en la dirección Z (V_{LZ}). Ciclos de humedad/sequedad (H/S); Ciclos de hielo/deshielo (H/D); Ciclos de cristalización de sales (SALES.).

Ensayo	VARIEDAD GRIS Variación (%)			VARIEDAD AMARILLA Variación (%)		
	H/S	H/D	SALES	H/S	H/D	SALES
Pérdida de peso	0,05	0,08	1,1	0,2	0,5	16,6
ρ (kg/m ³)	-0,05	-0,5	-0,6	-0,2	-1,3	-3,4
n_o (%)	+0,2	+1,0	+3,0	+0,8	+3,9	+10,3
V_{LZ} (m/s)	-0,09	-5,6	-8,2	-0,8	-22,0	---

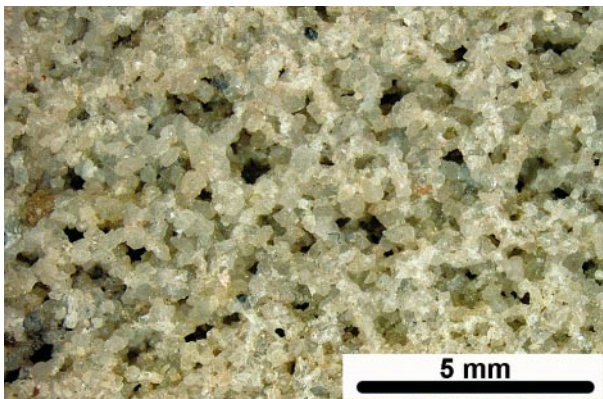


Figura 8. Detalle de la superficie de una probeta de arenisca gris sometida a ciclos de cristalización de sales observada mediante lupa binocular.

- Inmersión de las muestras durante 2 horas en una solución acuosa de sulfato sódico decahidratado al 14% en peso.
- Secado de las muestras en un horno eléctrico durante 20 horas (la Norma UNE-EN indica 16 como mínimo), a 60°C (no a 105±5°C como cita la norma).

Posteriormente, las probetas se dejan enfriar durante 2 horas a temperatura ambiente, antes de volver a sumergirlas nuevamente en la solución salina.

Para finalizar el ensayo, se lavan las muestras con agua y se secan hasta peso constante, con el fin de eliminar las sales que se introdujeron en el sistema poroso, determinándose posteriormente tanto la variación en peso, como el resto de propiedades físicas estudiadas.

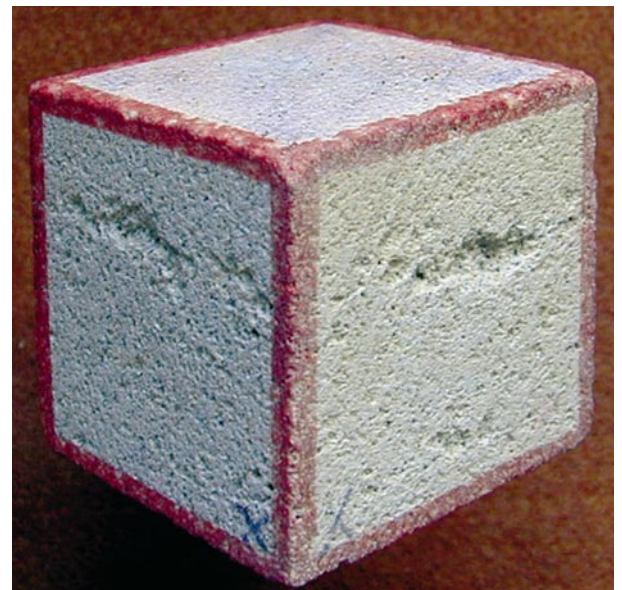


Figura 9. Alteración diferencial debida a variaciones composicionales y/o texturales en una probeta de arenisca gris sometida al ensayo de cristalización de sales. Arista: 5 cm.

Resultados y Discusión

En la Tablas VI y VII aparecen los valores de las propiedades físicas estudiadas antes y después del ensayo y sus respectivas variaciones. Puede verse que, nuevamente, es la variedad gris la que presenta una mayor durabilidad.

En la variedad amarilla, la porosidad aumenta un 10,3% siendo la pérdida en peso de un 16,6%. El relativamente



Figura 10. Aspecto de una probeta de arenisca amarilla sometida al ensayo de cristalización de sales en la que se manifiesta una alteración diferencial condicionada por la composición mineralógica y la textura. Arista: 5 cm.

bajo incremento de la porosidad frente a la pérdida de peso se ha interpretado como debido a que la cristalización de sales provoca desagregación superficial en las caras de los cubos, lo que no se traduce en el aumento de la porosidad efectiva de la roca.

En esta variedad, la gran cantidad de material perdido en la superficie de las muestras origina un aumento importante de la rugosidad superficial, lo que dificulta la medida de las velocidades de ondas elásticas, obteniéndose resultados tan erráticos que hace que la fiabilidad de los mismos sea escasa.

En la variedad gris la porosidad experimenta un incremento del 3%, mientras que la pérdida en peso es de solamente el 1,1%, lo que se interpreta como que los ciclos originan la creación y desarrollo de poros y fisuras, más que una pérdida de material superficial, lo que conlleva a la importante disminución de los valores de las velocidades de ondas elásticas (Calleja et al., 1989). Las variaciones son parecidas (6,8 y 5,2%) en las direcciones X e Y respectivamente; sin embargo en la dirección Z el porcentaje de variación es algo mayor (8,2%), interpretándose como que la porosidad generada por la cristalización de las sales tiene un mayor desarrollo en la dirección paralela a los planos de estratificación (perpendicular a la dirección Z).

Respecto a los cambios experimentados en el aspecto externo, en ambas muestras puede observarse que existe un picoteado claramente visible en todas las caras de las muestras post-ciclos, el cual es debido a la pérdida de material por desagregación superficial (Figs. 6 y 7); un aspecto en detalle puede verse, para la variedad gris, en la Figura

8; el efecto es más notable en las zonas con mayor contenido en arcillas (Fig. 9) y es también claramente observable en la variedad amarilla, siendo más evidente en los anillos de Liesegang que, al tener una mayor porosidad o más matriz arcillosa, la acción ha sido más intensa (Fig. 10).

Conclusiones

Mediante dos técnicas diferentes (velocidad de propagación de ultrasonidos y tomografía axial computerizada de rayos X) se ha determinado la variabilidad textural de los materiales estudiados: con los estudios de la velocidad de propagación de ondas elásticas longitudinales se ha determinado la existencia de anisotropías, claramente definidas, paralelas a la estratificación; con la tomografía axial computerizada de rayos-X (TAC) se ha confirmado la existencia de las mismas, permitiéndonos “ver” su desarrollo por el interior de las muestras que, en el caso de la variedad gris, es bastante uniforme mientras que en la amarilla el desarrollo es más heterogéneo, lo que causa una mayor variabilidad de los valores de las propiedades físicas determinadas.

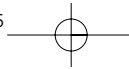
Los resultados de los ensayos de alterabilidad han confirmado que la agresividad de los mismos sobre los materiales estudiados es muy diferente, (Tabla VIII). Así, los ciclos de humedad-sequedad son, en las condiciones de ensayo realizadas y sobre los materiales estudiados, apenas agresivos; algo más son los de hielo-deshielo y son los de cristalización de sales los que generan un mayor deterioro y, por tanto, una menor durabilidad de las rocas.

A la hora de evaluar los daños sufridos por los materiales rocosos en los distintos ensayos de envejecimiento artificial acelerado, la medida de la velocidad de propagación de ondas longitudinales en la dirección perpendicular a las anisotropías texturales, parece ser más efectiva que el estudio de la variación de la densidad aparente o la porosidad abierta.

Tras los ensayos realizados, comparando el comportamiento de ambos materiales (Tabla VIII), puede afirmarse que es la variedad gris la que presenta una mayor durabilidad, pudiendo ser utilizada en todo tipo de ambientes, mientras que la amarilla puede presentar algunos problemas de deterioro (arenización o alveolización) en ambientes contaminados o marinos e incluso en las partes bajas de edificios en los que el agua de ascensión capilar pueda estar cargada de sales.

Agradecimientos

A la Universidad de Oviedo, por la financiación de esta investigación (Proyecto MA-05-17).



Bibliografía

CALLEJA, L., MONTOTO, M., PÉREZ GARCÍA, B., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., MARTÍNEZ HERNANDO, A. and MENÉNDEZ VILLAR, B. (1989): An ultrasonic method to analyse the progress of weathering during cyclic crystallization laboratory test. In: *Proc. 1st Int. Symp. "The Conservation of monuments in the Mediterranean Basin"* (F. Zezza, Ed.), 313-318. Bari (Italia).

CALLEJA, L. (1991): Variación de propiedades físicas en rocas sometidas a gradientes térmicos. *Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo*. Edición en Microficha. ISBN: 84-7468-377-7.

ESBERT, R. M. y VALDEÓN, L. (1984): Estudio petrofísico de las areniscas del Palacio de Revillagigedo de Gijón (Asturias). *Materiales de Construcción*, 34 (194): 61-72.

GILL, D. E., CORTHÉSY, R. and LEITE, M. H. (2005): Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. *Engineering Geology*, 78: 29-51.

KETCHAM, R. A. and CARLSON, W. D. (2001): Acquisition, optimisation and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27 (4): 381-400.

ORDAZ, J. y ESBERT, R. M. (1988): Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, 38 (209): 39-45.

PETTIJON, F. J., POTTER, P. E. and SIEVER, R. (1972): *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, Berlín, 618 pp.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G. (1991): Estudio de la microfisuración térmica mediante emisión acústica: interpretación petrofísica. *Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo*. Edición en Microficha. ISBN: 84-7468-376-9.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ-REY, A., CELORIO, C., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L. and LLAVONA, J. (1999a): Cha-

racterization by computed X-Ray tomography of the evolution of the pore structure of a dolomite rock during Freeze-Thaw cyclic test. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24 (7): 633-637.

RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., CALLEJA, L., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., RODRÍGUEZ-REY, A., CELORIO, C. y LLAVONA, J. (1999b): Aplicación de la tomografía axial computerizada de rayos X al estudio de materiales rocosos. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 21: 333-338.

SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L., DÍEZ SARRIÁ, I., RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A. y ALONSO, F. J. (2002a): Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 23: 73-84.

SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L., DÍEZ SARRIÁ, I., RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G., RODRÍGUEZ REY, A. y ALONSO, F. J. (2002b): *Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias*. In: SUÁREZ DEL RÍO, L. M. (Ed.), Univ. de Oviedo, Edición en CD.

UNE-EN 1936 (1999): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad total y abierta*. AENOR Eds., 12 pp.

UNE-EN 12370 (1999): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*. AENOR Eds., 10 pp.

UNE-EN 12407 (2001): *Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico*. AENOR Eds., 11 pp.

UNE-EN 12371 (2002): *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad*. AENOR Eds., 16 pp.

VOS, B. H. (1976): Water absorption and drying of materials. In: *Proc. of the Int. Symp. "The Conservation of Stone"* (R. Rossi Manaresi, Ed.), 679-694. Bologna (Italia).

