

CARACTERIZACIÓN QUÍMICO-FÍSICA DE LA PIEDRA TABAIRE Y EFICACIA DEL TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN MEDIANTE HIDRÓXIDO CÁLCICO

M. Lanzón⁽¹⁾, A. Piñero⁽²⁾

Dpto. de Arquitectura y Tecnología de la Edificación. Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación, de la Universidad Politécnica de Cartagena. Campus Paseo Alfonso XIII, 30203 Cartagena, España

marcos.lanzon@upct.es⁽¹⁾ alicia_pm_88@hotmail.com⁽²⁾

RESUMEN

La piedra Tabaire es una calcarenita extraída de las canteras romanas de Cartagena (España). Una parte importante del patrimonio arqueológico y arquitectónico de la ciudad se construyó total o parcialmente con este material. Algunos ejemplos son el Teatro Romano (S.I a.C.), la Muralla Púnica (S.III a.C.) o el Antiguo Hospital de Marina (S.XVIII), actual sede de la Universidad Politécnica de Cartagena. Antiguamente, el bloque de Tabaire era recubierto de yeso, cal o mortero con objeto de evitar su rápida degradación; en la actualidad, la piedra podría deteriorarse rápidamente debido a la ausencia de tales recubrimientos. El objetivo de este trabajo, consiste en realizar una caracterización químico-física del material e investigar un método de estabilización que sea limpio,

seguro y permita una mejor conservación del Tabaire. Para la caracterización química se realizaron ensayos de Termogravimetría, Fluorescencia de rayos X y Difracción de rayos X. En la determinación de propiedades físicas se usaron ensayos no destructivos (esclerómetro Schmidt y ultrasonidos), así como ensayos mecánicos y de absorción capilar. Por último, se investigó un método de consolidación basado en saturar la piedra con suspensiones de hidróxido cálcico. Los resultados de caracterización indican que se trata de una roca rica en carbonato cálcico, que contiene calcita y/o dolomita e inclusiones de cuarzo. El material presenta una estructura muy porosa, así como baja resistencia mecánica y escasa dureza superficial. Debido a su porosidad, posee una elevada absorción de agua siendo, por tanto, más sensible a los agentes atmosféricos. La piedra Tabaire podría

estabilizarse con suspensiones de hidróxido de calcio, cuya principal ventaja es la formación de depósitos de carbonato cálcico de naturaleza muy similar a la roca. Sin embargo, aunque el método estudiado proporciona ciertas mejoras, la elevada porosidad de la piedra dificulta el sellado de los poros limitando la eficacia del tratamiento.

PALABRAS CLAVE: Piedra Tabaire; Caracterización; Consolidación; Canteras Romanas.

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina Tabaire a la piedra extraída de Canteras, pedanía situada a 5.5 Km al oeste de Cartagena (España). Esta localidad debe su nombre a la existencia de un importante afloramiento de rocas sedimentarias de unos seis kilómetros de longitud por uno de anchura, compuesto fundamentalmente por depósitos sedimentarios de color amarillento formados durante el Mioceno (Fig. 3.A). Estas rocas fueron intensamente explotadas entre finales del siglo III a.C. y el I d.C., así como durante las épocas moderna y contemporánea [1]. El yacimiento consta de ocho canteras que conforman una monumental explotación de piedra arenisca declarada 'Bien de Interés Cultural' en 1933 con categoría de 'Sitio Histórico'.

Su explotación suministró bloques para la construcción de los principales elementos arquitectónicos de Cartagena a lo largo de más de dos mil años. El Teatro Romano (S.I a.C.), la Muralla Púnica (S.III a.C.) o el Antiguo Hospital de Marina (S.XVIII), actual sede de la Universidad Politécnica de Cartagena son algunos ejemplos. En el lugar que corresponde al istmo y por tanto el único punto de acceso terrestre a la ciudad, entre los cerros de San José y Despeñaperros, se descubrió en 1987 los restos de la

Muralla Púnica (Fig. 3.B), referenciada en los textos históricos por su impresionante envergadura y hallada en un punto donde además, se habían llevado a cabo diversos ataques de las tropas romanas. El hallazgo y excavación del **Teatro Romano** de Cartagena (Fig. 3.C) en estos últimos años ha sido uno de los descubrimientos más sorprendentes de la arqueología de la ciudad, pues si bien se sospechaba por estudiosos y arqueólogos la entidad que debía tener la urbe en época romana, sus monumentales restos han venido a certificar el importante papel que desempeñó en la historia de la Hispania antigua. El **Antiguo Hospital Militar de Marina** de Cartagena (Fig. 3.D) es actualmente la sede de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica. Se encuentra ubicado en el casco antiguo de la ciudad, junto a la Plaza de Toros, el Cuartel de Antiguones y la Muralla de Carlos III. Esta gran obra arquitectónica forma parte del conjunto de construcciones militares que se edificó en Cartagena en el siglo XVIII.

El objetivo inicial de este trabajo consiste en la caracterización química del Tabaire. Partiendo de esta información se puede predecir el comportamiento del material, así como proponer métodos de consolidación compatibles con la naturaleza de la piedra. En segundo lugar, para poder evaluar la eficacia del posterior

tratamiento de consolidación, se determinaron algunas propiedades físicas del Tabaire. Finalmente, se optimizó un método de consolidación basado en la aplicación de suspensiones de hidróxido cálcico, comparándose algunas propiedades antes y después de la consolidación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las técnicas empleadas para analizar la composición química y mineralógica del Tabaire fueron termogravimetría, fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X. Para termogravimetría se usó un analizador modelo TGA/DSC 1HT de Mettler-Toledo. Esta técnica mide la pérdida de masa de la muestra, sometida a un calentamiento progresivo, en función de la temperatura o el tiempo de calentamiento. El instrumento utilizado para el análisis de fluorescencia de rayos X fue el espectrómetro modelo S4 Pioneer de Bruker. Se trata de una técnica de espectrometría atómica basada en la detección de radiación X emitida por átomos excitados. Los fotones emitidos en los procesos de fluorescencia son característicos de cada elemento y su intensidad determina la concentración del mismo. Por último, se utilizó un difractómetro de rayos X, modelo D8 Advance de Bruker (Fig. 4.A). En esta técnica cada sólido cristalino difracta la radiación absorbida por la muestra a determinados

MODULO 1

ángulos. La ventaja de la difracción reside en que cada compuesto proporciona difracciones características de él para ciertos ángulos (2θ), que se representan en el difractograma.

Se usaron dos ensayos no destructivos basados en la determinación de dureza superficial y la velocidad de propagación de ultrasonidos (Fig.4.B). La dureza superficial se determinó, directamente sobre un bloque de Tabaire, con un esclerómetro Schmidt [3-4]. La velocidad de propagación se obtuvo con un medidor de pulsos ultrasónicos sobre probetas de 7.5 cm de diámetro y 10 cm de altura que fueron previamente extraídas del bloque (Fig. 4.C). De forma complementaria, se realizaron ensayos mecánicos de resistencia a compresión mediante rotura de las probetas extraídas de Tabaire, así como ensayos de absorción capilar para obtener el coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

El tratamiento de consolidación consistió en una serie de ciclos de inmersión-secado (24h cada uno) de las probetas, sumergiéndolas parcialmente en una solución de agua de cal obtenida al dejar sedimentar una disolución constituida por agua destilada, isopropanol (20% v/v) e hidróxido cálcico (5g/l) y utilizando únicamente el líquido sobrenadante. Esta serie de ciclos también se llevó a cabo

con probetas control sumergidas en agua corriente (Fig. 4.D) [2]. Antes y después del tratamiento, las probetas se sometieron a ensayos de absorción capilar, ultrasonidos y resistencia a compresión con el fin de comparar resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización química del Tabaire

En la Tabla 1 se muestra la composición elemental del Tabaire obtenida por fluorescencia de rayos X. Se hallaron porcentajes muy elevados de oxígeno (52.45%) por tratarse de un elemento que está presente en carbonatos y silicatos. La elevada abundancia de calcio (23.65%) indica que el Tabaire es una roca fuertemente caliza. La presencia de magnesio (2.81%) es frecuente en rocas carbonatadas dolomíticas.

Elemento	%, masa
C	10.27
O	52.45
Si	8.25
Ca	23.56
Mg	2.81
Fe	0.81

Tabla 1. Análisis elemental de Tabaire por fluorescencia de rayos X

Los ensayos de termogravimetría

(Fig. 1.A) y difracción de rayos X (Fig. 1.B) confirman que se trata de una roca fundamentalmente caliza. En la curva termogravimétrica se observa una pérdida de CO₂ procedente de carbonatos de origen biogénico (fósiles) y otra mucho más importante a 750°C, correspondiente a la descomposición del carbonato cálcico según el proceso: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

En el difractograma de rayos X destacan algunos minerales como moscovita, cuarzo, calcita y dolomita, todos ellos frecuentes en rocas calcareníticas. No obstante, los minerales más abundantes son la calcita, el cuarzo y la dolomita. La moscovita es una arcilla presente en muchos materiales sedimentarios y aparece también en el Tabaire. Se detectaron también otros minerales menos frecuentes como la ankerita, que consiste en un carbonato mixto de calcio y hierro (Tabla 1).

3.2. Caracterización física del Tabaire

Las medidas de dureza se llevaron a cabo con el esclerómetro sobre un bloque de Tabaire estable de grandes dimensiones (Fig. 2.C). De forma complementaria, se extrajeron de este bloque testigos cilíndricos (probetas) para estudiar absorción capilar de agua, velocidad de propagación de ultrasonidos y resistencia mecánica del Tabaire (Tabla 2). La velocidad de propagación (3082 m/s) y dureza expresada como índice de rebote (20.7) confirman que se trata de una roca blanda y poco cohesionada.

La determinación de la absorción capilar de agua se realizó de dos formas. En el primer método, se midió el coeficiente de absorción capilar en un periodo de tiempo de 20 minutos. En el segundo ensayo, se estudió la absorción de agua hasta saturar el material. El coeficiente de capilaridad obtenido (0.184 g/cm² min^{0.5}) es realmente alto para un material pétreo (Tabla 2).

En la curva de absorción capilar (Fig. 2.A) se observa que las probetas de Tabaire se saturaban de agua en tan solo tres horas, por lo que se trata de una roca muy permeable.

Tabla 2. Propiedades físicas del Tabaire

Índice de rebote (N=12)	Velocidad de propagación ultrasonidos, m/s	Absorción capilar de agua, g/cm ² min ^{0.5}	Resistencia a compresión, MPa
20.7 ± 2.25	3082 ± 84	0.184 ± 0.069	13.69 ± 0.857

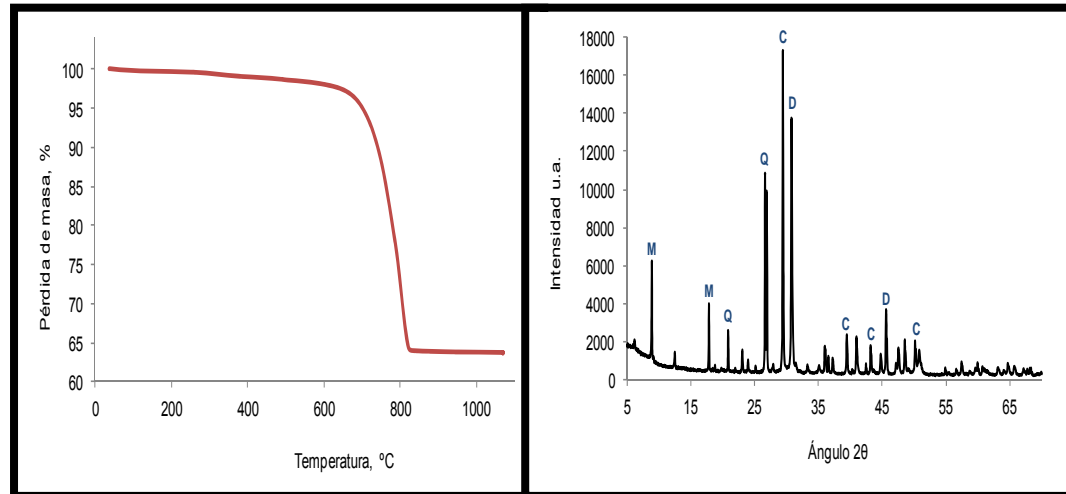


Fig. 1. Termograma (A) y difractograma de rayos X (B) de muestra de Tabaire. La roca presenta una gran abundancia de carbonatos y cuarzo.

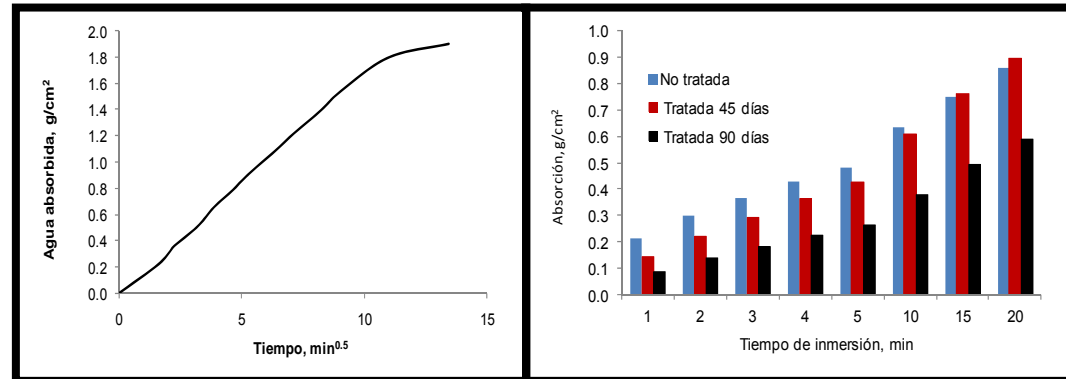


Fig. 2. A: Absorción de agua por capilaridad frente a la raíz cuadrada del tiempo (3 horas). B: Absorción capilar de agua en muestras de Tabaire no tratadas (azul), tratadas durante 45 días (rojo) y tratadas durante 90 días (negro) con suspensiones de Ca(OH)₂ e isopropanol.

3.3. Tratamiento de consolidación mediante suspensiones de Ca(OH)₂

En la Fig. 2.B se muestran los resultados de absorción capilar del Tabaire, en probetas sin tratamiento (No tratadas) y probetas estabilizadas tras 45 y 90 días, de tratamiento con suspensiones de Ca(OH)₂.

Como muestra la Fig. 4.B, el tratamiento resulta eficaz en

los primeros minutos de inmersión capilar. Sin embargo, a tiempos mayores de 20 minutos se observó una pérdida de efectividad que podría estar relacionada con la profundidad de carbonatación del hidróxido cálcico. Aún así, al comparar con muestras no tratadas, la consolidación dio buenos resultados tras 90 días de consolidación, y resultados algo mejores al consolidar las probetas durante 45 días.

En los ensayos de ultrasonidos, la roca tratada dio signos de consolidación, pues la velocidad de propagación fue algo mayor para estas probetas. Los valores de velocidad de propagación en probetas no tratadas, tratadas 45 días y tratadas 90 días fueron 3082 m/s, 3239 m/s y 3174 m/s, respectivamente. Finalmente, en los ensayos de compresión de probetas estabilizadas con agua de cal, se registraron valores de 14.24 ± 1.021 MPa, lo que indica una pequeña mejora de en torno al 4% respecto a probetas no tratadas.

4. FOTOS

Fig. 3.

A: Canteras romanas de Cartagena.

B: Paramentos de piedra Tabaire de la Muralla Púnica.

C: Teatro Romano de Cartagena.

D: Antiguo Hospital Militar de Marina.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de *D. Pedro Cifuentes Rosso*, Coordinador de Responsabilidad Social Corporativa de FCC por la Delegación de Murcia y Almería.

Queremos también extender nuestro agradecimiento al *Prof. Gabriel Ros Aguilera* del Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación de la UPCT.

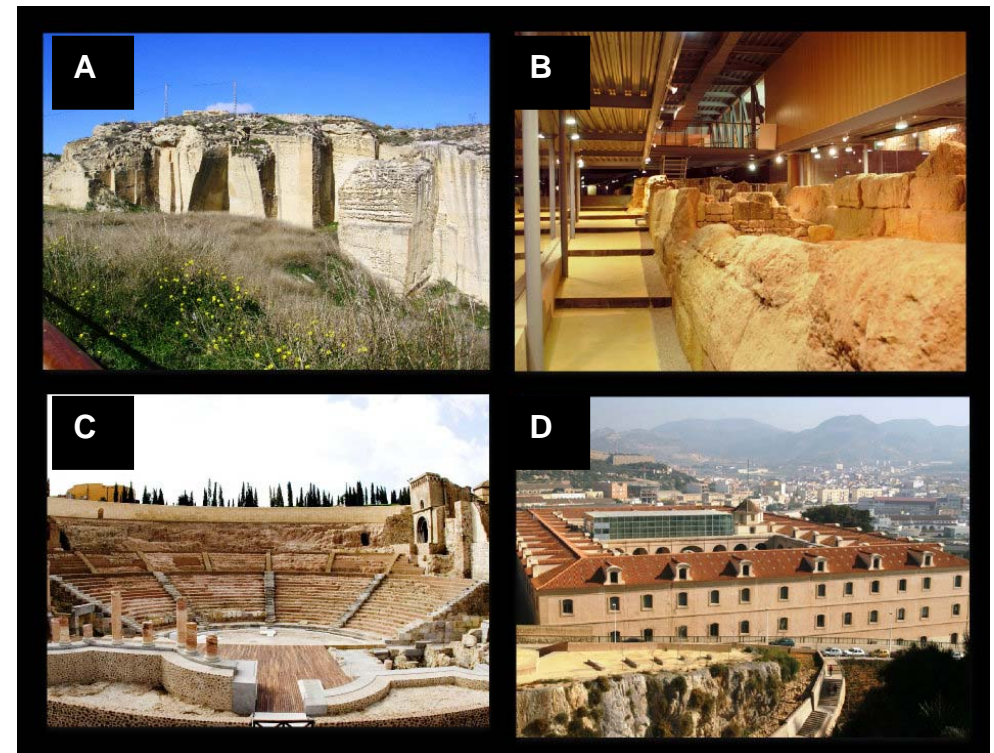


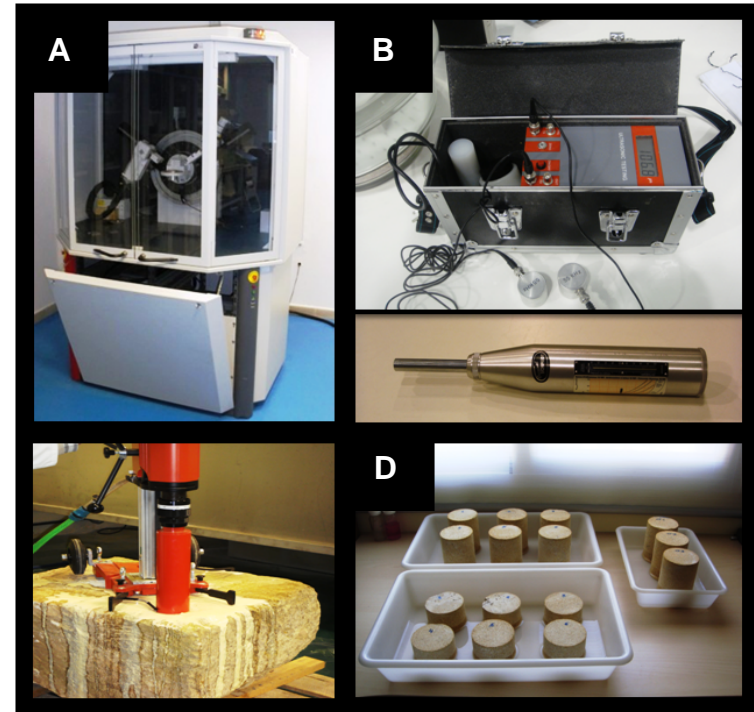
Fig. 4.

A: Difractómetro de rayos X.

B: Ensayos no destructivos, equipo de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt.

C: Extracción de probetas sobre bloque de Tabaire.

D: Inmersión de probetas en agua de cal.



Conclusiones

- El Tabaire es una roca heterogénea que presenta características diferentes en color, textura y forma de erosión. Los principales minerales del Tabaire son calcita y cuarzo. En algunos ensayos aparece dolomita y ankerita, esta última en menor proporción. La roca contiene CO₂ de origen orgánico debido a la presencia de restos fósiles (biocalcarenita).
- Se trata de una roca de elevada absorción de agua por capilaridad. La velocidad de propagación de ultrasonidos resultó ser baja para tratarse de un pétreo. El índice de rebote obtenido con el esclerómetro confirma que se trata de una piedra de baja dureza superficial.
- El tratamiento de consolidación empleado reduce la absorción de agua del Tabaire. La velocidad de propagación aumenta sensiblemente y la piedra es algo más resistente a compresión

tras el tratamiento propuesto.

Referencias

- [1] R. Arana, M.A. Mancheño, J.I. Manteca, T. Rodríguez, J.A. Rodríguez, F. Serrano, "Las canteras de Roca Tabaire de Canteras (Cartagena). Contexto geológico e importancia como patrimonio geológico y minero", Cuadernos del Museo Geominero, 2003, 2: 65-78.
- [2] E. Doehne, C.A. Price, "Stone Conservation. An Overview of Current Research". Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2010.
- [3] O. Katz, Z. Reches, J.C. Roegiers, "Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer", Israel International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999.
- [4] D. M. McCann, M. C. Forde, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures", NDT & E International, 2001, 34 (2), 71-84.