

DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE MONUMENTOS DE INTERÉS CULTURAL A TRAVÉS DE MÉTODOS NO INVASIVOS

PACS: 43.35.Zc

Tejado Ramos, Juan José ⁽¹⁾; Del Río Pérez, Luis Mariano ⁽²⁾; García Trujillo, Alba ⁽²⁾; Ramos Miguel, Javier ⁽²⁾; García González, Alexander ⁽²⁾

(1) Instituto de las Rocas Ornamentales y materiales de la Construcción (INTROMAC)

Avda. de la Universidad s/n.

10003 Cáceres. España

Tel: 927 257 195. Fax: 927 257 203

E-Mail: jjtejado@intromac.com

(2) Departamento de Física Aplicada. Escuela Politécnica. Universidad de Extremadura.

Avda. de la Universidad s/n.

10003 Cáceres. España

Tel: 927 257 195. Fax: 927 257 203

E-Mail: Imdelrio@unex.es. agarciaoo@alumnos.unex.es

ABSTRACT

Intervention on real estate is an opportunity to clarify and increase awareness of its constituent materials, nature, origin and possible alterations sustained over time. The selection of a set of monuments of Extremadura with some type of deterioration, has enabled first defined on one of them, a protocol of diagnosis from destructive and non destructive trials for subsequent checking its viability and effectiveness in other selected monuments. This work includes the comprehensive study conducted with ultrasound, which allows us to characterize the granite used in the construction of the Conventual of San Antonio in Garrovillas (Cáceres).

RESUMEN

La intervención sobre Bienes Inmuebles es una oportunidad para esclarecer y aumentar el conocimiento de sus materiales constituyentes, naturaleza, origen y posibles alteraciones sufridas a lo largo del tiempo. La selección de un conjunto de monumentos de Extremadura con algún tipo de deterioro, ha permitido en primer lugar definir sobre uno de ellos, un protocolo de diagnóstico a partir de ensayos destructivos y no destructivos, para la posterior comprobación de su viabilidad/efectividad en otros monumentos seleccionados. Este trabajo recoge el estudio exhaustivo realizado con ultrasonidos, que nos permite caracterizar los granitos empleados en la construcción del Conventual de San Antonio de Garrovillas (Cáceres).

INTRODUCCIÓN

Una fase importante en la Intervención sobre Bienes Culturales de carácter inmueble, son los estudios previos para la caracterización tanto de los materiales originales, como aquellos que se hayan podido emplear o se vayan a utilizar en intervenciones posteriores, unido al conocimiento histórico-arqueológico de los mismos. Es importante definir los estudios iniciales mínimos, con objeto de realizar en un futuro el diagnóstico del estado de conservación del patrimonio [1],[2]. La catalogación y caracterización de los materiales utilizados, nos permitirá

determinar su estado de conservación, identificar los factores, mecanismo y procesos de alteración, además de una evaluación de propuestas de conservación.

La actuación sobre un edificio existente conlleva una complejidad importante y exige una especialización tanto de los técnicos como de los operarios que han de llevarla a cabo. Es necesario por tanto, tener un cierto dominio de los materiales y de las lesiones que pueden presentar las construcciones, así como de las herramientas de inspección y pruebas de laboratorio adecuadas a la diagnosis específica de cada caso.

USO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EN EL PATRIMONIO CULTURAL

Uno de los aspectos más importantes que hay que tomar en consideración cuando se interviene sobre un bien cultural, es el del respeto a su integridad, favorecida por la utilización de técnicas lo menos invasivas posible.

Existe una gran cantidad de técnicas no destructivas aplicables al Patrimonio, pero por el tipo de trabajo realizado y el tipo de materiales de los monumentos elegidos, fueron seleccionadas como técnicas de referencia en nuestro estudio, dos técnicas no destructivas: ultrasonidos y esclerometría. Estas técnicas utilizadas se caracterizan por su disponibilidad, versatilidad, facilidad de utilización, movilidad y economía.

La técnica esclerométrica utiliza como equipo básico para su ejecución el Martillo Schmidt. En este trabajo se ha utilizado un Martillo Schmidt modelo L (energía de impacto 0,735 kN), con un rango de medida de la resistencia a compresión entre 10 y 70 N/mm². La aplicación de esta técnica permite hacer por una parte una estimación de la resistencia a compresión del material ensayado y de otra forma y de manera rápida, una evaluación de la homogeneidad del material a lo largo de todo el monumento.

Por otro lado, para la realización del estudio de los materiales pétreos mediante la técnica de ultrasonidos, se ha contado con dos equipos pertenecientes a los diferentes equipos de ultrasonidos: el equipo de INTROMAC (Profometer 5, Modelo S de Tico) y el equipo de la UEx (Steinkamp BP-V, con una frecuencia nominal de 50 kHz), pudiéndose hacer diferentes mediciones, utilizando diferentes metodologías.

La aplicación de la metodología desarrollada, permite mediante la determinación de la velocidad de ondas longitudinales y transversales, tanto in situ como en laboratorio, determinar/interpretar el nivel de deterioro de los elementos constructivos, pudiéndose de igual modo que en el caso anterior, predecir comportamiento del material rocoso y de su homogeneidad.

SELECCIÓN DEL MONUMENTO DE ESTUDIO

La selección de los monumentos a estudiar distinguía entre uno principal, sobre el que se realizarían ensayos destructivos y no destructivos con el fin de establecer el futuro protocolo de diagnóstico y de otros monumentos a prueba sobre los que se comprobaría la viabilidad y efectividad del protocolo de actuación establecido con técnicas menos invasivas.

Como edificio principal se escogió el Convento de San Antonio de Padua de Garrovillas, Cáceres, obra promovida por los primeros Condes de Alba de Aliste, XV-XVIII. Es un claro ejemplo de monasterio medieval, actualmente en ruinas. Destaca su Iglesia renacentista con bóveda de crucería. Es de una sola nave y ábside poligonal, con dos capillas laterales a cada lado, dos renacentistas y otras dos platerescas [3].

Uno de los principales valores del convento, se encuentra en su claustro, de sobrio estilo renacentista, tal como puede verse en la Figura 1. La parte baja tiene pilares cuadrados de sillería rematados con tres arcos de medio punto a cada lado, con bóveda de arista y saliente moldura, sobre los que corre una galería de cinco columnas.



(a)

(b)

Figura 1: Claustro del Convento de San Antonio de Padua de Garrovillas.

Tras la desamortización ha sufrido un continuo expolio. En la actualidad, pese a haber sido declarado Bien de Interés Cultural (BIC) se encuentra, en lamentable estado de ruina.

TOMA DE MUESTRAS EN EL MONUMENTO Y ANÁLISIS DE LOS MATERIALES

En ocasiones, es indispensable acotar la actuación a abordar con el fin de optimizar los recursos a emplear y los objetivos a emplear. En este trabajo, la abundancia de materiales presentes en el monumento (pétreos, cerámicos, morteros, maderas, etc.), obligó a centrar el estudio en aquellos materiales más importantes y representativos.

Reflejo de la geología de la zona, el material más abundante en el Convento de San Antonio de Padua es el granito, material sobre el que se centra el estudio recogido en este documento [4], [5], [6], [7]. Las diferentes tipologías de granitos presentes, pueden ser agrupados en dos tipos: granitos porfídicos y granitos de grano fino.

Para la caracterización inicial en laboratorio de la roca de los diferentes monumentos, es indispensable una toma mínima de muestras. Siguiendo la metodología definida previamente y atendiendo a criterios de mínima intervención sobre el monumento, se recogieron muestras correspondientes a fragmentos de sillería desprendidos por rotura o fracturación de los muros y techos, fundamentalmente en zonas en las que el deterioro por abandono es acusado, que permitieron la extracción de probetas de material pétreo para una detallada caracterización del mismo, según normativa específica (UNE-EN).

Debido a la disponibilidad de diferentes técnicas en los laboratorios, tanto de INTROMAC como de la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura, se procedieron a la realización de diferentes caracterizaciones sobre los materiales enviados al laboratorio y sobre los propios monumentos elegidos: caracterización petrológica y mineralógica, caracterización estructural e hídrica, caracterización físico-mecánica.

El estudio en detalle del material granítico procedente del monumento nos ha permitido obtener unos valores medios de sus principales propiedades físicas:

- Coeficiente de absorción de agua por capilaridad: $3,352 \text{ g/m}^{2+s} 0.5$
- Absorción de agua a presión atmosférica: 1,7 %
- Porosidad abierta: 4,8 %
- Densidad: 2.470 Kg/m^3
- Resistencia a compresión estimada: $40-50 \text{ N/mm}^2$

DETERMINACIONES IN SITU

Las técnicas no destructivas permiten hacer una gran cantidad de ensayos en un corto periodo de tiempo lo que ha permitido el análisis in situ de gran cantidad de sillares, localizados a lo largo del monumento.

En el caso del Conventual de San Antonio, cada uno de los pilares del claustro inferior fue identificado de forma inequívoca, para proceder a un estudio detallado de sus sillares. Además cada sillar fue identificado por una trama de colores para visualizar de forma sencilla su estado de conservación. A continuación se reproducen algunas fotografías de esta identificación, que forman parte de un trabajo más amplio (Figura 2).

De esta forma fueron identificadas para su estudio 12 pilares del claustro inferior, enumerados desde la letra A hasta la L. A partir de los datos obtenidos de los ensayos de cada uno de las de los sillares, se hicieron diferentes análisis estadísticos.

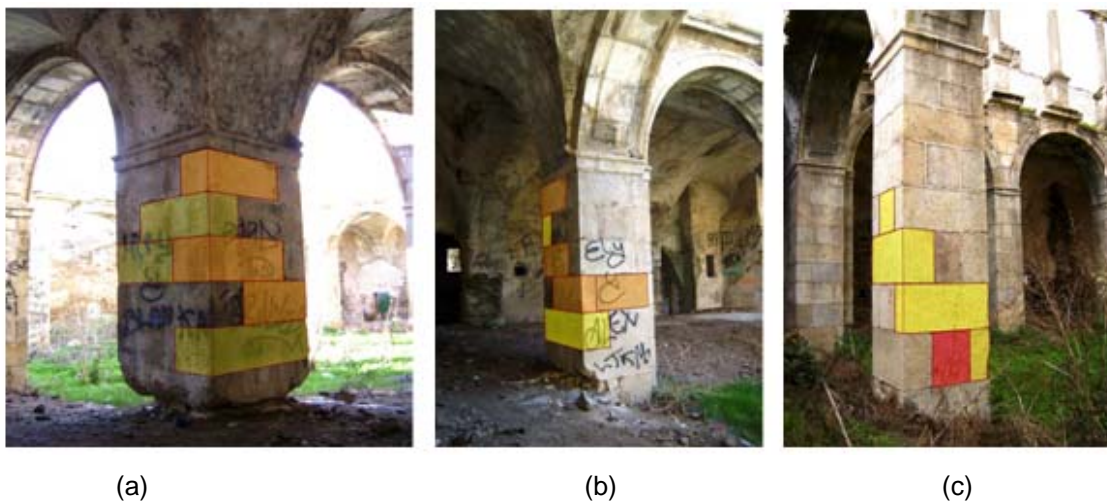


Figura 2: (a), (b), (c): Sillares de granitos marcados según su intervalo de velocidad ultrasónica

REGRESIÓN LINEAL

Utilizando los datos procedentes tanto de los ultrasonidos (U) como del esclerómetro de martillo (E) se ha efectuado un análisis de regresión lineal entre ambas variables, tal como se muestra en la (Figura 3).

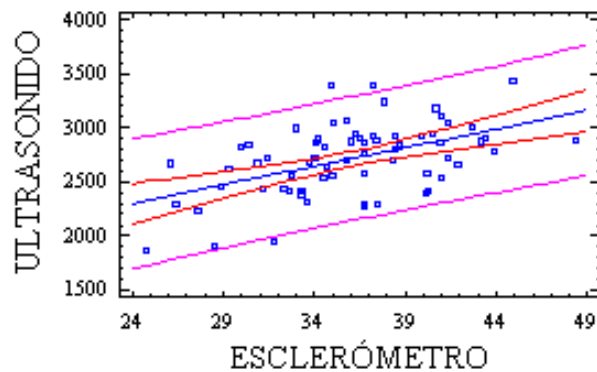


Figura 3: Regresión lineal datos esclerométricos y ultrasonidos

La ecuación obtenida que relaciona ambas variables es (U en m/s; E adimensional):

$$U = (34 \pm 7) * E + (1474 \pm 264) \quad r = 0,506$$

Se aprecia que el valor del coeficiente de regresión lineal, $r > 0,5$, nos indica la existencia de una moderada relación entre los datos colectados con el esclerómetro y con el equipo de ultrasonidos, en el rango de valores medidos con ambas técnicas. Por tanto, esta buena concordancia de resultados entre ambas técnicas nos indica la relación que existe entre las dos determinaciones.

Este modelo explica el 25 % de la variabilidad de los ultrasonidos respecto a las medidas del esclerómetro. El diferente comportamiento de ambas variables (aunque están relacionadas), se debería principalmente a que, a pesar de ser ambas técnicas mecánicas, el esclerómetro recoge la información del índice de rebote superficial de la piedra, en tanto que la onda ultrasónica penetra en el interior (al menos en parte) de la propia piedra, especialmente si la medida se realiza de manera directa o semidirecta, como ha sido el caso.

DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS.

En la figura 4 mostramos las distribuciones de frecuencia de los resultados ultrasónicos (a) y esclerométricos (b) de cuyo análisis deducimos:

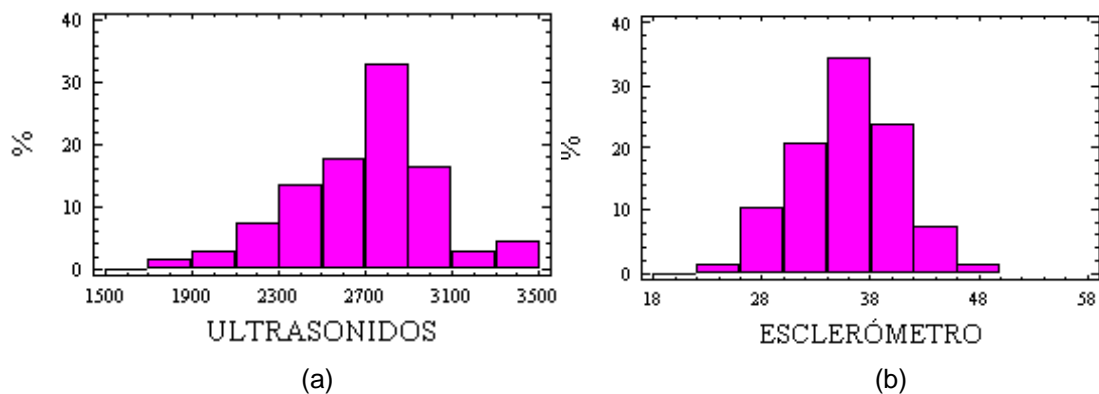
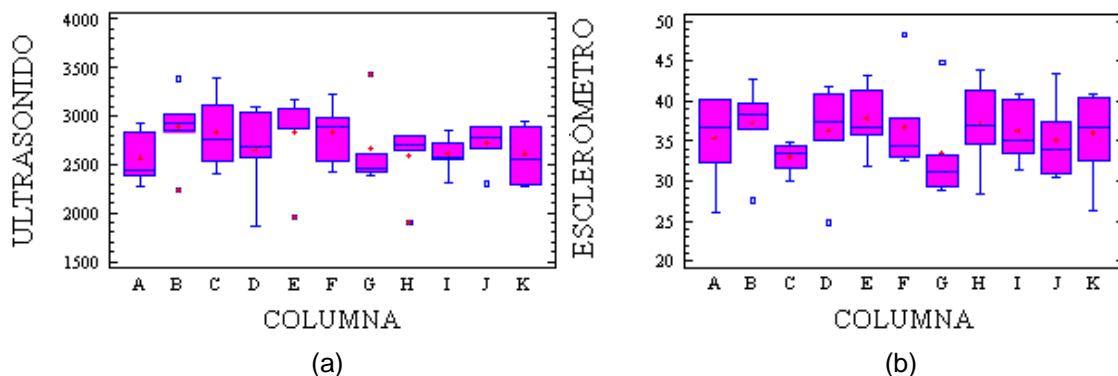


Figura 4 :Distribución de frecuencias datos esclerométricos y de ultrasonidos.

- Para ambas distribuciones los test de skewness y kurtosis establecen que se trata de distribuciones normales (valores entre -2 y $+2$), más claramente en el caso del esclerómetro.
- De las tablas de distribución en frecuencias podemos decir que para el ultrasonido, entre 2300 y 3100 m/s se encuentran el 88 % de los valores y únicamente un 3,5 % están por debajo de 2100 m/s. Esto indicaría un relativamente buen estado de conservación de la piedra en estos pilares del claustro, en la mayoría de los casos analizados.
- En el caso del esclerómetro, el resultado del golpeo más frecuente se sitúa en valores comprendidos entre 26 y 42, ya que el 89,6 % de los datos se encontrarían dentro de estos valores, y solo el 1,5 % por debajo de 26. En este caso también podemos decir que estos valores indican un relativo buen estado de conservación de la piedra.

ANÁLISIS BOX AND WHISKER

En este breve análisis estadístico se ha querido recoger también el análisis “Box & Whisker”, para los resultados obtenidos con ambas técnicas, por la información complementaria que ofrecen. Este análisis aparece recogido en la Figuras 5 (a) y (b).



Figuras 5: Diagramas “Box a Wisker” para datos de ultrasonido y esclerómetro

Con el estudio de ambas gráficas podemos obtener de forma resumida las siguientes conclusiones:

- Los diagramas “Box and Whisker” para ambas variables, nos señalan las diferencias existentes en las medidas para cada uno de los pilares del claustro (identificados como “columnas” en los diagramas).
- En ambos diagramas podemos apreciar claras similitudes, con tendencias similares para cada pilar, entre los valores encontrados con técnicas ultrasónicas y con el esclerómetro.
- En particular, en ambos casos el valor de la mediana más elevado (línea horizontal dentro de cada caja) corresponde al pilar B, en tanto que el más bajo es para el G, lo que nos da una idea del diferente estado de conservación de ambos.

Estos análisis junto con un estudio mas de detalle de los datos colectados nos ha permitido verificar que:

- La mayoría de los sillares graníticos se encuentran en un estado de conservación aceptable.

- Los valores más altos obtenidos con las diferentes técnicas de estudio, suelen corresponder con zonas en las que se encuentran los sillares más protegidos de la intemperie.
- Por lo general, se puede recalcar que los pilares que se encuentran más protegidos (con algo de techumbre) poseen unos valores promedios más altos que las demás.
- La orientación norte, presenta unos valores ligeramente menores, en gran parte por un ligero mayor deterioro de la sillería y una mayor irregularidad de ésta, así como también por un mayor grado de filtración de humedad en la piedra, debido a su orientación, que favorece la aparición de ciertas patologías relacionadas con el agua.
- Los menores valores en los ensayos vienen ligados por tanto, a un mayor deterioro del material pétreo, manifestado en ocasiones por la presencia de grietas, deplacaciones, filtraciones, fisuraciones, etc.
- Las zonas más afectadas de los pilares suelen ser los sillares de las zonas inferiores de las columnas, relacionadas con procesos asociados al agua: ascensos capilares, acción de sales, etc., como se puede apreciar en algunas fotografías.

CONCLUSIONES:

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo, son las siguientes:

- Durante la ejecución del proyecto ha quedado de manifiesto, que este tipo de trabajos requiere de un grupo multidisciplinar perfectamente coordinado, capaz de aportar cada uno su experiencia.
- Los estudios previos o iniciales detallados de cualquier monumento o bien cultural, se convierten en una herramienta útil y necesaria antes de la planificación o ejecución de cualquier tipo de intervención.
- Las técnicas no destructivas o no invasivas, se convierten en una herramienta indispensable en el estudio de cualquier bien cultural, por la cantidad de información que son capaz de ofrecer y el mínimo o nulo impacto que ocasionan sobre el elemento de estudio.
- En particular, las técnicas esclerométricas y los ultrasonidos se han confirmado como unas técnicas de gran interés y utilidad, para el estudio del Patrimonio.
- Durante el desarrollo de este proyecto se ha podido comprobar la buena correlación existente entre los datos esclerométricos y los ultrasonidos, para el estudio de elementos pétreos procedentes de nuestro patrimonio, lo que permite identificar y señalar zonas de mayor afección o daño ante una posible intervención posterior.
- La utilización conjunta de estas dos técnicas, el análisis estadísticos de los resultados obtenidos con ellas, junto con la combinación de otras determinaciones complementarias y la elaboración de mapas alterológicos han demostrado ser durante el desarrollo de este trabajo una herramienta de ayuda inestimables a la hora de conocer el estado general de conservación de un monumento, permitiendo a su vez delimitar zonas de mayor afección o que se encuentran en peor estado.

AGRADECIMIENTOS:

Este documento forma parte del proyecto de Investigación financiado por la Consejería de Economía, Comercio e Innovación de la Junta de Extremadura: "Elaboración de un protocolo para el diagnóstico del estado de conservación de monumentos de interés cultural", expediente PRI07B115.

REFERENCIAS

- [1] F.Antonelli, G.Gentili, A. Renzulli, M.L.Amadori(Journal of Cultural Heritage, (2003)). Provenance of the ornamental stones used in the baroque church of S.Pietro en Valle (Fano, Central Italy) and commentary on their state of conservation.
- [2] F.López, L.M.Del Río, B.Calleja(Innovación a las Tecnologías de la Información aplicadas a la consecución al Patrimonio, Cáceres, 5 diciembre de 2008) . Estudio de la muralla almohade de Cáceres mediante ultrasonidos.
- [3] M^a.del C.Diez González. Arquitectura de los conventos franciscanos observantes en la provincia de Cáceres. COADE,UNEX. Caja Extremadura, Obispo de Coria-Cáceres, Cáceres ,2003.
- [4] Ultrasonics 44 (2006) e1057–e1061. L.M. del Río, F. López,F.J. Esteban, J.J. Tejado, M. Mota, I. González, J.L. San Emeterio. A. RamosUltrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain).
- [5] L. M. del Ríoa, F. Lópezb, F. J. Estebana, J. J. Tejadoc, M^a. I. Motac, I. Gonzálezc, A. Ramosd, J. L. San Emeteriod. Ultrasonic Study of Alteration Processes in Granites Caused by Freezing and Thawing
- [6] L.M.Del Río et al.(AR&PA Valladolid, 12-14 de noviembre de 2004). Aplicación de Ensayos no Destructivos (EnD) para la Conservación del Patrimonio Histórico de Mérida: Arco de Trajano y Templo de Diana.
- [7] IV Congreso Iberoamericano de Acústica 2004, Guimarães-Portugal. Paper ID:090/p.1. J.Dela Puente Crespo, Fco.Rodríguez Rodríguez. Análisis Experimental Mediante Ultrasonidos para la Determinación de la Resistencia de la Piedra.