

Metodologías de identificación de materiales para la intervención en el patrimonio arquitectónico

Material identification methodologies for intervention in architectural heritage



Esther Moreno-Fernández, Francisco González-Yunta, Javier Pinilla-Melo, Cristina Mayo-Corrochano

Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8200>

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios y análisis de materiales son necesarios para la comprensión del bien a restaurar. En muchas ocasiones, suplen las carencias documentales, ayudan a identificar cronológicamente los materiales o sistemas, alteraciones antrópicas, origen de las lesiones, etc. y completan los conocimientos en el campo de la Historia de La Construcción.

En el campo de la Restauración y Conservación del Patrimonio construido, el conocimiento de las diferentes técnicas de estudio de materiales permite aplicarlas y combinarlas adecuadamente para obtener información relevante en la toma de decisiones sobre la intervención a realizar. Es necesario abordar su enfoque con un equipo multidisciplinar que combine los conocimientos científicos con el oficio de la restauración asegura la eficiencia en el proceso y su traslado al proceso de obra (Fig. 1).

En ocasiones, las técnicas de caracterización empleadas de forma habitual, no tienen el alcance necesario para proporcionar una información exhaustiva que determine la composición y el origen de los productos de alteración formados en la superficie de los elementos constructivos. Además, algunas técnicas son destructivas y, por lo tanto no aplicables en edificios de valor singular. Debido a la complejidad del proceso de restauración, el objetivo de este estudio es proporcionar alternativas adicionales mediante metodologías sencillas de aplicar.

Se presentan dos metodologías no habituales en el análisis de materiales pertenecientes al patrimonio construido. La principal finalidad de este trabajo es des-

acar la relevancia que tiene un estudio riguroso de los materiales en este tipo de intervenciones.

1.1. INTERVENCIÓN EN EL TEMPLETE DEL MUSEO CERRALBO

1.1.1. Elementos de la balaustrada

Se propone una metodología para identificar si el conglomerante de los balaustres es cemento natural, debido a que es difícil distinguirlo del cemento Portland y, en ocasiones, la confusión de estos dos materiales ha conducido a restauraciones erróneas [1].

En 1796 James Parker patentó el cemento natural o cemento romano [2]. Durante el siglo XIX y debido al crecimiento de las grandes ciudades, se extendieron la producción y el empleo de los cementos naturales por Europa, Estados Unidos y Rusia [3-5]. Originalmente, se empleó como mortero de junta y en las cimentaciones de los edificios, pasando posteriormente a usarse en fachadas, tanto en revocos como elementos ornamentales, compatibles con la piedra natural.

Este material ha demostrado a lo largo del tiempo gran durabilidad y resistencia a la intemperie. Las decoraciones de cemento natural presentes en las fachadas se encuentran en buenas condiciones de conservación, a pesar del prolongado tiempo de exposición. Por otra parte, muchos elementos constructivos de monumentos en los que originalmente se empleó cemento natural, se encuentran en mal estado debido a reparaciones inadecuadas llevadas a cabo con materiales incompatibles como el cemento Portland, que provoca daños en los elementos originales. Esto se debe, en muchos casos, al desconocimiento de la presencia de este material o a una incorrecta caracterización de los morteros históricos, ya que es difícil distinguir un cemento natural de un cemento Portland histórico [6-7].

El alto coeficiente de absorción del cemento natural favorece el ingreso de sales disueltas procedentes de cementos Portland empleados en la reparación. Los compuestos salinos cristalizan en el interior provocando desprendimientos del material original. Así mismo, la elevada rigidez del cemento Portland provoca tensiones que fisuran el cemento natural del soporte cuya rigidez es menor.

Por las razones anteriormente expuestas, es necesario caracterizar inequívocamente este material y así, emplear los materiales correctos en la rehabilitación del

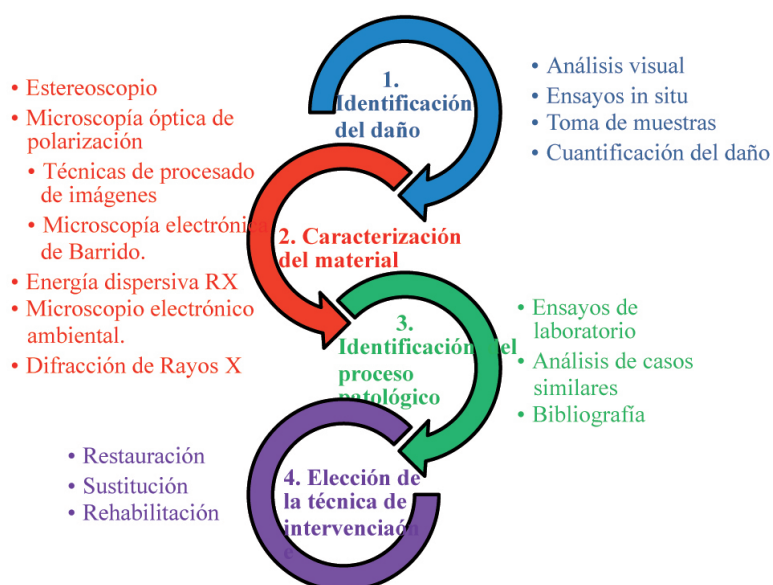


Fig.1: Proceso general de análisis en la intervención en patrimonio

elemento dañado. Por otro lado, la balastrada que corona el templete es distinta a la de la planta inferior que, a su vez, es igual a las existentes en el edificio principal. Se sospecha que fue reconstruida, pero no hay documentos que lo acrediten. Uno de los objetos de esta investigación es el análisis de la balastrada inferior para realizar una datación aproximada e indicar si se trata de un elemento original y tomar decisiones acerca de la reparación o restitución de los balaustres superiores, dado que presentan graves lesiones derivadas de las deformaciones estructurales del templete y las ocasionadas por el proceso patológico de la corrosión de las armaduras de acero.

1.1.2. Bustos escultóricos

La segunda metodología desarrollada en esta comunicación son las Técnicas de Proceso y Análisis Digital de Imágenes, centradas, en este caso, a la determinación petrográfica y los daños que presentan los bustos emplazados en el templete. En la documentación del museo, se refleja que son de mármol de "Carrara", si bien se desconoce el origen y la autoría de los mismos.

El aspecto inicial de los bustos revelaba alteración superficial, habiéndose perdido parte de su relieve debido a décadas de exposición de las inclemencias meteorológicas [8-9]. Una vez conocida su naturaleza petrográfica, es posible establecer una relación causal entre los factores ambientales y los daños o alteraciones producidas, pudiendo escogerse el tipo de tratamiento a prescribir más adecuado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para caracterizar los materiales, definir sus patologías y su estado de conservación se realizó un estudio exhaustivo sobre los mismos.

2.1. TÉCNICAS Y EQUIPOS EMPLEADOS

Difracción de Rayos X (cuadro de texto). El equipo usado es un difracto-

metro de polvo Bruker D8 Advance dotado de una fuente rayos X, ánodo de cobre, y un detector SOL-X.

Microscopía estereoscópica. El microscopio estereoscópico, cubre un rango de zoom de 0.75x a 11.25x.

Microscopía óptica de polarización (cuadro de texto).

Se ha empleado un microscopio Kyowa, mod. BIO-POL y una cámara Moticom modelo 2300 5Mpixel.

Microscopía electrónica de barrido con microanálisis (cuadro de texto).

Para el estudio del conglomerante se ha empleado el microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 250 FEG de la Universidad de Artes Aplicadas en Viena. El estudio de las esculturas se ha realizado en el CAI de Ciencias Geológicas de la UCM, con un microscopio Jeol JSM-820.

2.2. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DEL CONGLOMERANTE

Durante la calcinación (800-1200°C) de calizas arcillosas o margas, se forman los siguientes compuestos:

- CaO que forma Ca(OH)_2 : Hidróxido de calcio, (CH) cal apagada.
- Ca_2SiO_4 : Silicato bicálcico o belita (C2S).
- $\text{Ca(AlO}_2)_2$: Aluminato monocálcico (AC).

En la fabricación de cemento Portland, la temperatura de calcinación de la materia prima ha de sobrepasar los 1.200°C para conseguir la sinterización del clínker. Se obtiene, además de Silicato bicálcico y Aluminatos, Silicato tricálcico Ca_3SiO_5 o alita (C3S). Por lo tanto, la presencia de Alita denotaría que el conglomerante es cemento Portland [10].

Se prepararon láminas delgadas a partir de las muestras tomadas de la balastrada para poder establecer patrones identificativos de los cementos naturales. Se aplica un método simplificado del desarrollado por el proyecto ROCARE [11-12] de identificación del cemento natural que aplica técnicas convencionales de microscopía óptica de polarización y microscopía electrónica de

barrido para identificar la Belita en las fases no hidratadas del mortero.

2.3. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Las técnicas de Procesado Digital de Imágenes facilitan la detección de daños en monumentos, de una manera no destructiva. Se fundamentan en la discretización de la imagen extrayendo sus parámetros espaciales, tal como la distribución de fases y su morfología. Así, se pueden detectar porosidades, tamaños de grano, fases, áreas de alteración, humedades, pátinas, ensuciamientos, diferencias en fachadas, etc [13-16].

Se basa en la descomposición de la imagen en una matriz de puntos o datos (discretización) que tiene, información espacial. Metodológicamente se establecen tres niveles de operación: **captura** de imagen (en la que se incluye el proceso de calibración y escalado); **mejora** digital de la imagen y su **segmentación** que conforma el proceso a partir del cual se derivan los parámetros de medida y relación entre fases [17].

El programa utilizado para la obtención de estas imágenes y los datos asociados es Image-Pro Plus (de Optimas, Image Processin Image) versión 6.0 para Windows, con licencia de Media Cybernautics, Inc. (Georgia USA), si bien todas las imágenes pueden ser replicadas con el Image.J de libre distribución y disponible en la red [18].

3. RESULTADOS

3.1. IDENTIFICACIÓN DEL CONGLOMERANTE

La metodología propuesta parte de la preparación de las muestras en láminas delgadas pulidas y teñidas para poder distinguir con facilidad los poros e identificar sus componentes. La secuencia de análisis consiste en:

1. **Análisis visual.** Se observa el color de la muestra a con el microscopio estereoscópico. La muestra es de color marrón claro típico de los morteros de cemento natural en contraposición al color gris del cemento Portland.
2. **Observación** de las láminas delgadas con microscopio petrográfico a baja resolución. La estructura característica de los cementos naturales consta de margas infracalcinadas o sobrecalcinadas debido a que el proceso de calcinación de estos cementos era artesanal y no

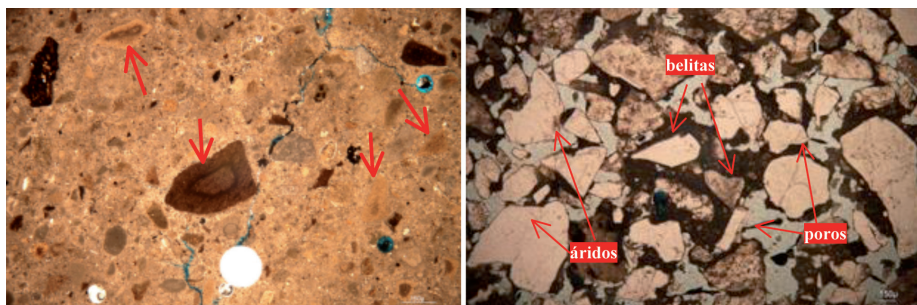


Fig. 2: Detalle de los fragmentos de margas calcinadas (izda). Lámina pulida de la muestra (dcha)

todas las margas estaban correctamente calcinadas. Como el proceso de molienda no era tan fino, quedaban fragmentos de margas calcinadas que se pueden identificar. La figura 2 (izda) muestra la imagen de una muestra de pasta de Cementos Naturales.

Aunque a simple vista el mortero parecía muy compacto (Fig. 2 dcha), al observar la lámina delgada se evidencia una gran porosidad con agregados muy angulosos. En el microscopio petrográfico observamos cristales de belita no hidratados en la matriz del aglomerante, pero no observamos los típicos fragmentos de margas calcinadas de los cementos naturales. Tampoco se encontraron cristales de alita.

3. Microscopio petrográfico a mayor resolución. Identificación de alita (silicato tricálcico) y belita (silicato bicálcico). En el caso del cemento natural, no aparecen cristales de alita. Para confirmar la ausencia de alita, se puede utilizar un reactivo de ataque, Nital (1 ml de ácido nítrico y alcohol propílico) y los cristales de alita adquieren tonalidad azul mientras que la belita permanece marrón (Fig. 3 izquierda).

4. Por microscopía electrónica de barrido se confirma la presencia de los cristales de belita y se realizan mediciones químicas semicuantitativas de determinadas zonas. La estructura es altamente porosa, combinando cristales fibrosos y laminares propia de los cementos naturales, pero la ausencia de fragmentos de margas hace concluir que no se trata de este material (Fig. 3, dcha).

5. Mediante microscopía electrónica de barrido ambiental con muestras en fractura fresca se observa una estructura fibrosa y laminar no tan compacta como tendría un cemento Portland.

Aunque se han identificado granos de cemento no hidratado correspondiente a belita, la ausencia de las características margas (infracalcinadas, sobreclacinadas y calcinadas a la temperatura adecuada),

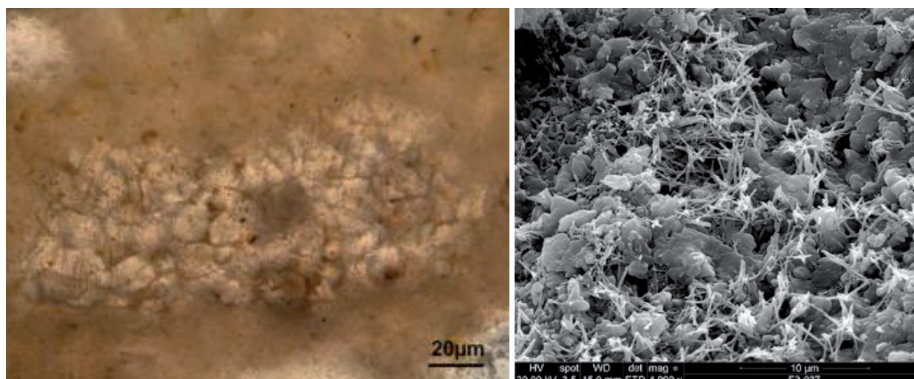


Fig. 3: Cristales de Belita luz transmitida (izda). Estructura del mortero (dcha)

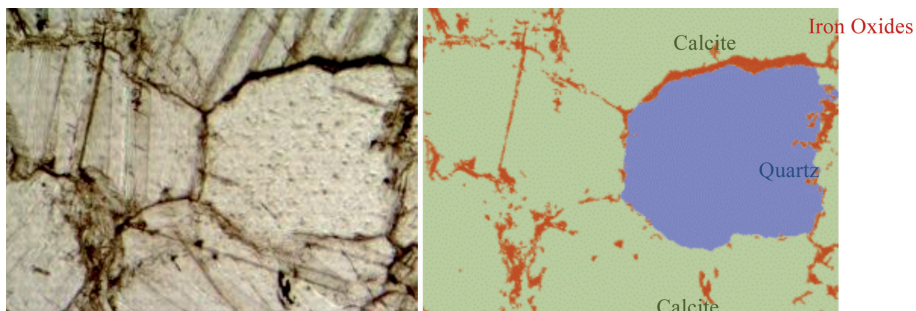


Fig. 4: Mejora de la imagen y segmentación de cada fase. En rojo se representan los óxidos de hierro y fases alteradas

indican que no se trata de un cemento natural. El conglomerante (a pesar de no haber encontrado nódulos de cal libre) se podría asemejar a una cal hidráulica pero con un mayor contenido de belita debido al mayor porcentaje de Silicio en la materia prima. Este material, denominado por algunos autores como "**cemento belítico artificial**", se obtenía por calcinación a baja temperatura.

3.2. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL CONSTITUYENTE DE BUSTOS ESCULTÓRICOS

Mediante DRX y microscopía se han detectado, principalmente calcita y cuarzo. También Óxidos de hierro.

3.2.1. Procesado digital de imágenes.

Las microfotografías petrográficas se derivaron al procesador digital de imágenes. Las calcitas desarrollan su característico maclado polisintético cuya birrefringencia e índice de refracción es alto (color blanquecino en luz natural). El cuarzo, bajo el

mismo tipo de luz, tiene una birrefringencia alta, aunque su textura es "granular". No desarrolla planos de maclas y de tipo distribución polisintética (Fig. 4). Los óxidos e hidróxidos aparecen asociados a bordes de grano o zonas de fisuración, de tipo hidrotermal y lógicamente relacionados con la dinámica de los fluidos. Dan colores de interferencia y refracción más bajos (pardos).

La aplicación de filtros de tipo matricial a la imagen, como los reforzadores de bordes, facilita una clasificación mejor y delimitación de cada fase cristalina (grano). Este algoritmo busca las secuencias de refracción óptica asociadas a cada especie mineralógica (color, textura, morfología) con un nivel de gris o color específico.

El resultado (Fig. 4 dcha) es una imagen clasificada en la que la extracción de áreas de ocupación relativa (porcentajes) y su distribución espacial, es inmediata (estableciéndose el tipo de contacto entre fases, la densidad de la red de fisuración etc.).

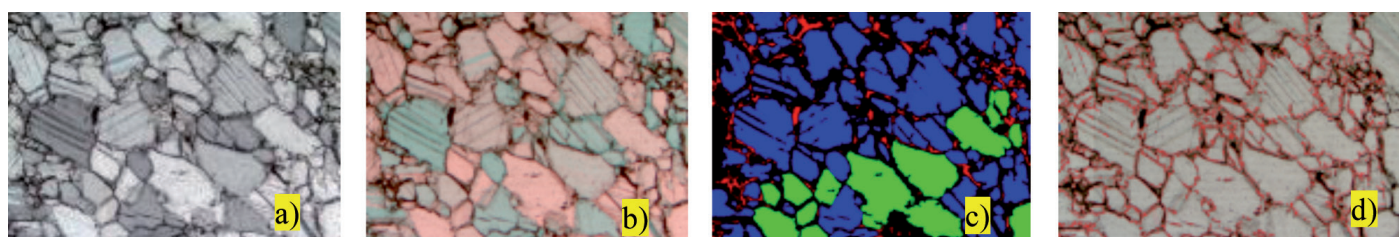


Fig. 5: a) micrografía luz polarizada. b) aplicación de algoritmos de filtrados. Azul, la calcita, rosa, el cuarzo, en siena las calcitas con orientaciones diferenciales c) combinación de bandas para identificar fases. d) extracción para el cálculo de bordes de grano

De esta imagen se extraen todos los parámetros de caracterización. La calibración (escala) se ha definido por la relación entre el número de píxeles que se corresponden al tramo o segmento marcado de 100 μm -176 píxeles. El factor de escala es 1760 para esta secuencia de imágenes.

La Figura 5 resume el proceso. Partiendo de imágenes registradas con luz natural (a) y polarizada (b) del mismo campo y ejecutando diferentes tipos de filtrados, se aísla cada componente (c) y (d) etiquetándose todas las fases existentes (calcitas, cuarzo y óxidos) y extrayendo sus parámetros espaciales y de distribución, porcentajes, tamaños de grano, elongación, y distancias (puntos en el plano o lámina delgada).

La imagen derecha (d) que muestra el proceso de cálculo de los bordes de grano debe corregirse. El campo resultante que quedaría, después de discriminar los granos incompletos, se corresponde con líneas de contacto. Se miden, en esta imagen, los siguientes parámetros: área, diámetro mayor, diámetro medio, perímetro y redondez.

La imagen clasificada (c) se etiqueta en colores, o códigos alfanuméricos de referencia. En azul, la calcita (CaCO_3); en verde, la fase Cuarzo (SiO_2) y Feldespatos (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) en sus múltiples variedades o series de desmezcla. Las Lutitas (filosilicatos) y Óxidos, se representan en color rojizo.

Este análisis se repite para el resto de las imágenes (campos de registro) a lo largo de toda la lámina delgada. Los resultados granulométricos (cuantitativos) obtenidos de la muestra confirman que el

patrón textural y composicional se repite, predominando las fases calcáreas, con distinta orientación de su eje de maclado, sobre los cuarzos y feldespatos. Algunas calcitas tienen un alto grado de fracturación.

El resultado se refleja en el diámetro medio D_0 de los granos de calcita, obteniendo un histograma (Fig. 6) que evidencia una enorme dispersión granulométrica. Esta "firma digital" es característica de una determinada región y cantera (Tabla 1).

- Donde,
- Objetos*: Se refiere a todos los granos considerados.
 - Área*: Superficie de los granos.
 - DiamX*: La mayor distancia posible en el objeto.
 - DiamM*: El principal segmento de cada grano.
 - Perim*: La longitud del borde de cada grano.
 - Redondez*: Es el factor que define la el cociente especial. Por ejemplo, para un mármol de Carrara, este valor es cercano a 0,8 mientras que en este estudio el valor es 0,07926.

3.2.2. Identificación

Petrográficamente, es un mármol con evidentes procesos de dolomitización; es decir, el catión calcio (Ca^{2+}) ha sido sustituido en la red base (o retícula de definición) parcialmente, por el catión magnesio (Mg^{2+}) con el desarrollo de una serie de minerales neoformados (como portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Esta sustitución parcial de ambos cationes produce una deformación reticular y la alteración y desarrollo de

procesos degradativos. Por la forma del histograma (fig. 6) no es un mármol de Carrara ya que aquél tiene una distribución morfológica y pureza monomineral totalmente diferente. Este, más heterogéneo y con mayor porcentaje de impurezas y con una acusada degradación, siendo el tipo de alteración más propia de un mármol Macael.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado dos metodologías de caracterización de materiales que proporcionan información útil la hora de identificar, evaluar y determinar las causas de deterioro de materiales de construcción.

La caracterización precisa del conglomerante (cemento belítico artificial) ha posibilitado tomar la decisión de reproducir la balaustrada con un material similar y con la forma de los elementos originales del Templete. La balaustrada de la planta de cubierta fue analizada con técnicas tradicionales, resultando que el conglomerante utilizado fue cemento Portland. Este resultado, unido a su diferencia morfológica con el resto del edificio, evidenciaba que se trataba de un ornamento añadido en la reconstrucción posterior a la Guerra Civil. La caracterización realizada en la balaustrada de la planta primera y el hallazgo de la utilización del cemento belítico, situaba claramente su origen en la construcción del templete y avalaba la decisión de sustituir el añadido en la planta de la cubierta por otro elemento con la forma original de la planta primera. Además, al no tratarse de cemento natural, se podrían realizar reconstrucciones en caso de ser necesario sin necesidad de utilizar este material.

El uso de técnicas de Análisis y Tratamiento Digital de Imágenes ha posibilitado una mayor precisión en la caracteriza-

Objetos	Area	DiamX	DiamM	Perim	Redondez
124 1040,38277		126,66698	67,96518	632,30009	0,07926

Tabla 1: Resumen de datos (unidad en micras)

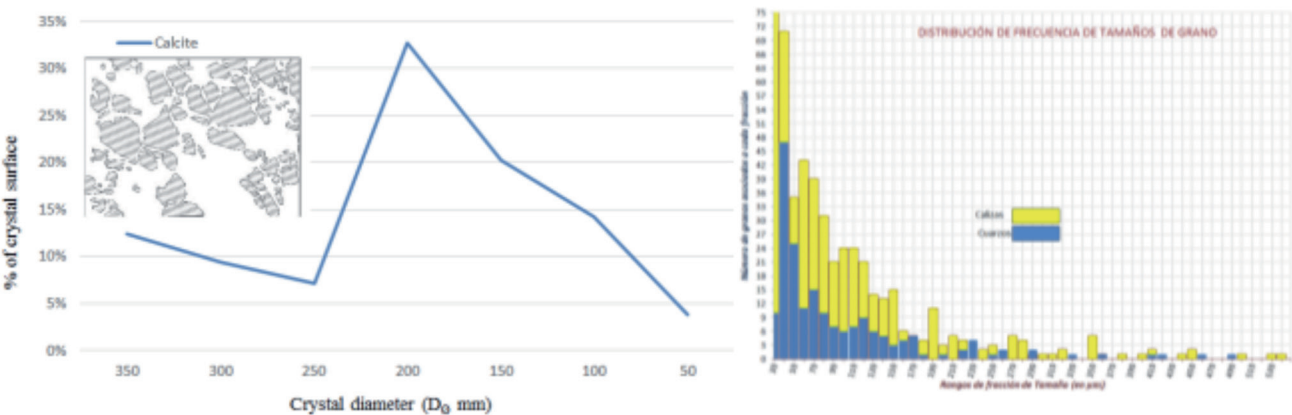


Fig. 6: Morfometría de los cristales de Calcita (izda). Histograma de calcitas y cuarzo (dcha)

ción del material pétreo constituyente de los bustos.

Si no se hubiera empleado esta técnica no hubiera sido posible detectar la presencia de fases asociadas a defectos reticulares que fatigan el material, atribuyendo esta patología, seguramente a procesos de dilatación o concentración térmica y no teniendo en cuenta que la presencia de óxidos en contacto con calcita y dolomita provocan fases (portlandita y grucita) enormemente expansivas que son la verdadera causa de la fragmentación del mármol.

De la observación textural y la morfología de los cristales se concluye que los bustos fueron esculpidos en mármol de Macael. No se encontró ningún que pudiese indicar la aplicación de un tratamiento superficial.

Los productos de alteración, en su mayoría óxidos de hierro, derivan de impurezas del material, que han lixiviado y acumulado en la superficie. Se ha revelado, además, el grado de daños o alteraciones en la superficie de los cristales. Esta información, ha orientado en la elección de productos de protección más eficaces y adecuados a este tipo de material calcáreo en tratamientos de protección de las esculturas.

PARA SABER MÁS

- [1] Varas MJ, Alvarez de Buergo M, Perez-Monserrat E, Fort R. "Decay of the restoration render mortar of the church of san Manuel and San Benito, Madrid, Spain: results from optical and electron microscopy" 59, 2008. 1531-1540. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2007.11.008>
- [2] Parker J. A certain Cement or Terras to be used in Aquatic and other Buildings and Stucco Work. British Patent 2120, 1796.
- [3] Kozłowski R, Hughes D, Weber J. Roman Cements. Key materials of the Built Heritage. of the 19th Century. Materials, technologies and Practice in Historic Heritage Structures 14, pp 259-277. 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2>.
- [4] Gosselin C, Verges-Belmin V, Royer A, Martinet G, "Natural cement and monumental restoration". Materials and Structures, Julio 2009, Issue 42, Issue 6 pp. 749-763 DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9421-7>.
- [5] Weber J, Gadermayr N, Bayer K, Hughes D, Kozłowski R, Stillhammerova M et al "Roman cement mortars in Europe's architectural heritage of the 19th century". J ASTM Int 4(8). 2007 doi:10.1520/JAI100667
- [6] Mayo, C. "El cemento natural en el Madrid de los siglos XIX y XX. Identificación de sus aplicaciones, estado de conservación y compatibilidad con los cementos actuales". Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [7] Middendorf B, Hughes J.J, Callebaut K, Baronio G, Papayianni I. Investigative methods for the characterization of historic mortars- Mineralogical characterization. Chemical characterization. Materials and Structures. Vol 38, 8, 2005.
- [8] Adamski G, Bratasz L, Kozłowski R, Mayr N, Mucha D, Stilhammerova M, Weber J. Roman cement – key historic material to cover the exteriors of buildings. Workshop Repair Mortars for Historic Masonry. Ed. Groot.2009 <http://www.rilem.net>
- [9] Moropoulou A, Bisbikou K, Torfs K, Van Grieken R. Zezza F. Macri, F. Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. Atmos. Environ. 32, 967-982, 1998.
- [10] Ingham J. Geomaterials under the microscope. A colour guide. CRC Press. Londres, 2010.
- [11] Varas MJ., Álvarez de Buergo M, Fort R. "Natural cement as the precursor of portland cement: methodology for its identification" Cement and concrete research. Vol 53 pp. 2055-2065, 2005 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045>
- [12] Weber J. Et ROCARE Consortium Team, 2011. EU project ID: 226898: 19th century Roman cements – historic binders with properties of interest for purposes of restoration and healthy construction. www.rocara.eu.
- [13] Weber J, Bayer K, Pintér F. "Nineteenth Century "Novel" Building Materials: Examples of Various Historic Mortars Under the Microscope. DOI <http://dx.doi.org/101007/978-94-007-4635-0-7>, 2012.
- [14] Vazquez MA, Galán E, Guerrero MA, Ortiz P. "Digital image processing of weathered stone caused by efflorescences: A tool for mapping and evaluation of stone decay" Construction and Building Materials, Vol. 25, 4, Abril 2011, pp. 1603-1611 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.003>
- [15] Brunetaud X, De Luca L, Janvier-Bados S, Beck K, AlMukhtar M. "Application of digital techniques in monument preservation" European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol 16, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2012.676365>
- [16] Cossu R, Chiappini L. "A color image segmentation method as used in the study of ancient monument decay" Journal of Cultural Heritage Vol 5, 4. 2004, pp 385-391 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2004.03.005>.
- [17] M.C. Angel, B. Martínez, F. Rodríguez, N. Prendes. "Monuments Deterioration Evaluation Using Digitized Images". Materiales de Construcción, nº 240, 47-57,1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.1995.v45.i240.545>
- [18] ImageJ. Open and public software. Available at <https://imagej.nih.gov/ij/>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Proiescon S.L la financiación parcial de este estudio, al Doctor Nicanor Prendes (Ministerio de Obras Públicas) por el análisis digital de imágenes y al Doctor Johannes Weber del IATCS (Institute of Arts and Technology/conservation Sciences, Viena) por la identificación de los cementos naturales.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8200-1_spanish.pdf

