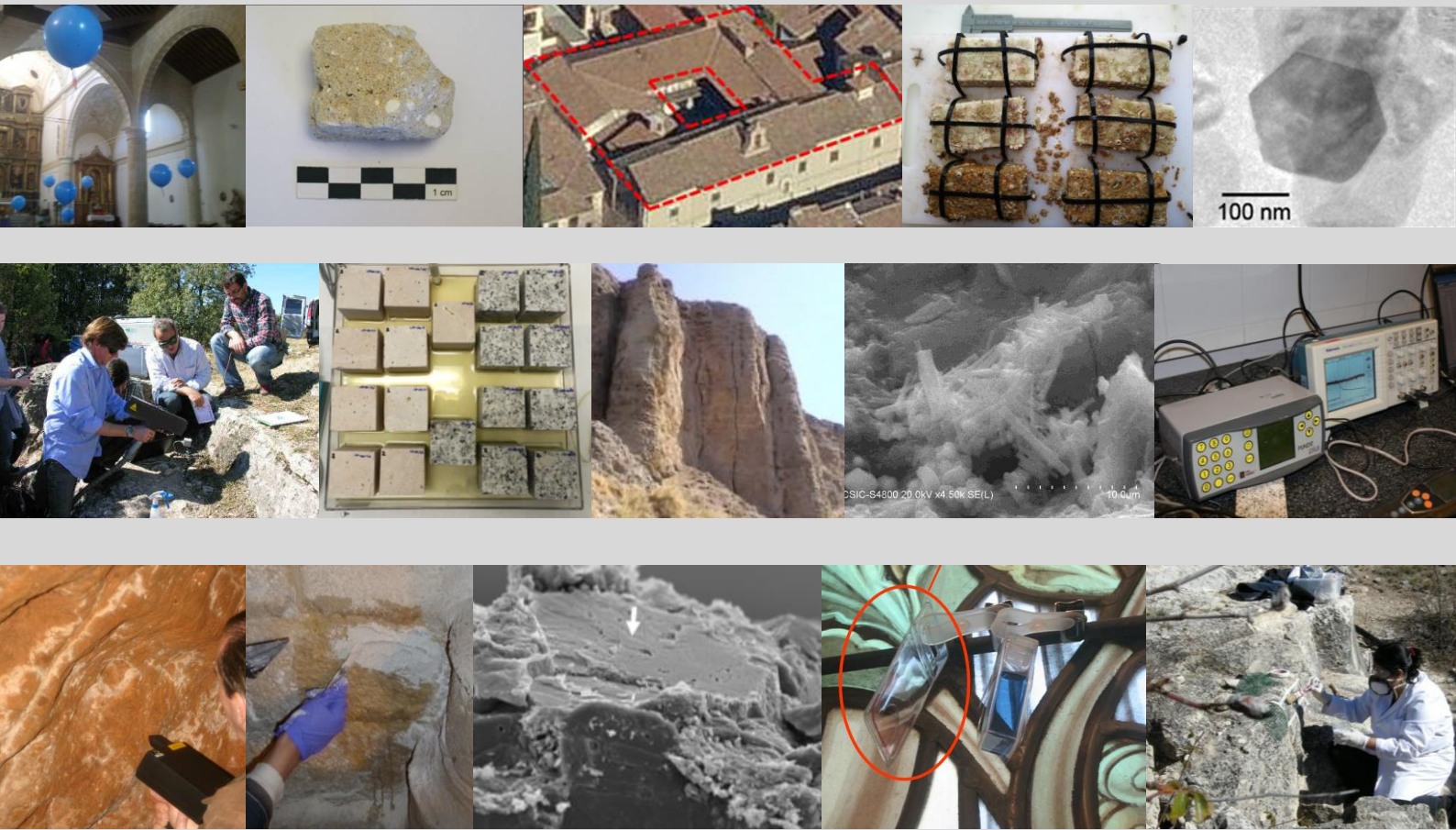


# REUNIÓN CIENTÍFICA DEL PROGRAMA GEOMATERIALES

## Durabilidad y conservación de geomateriales del patrimonio construido

9 de octubre de 2013



Imágenes de portada (de izda. a dcha.)

Monitorización en altura de las condiciones de humedad y temperatura en la iglesia de Algete (Madrid)  
Mortero de fábrica del patio del Colegio de San Ildefonso, Alcalá de Henares (Madrid)  
Vista aérea del Hospital de Antezana, Alcalá de Henares (Madrid)  
Probetas de mármol de Macael, de Carrara y de piedra ostionera tras un período de inmersión en medio marino en la bahía de Cádiz  
Nanopartículas de hidróxido magnésico observadas con Microscopía Electrónica de Transmisión

Eliminación de biofilm sobre dolomías mediante láser en las canteras históricas de Redueña (Madrid)  
Ciclos de inmersión capilar de granito (piedra berroqueña) y caliza (piedra de Colmenar) en bioproducto  
Desprendimiento en el Risco de las Cuevas por volteo parcial de bloques, Perales de Tajuña (Madrid)  
Mortero con un 15% de barita sumergido durante 5 meses en sulfato sódico observado mediante SEM-SE  
Monitorización con ultrasonidos de materiales conglomerados durante el proceso de fraguado mediante ondas longitudinales y de corte

Análisis de pinturas rupestres en Las Cuevas de Maltravieso en (Cáceres) mediante el equipo Raman portátil  
Aplicación *in situ* de morteros de sacrificio para la desalación de muros en la iglesia de Talamanca de Jarama (Madrid)  
Dolomía de Redueña irradiada con láser observada al microscopio electrónico de barrido para evaluar los efectos sobre el material  
Sensores ambientales instalados en una vidriera del taller Mauméjean hermanos en la Sede Central del CSIC  
Aplicación de biocida en frente de cantera de dolomía de Redueña para su evaluación

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en materia alguna por ningún medio sin permiso por escrito del Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) y/o de la Comunidad de Madrid.

Publicación de los resúmenes de las contribuciones presentadas en la Reunión Científica del Programa Geomateriales  
© DE LOS AUTORES  
© PROGRAMA GEOMATERIALES (S2009/M-1629)  
Coord. Edición: Rafael Fort González y Elena M. Pérez-Monserrat  
Edita: PROGRAMA GEOMATERIALES, S2009/MAT\_1629 (Comunidad de Madrid y Fondo Social Europeo)  
I.S.B.N: 978-84-615-7005-8

# Reunión Científica del Programa Geomateriales

Madrid, 9 de octubre de 2013

## Coordinadores

Rafael Fort González y Elena M. Pérez-Monserrat

## ORGANIZA

Programa Geomateriales

[www.geomateriales.es](http://www.geomateriales.es)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM)

[www.igeo.ucm-csic.es](http://www.igeo.ucm-csic.es)

## EDITA

Programa Geomateriales

[www.geomateriales.es](http://www.geomateriales.es)



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE  
MADRID



**CSIC**

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Universidad  
de Alcalá

campus



MONCLOA



Madrid, marzo 2014

## INDICE

El Programa Geomateriales: objetivos y logros	1
Vidrios, materiales cerámicos, metales y sensores ambientales en el Patrimonio cultural	2
Diseño de nuevos morteros para aplicación en patrimonio	3
Técnicas láser para análisis y conservación del patrimonio construido	4
Estudio de materiales y técnicas constructivas en edificios históricos de Alcalá de Henares: Colegio de San Ildefonso y Hospital de Antezana	5
Mecanismos de deterioro de materiales pétreos y cerámicos sumergidos en agua marina y optimización de métodos de desalación	6
Evaluación integral del deterioro en cuevas: el Risco de Perales de Tajuña	7
Monitorización para la conservación preventiva del patrimonio construido	8
Validación y mejora de técnicas no destructivas: Raman portátil	9
Validación y mejora de técnicas no destructivas: FTIR/TG/EGA	10
Pastas y hormigones autocompactantes con componentes micro y nanométrico para reparación y rehabilitación del patrimonio	11
Diseño y caracterización de morteros para rehabilitación con características mejoradas	12
Nuevos nanomateriales para la consolidación y protección del material pétreo	13
Desarrollo de nuevos cementos sulforresistentes con aplicación en patrimonio	14
Modificaciones nanoestructurales en pastas hidráulicas curadas hidrotermalmente con adición de nanosílice	15
Eficacia del laser para la eliminación de microorganismos y líquenes sobre materiales pétreos	16
Bioreceptividad y tratamientos para el control del biodeterioro	17
Efecto de la orina en materiales del patrimonio construido	18

## **PRESENTACIÓN**

El Programa Geomateriales *Durabilidad y conservación del geomateriales del patrimonio construido*, enmarcado en el IV Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica (IV PRICIT), fue concedido a través de su Convocatoria de Programas de I+D en Tecnologías 2009 (orden 679/2009). Iniciado el 1 de enero de 2010 y finalizado el 31 de mayo de 2014, el programa de investigación se plantea con una clara concepción experimental, pretendiendo dar solución y optimizando las actuaciones aplicadas para mejorar la durabilidad y conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio construido. El consorcio que integra el programa está constituido por grupos de investigación que desarrollan su labor en la Comunidad de Madrid, pertenecientes a la Agencia Estatal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y a la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), otros grupos, laboratorios y/o centros tecnológicos ubicados en otras provincias españolas y en países europeos así como empresas privadas y otros organismos de colaboración. El programa ha conseguido alcanzar los objetivos científico-tecnológicos planteados, en gran parte mediante la colaboración de los diferentes grupos integrantes, jugando un papel esencial la participación también en el programa del Laboratorio de Petrofísica (RedLab 217).

El presente volumen recoge las ponencias presentadas en la Reunión Científica del Programa Geomateriales, celebrada el 9 de octubre de 2013. Estas ponencias se organizaron fundamentalmente en base a los objetivos científicos del programa, incidiendo en las principales actividades realizadas y resultados obtenidos, y apostando por los jóvenes investigadores incorporados. En los resúmenes incluidos se pretende resaltar, por un lado, los resultados científicos de mayor relevancia, las investigaciones que han generado el desarrollo de patentes, las colaboraciones establecidas entre los diferentes grupos y/o empresas y las previsiones futuras. Por otro, aspectos relacionados con los objetivos de formación, como la realización de tesis doctorales y movilidad de investigadores, así como la participación conjunta en los objetivos de difusión y en actividades de gestión de los diferentes miembros del programa.

El Programa Geomateriales ha supuesto un importante avance del conocimiento, permitiendo los logros científicos obtenidos posicionar al consorcio en unas condiciones muy favorables respecto a las diversas temáticas implicadas en la conservación del patrimonio. Este aspecto hace del consorcio el único a nivel nacional que aborda su estudio de forma integral y confirma, una vez más, la necesidad y conveniencia de crear equipos de trabajo que apuesten por la colaboración y conjunción de esfuerzos para alcanzar mayores y mejores logros.

Rafael Fort  
Coordinador del Programa Geomateriales

## El Programa Geomateriales: objetivos y logros

R. Fort

Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040  
[\\*rafael.fort@csic.es](mailto:*rafael.fort@csic.es), [rafort@geo.ucm.es](mailto:rafort@geo.ucm.es)

El objetivo del Programa Geomateriales ([www.geomateriales.es](http://www.geomateriales.es)) ha sido avanzar en el conocimiento de los procesos y mecanismos de alteración de los geomateriales, además de desarrollar estrategias para su protección y conservación que aumenten su resistencia a los procesos de deterioro y, con ello, su durabilidad. El consorcio multidisciplinar formado ha alcanzado los objetivos perseguidos, consolidando sus capacidades con un programa puntero que ha abordado temas referentes al diseño de nuevos materiales, validación de técnicas no destructivas o mínimamente invasivas, desarrollo de redes de monitorización o la valoración de los efectos de deterioro ante diferentes ambientes agresivos, naturales y/o antrópicos, buscando alternativas para su conservación. El avance sobre nuevos materiales en el campo de la restauración y conservación del patrimonio, como la investigación de consolidantes a base de nanopartículas o el diseño de morteros con prestaciones específicas, han otorgado un alto valor al programa. El programa ha incrementado la visibilidad de los diferentes grupos que integran el consorcio, mejorando sus capacidades y habilidades de manera que se encuentra capacitado para abordar de forma multidisciplinar nuevos retos en la conservación del patrimonio.

La producción científica ha quedado recogida en 340 publicaciones y 230 comunicaciones presentadas en congresos y conferencias. Casi la mitad de la actividad científica financiada por el programa se ha publicado en "open access", aspecto de vital importancia pues incrementa la visibilidad de la investigación generada, estando al alcance de un mayor conjunto de investigadores y de la sociedad. La transferencia tecnológica ha quedado materializada en la obtención hasta la fecha de 2 patentes, estando en vías de tramitación otras 2, habiéndose realizado muchas de las investigaciones en colaboración con algunas de las empresas asociadas del programa.

La captación de fondos para la mejora de la infraestructura ha permitido la adquisición de equipamiento de relevancia, destacando los equipos de fluorescencia de rayos X portátil y de prospección geoelectrica, redes inalámbricas de monitorización, cámara de termografía de infrarrojos, cámara Kesternich, un espectrofotómetro o una interfase ATD/FTIR. Otro logro muy significativo ha sido la incorporación de 33 jóvenes investigadores (12 doctores y 21 licenciados) y 3 técnicos de formación profesional.

El programa ha destacado igualmente por la importante actividad desarrollada en cuanto a los objetivos de difusión y formación se refiere, resaltando los cursos de postgrado y los eventos de divulgación científica. Este aspecto que refleja el compromiso adquirido, por los miembros en particular y por el programa en general, para la transferencia de conocimiento y la puesta en valor de los logros alcanzados.

## **Vidrios, materiales cerámicos, metales y sensores ambientales en el Patrimonio Cultural**

M.A. Villegas Broncano\*, M. García Heras, F. Agua Martínez,  
J.F. Conde Moreno & J. Peña Poza

Grupo *Arqueometría y Conservación de Vidrios y Materiales Cerámicos* (CERVITRUM-CCHS)  
Instituto de Historia IH, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS-CSIC), c/Albasanz 26-28,  
Madrid 28037 \*[mariangeles.villegas@cchs.csic.es](mailto:mariangeles.villegas@cchs.csic.es)

Las aportaciones del grupo CERVITRUM-CCHS al objetivo 2 "Deterioro y conservación de materiales expuestos a diferentes condiciones ambientales" del Programa Geomateriales han consistido, por una parte, en la caracterización de materiales históricos originales constituyentes de vidrieras de distintas cronologías, vidrios arqueológicos procedentes de enterramientos y medios submarinos, mosaicos antiguos, materiales cerámicos y diversos metales y aleaciones. Por otro lado, en el estudio de vidrios modelo sometidos a ensayos acelerados de simulación de los procesos de degradación naturales en aire con y sin contaminación, suelos neutro, ácido y básico, y aguas sintéticas de río y de mar. Entre otros, se han caracterizado materiales procedentes de vidrieras de la Catedral de León, de la Catedral de Girona y de la iglesia del Espíritu Santo (Madrid); vidrios arqueológicos de Augusta Emerita y de pecios submarinos como el Pecio de Navidad (Cartagena); materiales cerámicos procedentes del Colegio de San Ildefonso y del Hospital de Antezana, ambos de Alcalá de Henares (Madrid); así como metales procedentes de las estaciones ferroviarias de Aranjuez y de Atocha (Madrid). En cuanto a los objetivos 3 y 4 del programa, "Condiciones medioambientales en el interior de los edificios y su relación con el deterioro de los materiales" y "Validación y mejora de técnicas no destructivas portátiles" respectivamente, se han diseñado, sintetizado, calibrado y validado *in situ* sensores químicos ambientales de la acidez/basicidad, así como unidades portátiles de medida capaces de transformar la señal óptica de los sensores en otra eléctrica, compatible con un software diseñado específicamente para la gestión de ambos y utilizable en evaluaciones ambientales, tanto en interiores como en exteriores de edificaciones del patrimonio construido. Esta tecnología se ha aplicado con éxito en la monitorización ambiental de diversos museos, palacios, bibliotecas, iglesias y edificios públicos de interés histórico-patrimonial. Entre otros, en la Biblioteca Archivo Tomás Navarro Tomás (CSIC, Madrid), en el Palacio Real Museo de Wilanów (Varsovia, Polonia), en el Museo del Ejército (Toledo), en la Real Fábrica de Cristales de La Granja (Segovia), en el Museo y Biblioteca Histórica de la AGM (Zaragoza) y en el Museo Naval (Madrid). Los principales hitos de producción científica han sido una patente de invención de los sensores y unidades de medida mencionados y más de una docena de artículos publicados en revistas ISI. Entre otras actividades, destacar la participación en cursos de postgrado y másteres universitarios, contribuciones a congresos nacionales e internacionales, organización de eventos y actividades de difusión.

## Diseño de nuevos morteros para aplicación en patrimonio

N. Husillos Rodríguez<sup>1</sup>, S. Martínez-Ramírez<sup>1,2\*</sup>, M.T. Blanco-Varela<sup>1</sup>, P.M. Carmona-Quiroga<sup>1</sup>, I.F. Sáez del Bosque<sup>1</sup>, A.M. Guerrero Bustos<sup>1</sup>, R. Fort<sup>3</sup> & P. López-Arce<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC), c/Serrano Galvache 4, Madrid 28033 \*[sagrario.martinez@cisc.es](mailto:sagrario.martinez@cisc.es)

<sup>2</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)

Instituto de Estructura de la Materia (IEM-CSIC), c/Serrano 121, Madrid 28029

<sup>3</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

El objetivo 5 del Programa Geomateriales trata sobre el desarrollo de nuevos materiales que otorguen servicio específico en el campo de la construcción y restauración del patrimonio construido. El grupo MORPATET-IETCC está desarrollando dos tipos de morteros, morteros de sacrificio para la desalinización de paramentos y morteros con propiedades acústicas mejoradas, colaborándose en ambos casos con el grupo PAP-IGEO. Se han ensayado distintas composiciones, a fin de optimizar la proporción de aglomerante, el tipo y dosificación de adiciones y aditivos, la proporción y granulometría de los áridos, la relación agua/ligante, la temperatura y humedad de curado, etc.

Las propiedades medidas para optimizar los morteros desalinizadores fueron la adherencia, porosidad y estabilidad de volumen. Se aplicaron 4 dosificaciones de morteros en un paramento interior del ábside de la Iglesia de Talamanca del Jarama, cuya superficie estaba cubierta de eflorescencias salinas, previa la limpieza superficial del mismo. La aplicación se repitió 3 veces y se estudió por Espectroscopía Raman la composición superficial de la cara interna (en contacto con el paramento) y externa de los morteros, a fin de conocer su capacidad desalinizadora. Actualmente están en marcha estudios cuantitativos de aniones y cationes de las sales extraídas. Como resultado de la aplicación se pudo concluir que la adherencia ha sido buena en todos los casos, puesto que ninguno se ha desprendido y han estado en la pared hasta un máximo de 10 días. De acuerdo a los resultados de las sales que se han identificado por técnicas espectroscópicas, se puede afirmar que las 4 dosificaciones ensayadas tienen efecto desalinizador, resultando 2 más efectivas. La principal sal extraída ha sido la epsomita, que se encuentra en la superficie externa de los morteros incluso tras la tercera aplicación. Para conseguir la máxima efectividad, se concluye también que el espesor mínimo de mortero aplicado ha de ser de 2 cm. No se ha conseguido retirar completamente los morteros, al quedar una pequeña cantidad adherida a la pared. Estos resultados sugieren una modificación en la dosificación de los morteros, de modo que disminuya su adherencia a la superficie dañada. Las propiedades medidas para optimizar los morteros acústicos fueron densidad, resistencia, porosidad y módulo de Young. Las propiedades acústicas de estos morteros están en la actualidad siendo determinadas por el grupo asociado INTROMAC (Cáceres). Los trabajos no se publicarán de momento, al estar pendientes de ser patentados.

## Técnicas láser para análisis y conservación del patrimonio construido

M. Oujja, M. Sanz\* & M. Castillejo

Grupo *Procesado y Análisis de Materiales por Láser* (LAMAM-IQFR)

Instituto de Química Física Rocasolano (IQFR-CSIC), c/Serrano 119, Madrid 28006

\*mikel.sanz@iqfr.csic.es

La contribución del grupo LAMAM-IQFR al Programa Geomateriales se ha centrado en el objetivo 1, contratándose para su desarrollo un doctor con cargo al programa. Se han estudiado las condiciones de irradiación láser (longitud de onda, fluencia, frecuencia de repetición y número de pulsos) para la limpieza de capas de biodeterioro (líquenes, cianobacterias y costra negra) en distintos sustratos pétreos: enlosado de la Catedral de Segovia, granitos de Machu Picchu y rocas de la cantera de Redueña. Este último trabajo, en colaboración con los grupos ECOGEO-MNCN y PAP-IGEO, ha quedado recogido en Speranza et al. (2013): Nd-YAG laser irradiation damages to *Verrucaria Nigrescens*, *International Biodeterioration and Biodegradation* 84, 281-290.

Asimismo, se han analizado los efectos de la irradiación láser, bajo distintas condiciones de longitud de onda y duración de pulsos, en pigmentos en polvo y en témpera al huevo. Se han utilizado técnicas de Espectroscopía FT-Raman y de Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) para identificar los componentes de pátinas presentes en la fachada del Monasterio de San Blas de Lerma (Burgos), a partir de la fabricación y estudio de muestras patrón, en colaboración con el grupo PAP-IGEO, resultando el trabajo Oujja et al. (2012): Laser Induced Fluorescence and FT-Raman Spectroscopy for characterizing patinas on stone substrates, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 402, 1433-1441.

Por otra parte, la técnica Espectroscopía de Ruptura Inducida por Laser (LIBS) ha servido para investigar la degradación y la composición de cuentas de vidrio de la época romana provenientes de la ciudad de Augusta Emerita, en colaboración con el grupo CERVITRUM-CCHS, resultando la publicación Palomar et al. (2013): LIBS for analysis and characterization of degradation pathologies of Roman glasses, *Spectrochimica Acta B: Atomic Spectroscopy* 87, 114-120. Se ha colaborado con la empresa asociada Arte y Conservación (ARTYCO S.L.) en la caracterización mediante la técnica LIBS de la composición elemental de distintos fragmentos de distintos colores de la vidriera del crucero de la Catedral de Huesca y en la determinación por Espectroscopía Micro-Raman de las condiciones óptimas para la limpieza láser de los estucos de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada. También se ha preparado un informe para la empresa ÁGORA S.L. determinando mediante Espectroscopía Micro-Raman y Microscopía Electrónica de Barrido las condiciones óptimas para la limpieza láser del retablo de la Catedral de Sevilla. El grupo ha participado en las 3 ediciones del curso de postgrado del CSIC organizado por el programa "La conservación de los geomateriales" y, durante la Semana de la Ciencia, ha organizado e impartido talleres sobre "Limpieza de materiales pétreos con láseres".

## **Estudio de materiales y técnicas constructivas en edificios históricos de Alcalá de Henares: Colegio de San Ildefonso y Hospital de Antezana**

R. Undurraga\*, G. Barluenga, F. Estirado & L. Ramón-Laca  
Grupo *Intervención en el Patrimonio y Arquitectura sostenible* (IPAS-UAH)  
ETS Arquitectura y Geodesia, Universidad de Alcalá, c/Santa Úrsula 8, Alcalá de Henares, Madrid 28801  
[\\*raimundo.undurraga@edu.uah.es](mailto:*raimundo.undurraga@edu.uah.es)

La identificación de materiales y técnicas constructivas originales es un aspecto esencial para la conservación y restauración de edificios históricos y así poner en valor su importancia patrimonial. Por lo general, el estado actual de los edificios históricos complejos es el resultado de múltiples intervenciones a lo largo de tiempo, donde se superponen diferentes tipos de materiales y técnicas, que a menudo son difíciles de identificar. De acuerdo al objetivo 1 del Programa Geomateriales, se han desarrollado estrategias para el análisis de estos edificios, a través del estudio de sus materiales y técnicas constructivas. Para ello, el grupo ofertó un contrato con cargo al programa.

La metodología interdisciplinar propuesta combina levantamientos fotogramétricos, análisis morfológico de fábricas, análisis estratigráfico, caracterización de materiales, estudio histórico, análisis métrico de técnicas constructivas y análisis arquitectónico.

Se han analizado dos edificios con más de 500 años de historia en Alcalá de Henares, incluidos dentro de la zona declarada Patrimonio Mundial de UNESCO: el Colegio de San Ildefonso de la Universidad de Alcalá y el Hospital de Antezana.

Se ha colaborado con el grupo CERVITRUM-CCHS, resultando la publicación Barluenga et al. (2014): Brick masonry identification in complex historic buildings, *Construction and Building Materials* 54, 39-46 y la participación en 2 congresos internacionales. Las investigaciones realizadas han sido publicadas en Barluenga et al. (2013): Integrated study to identify the original materials and constructive techniques of a complex historic building: the Main College of the University of Alcalá, Madrid, Spain, *Journal of Cultural Heritage* (en revisión) y presentadas en 4 congresos internacionales, destacando Undurraga & Ramón-Laca (2011): Monesterio, una casa de Felipe II en el entorno de El Escorial, en International Congress on Heritage Conservation; Undurraga et al. (2013): El Hospital de Antezana (Alcalá de Henares, Madrid): estudio arqueométrico y análisis arquitectónico de ladrillos y morteros, en el Congreso Ibérico de Arqueometría, y Barluenga & Undurraga (2013): Architectural analysis of the Antezana Hospital: a 15th century noble house in the historic city of Alcalá de Henares (Madrid, Spain), en International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin. Asimismo, se han presentado ponencias en foros universitarios y se ha participado en las ediciones anuales de la Semana de la Ciencia Madrid con actividades de difusión. Además, se ha participado en las 3 ediciones del curso de posgrado CSIC organizado por el programa "La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio".

## Mecanismos de deterioro de materiales pétreos y cerámicos sumergidos en agua marina y optimización de métodos de desalación

A. Zornoza-Indart<sup>1\*</sup>, P. López-Arce<sup>1</sup>, R. Fort<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

\*[ainarazornoza@pdi.ucm.es](mailto:ainarazornoza@pdi.ucm.es)

Las contribuciones presentadas forman parte de la tesis doctoral desarrollada a través de una beca JaePredoc del CSIC (2010-2014) sobre optimización de métodos tradicionales y novedosos de desalación y consolidación, aspectos englobados en los objetivos 5 y 2 del Programa Geomateriales. En el primer caso, se está trabajando con los métodos de desalación más empleados actualmente. En desalación por papetas se estudiaron los materiales más utilizados, la adición de otros nuevos, su eficacia y el mejor método de aplicación. Los principales resultados han sido presentados en Zornoza-Indart et al. (2012): Efficiency of salt removal using different poultices and application methods: The case of the Spanish Fort of Bizerte, Tunisia, en Global Stone Conference. En el caso de desalación por baños de inmersión se está trabajando en el acople de sistemas de filtraje con el objetivo de generar un sistema de desalación más rápido, efectivo, barato y portátil. En su relación con la optimización de métodos de consolidación y su interacción con las sales, se ha estudiado la penetración de consolidantes tradicionales y novedosos basados en nanopartículas según el método de aplicación, Zornoza-Indart et al. (2012): Consolidation of deteriorated carbonate stones with nanoparticles of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en 12th International Conference on the Deterioration and Conservation of Stone, y Zornoza-Indart et al. (2012): Different environmental conditions in the consolidation of stone with organosilicic and inorganic nano  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en InArt'13. Por otro lado, para analizar la degradación de materiales sumergidos en agua marina, se han sumergido materiales pétreos y cerámicos en las costas de Cádiz en dos pecios con condiciones ambientales distintas, en colaboración con el grupo asociado LABCYP del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica (Universidad de Cádiz). Se ha estudiado la influencia de la temperatura de cocción en el deterioro de ánforas, López-Arce et al. (2013): Archaeological ceramic amphorae from underwater marine environments: Influence of firing temperature on salt crystallization decay, *Journal of the European Ceramic Society* 33 (10), 2031-2042. Además, se ha realizado una estancia de investigación de tres meses en la Facultad de Física de la Università Degli Studi (Bologna) en la que se ha estudiado mediante Tomografía Computerizada la estructura interna y el deterioro de materiales pétreos y cerámicos afectados por cristalización de sales, Zornoza-Indart et al. (2012): CT and NMR to study the internal structure and measure weathering, en EGU 2012, y el estado de conservación de ánforas, Zornoza-Indart et al. (2011): Salt weathering in desalinated and non-desalinated ceramic amphorae from underwater marine environments, en Salt weathering on buildings and stone sculptures.

## **Evaluación integral del deterioro en cuevas: el Risco de Perales de Tajuña**

D.M. Freire Lista<sup>1\*</sup>, V. Greif<sup>2</sup>, M. Álvarez de Buergo<sup>1</sup> & R. Fort<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Petrofísica del IGEO (RedLab 217)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

\*[dafreire@geo.ucm.es](mailto:dafreire@geo.ucm.es)

<sup>2</sup>Dpto. Engineering Geology, Fac. of Natural Sciences, Comenius University, Mlynska Dolina G, Bratislava

<sup>3</sup>Grupo de *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

Los trabajos desarrollados en el Risco de las Cuevas están encaminados hacia el estudio de su deterioro con relación a los agentes que lo afectan, extrapolables a las múltiples cuevas históricas que se localizan tanto en materiales miocenos de la Comunidad de Madrid como en distintos lugares del mundo. Estos agentes de deterioro se han dividido en atmosféricos, estructurales y antrópico/sociales.

Para el estudio del deterioro debido a agentes atmosféricos, se ha monitorizado la temperatura, humedad relativa y precipitación *in situ*, así como se ha instalado un dispositivo de medida de recesión del escarpe. También se han realizado ensayos en laboratorio de envejecimiento acelerado con ciclos de hielo/deshielo, choque térmico, humedad/sequedad y disolución. Se han utilizado probetas de yeso con distinta cantidad de arcilla, extrayéndose el material en las proximidades del monumento natural. Se ha cuantificado la pérdida de peso, volumen, propiedades hídricas y velocidad de propagación de ondas P y S cada 15 ciclos para calcular la evolución del módulo de Young, módulo de rigidez y el coeficiente de Poisson con cada envejecimiento.

El deterioro del frente del escarpe debido a agentes estructurales se está estudiando con fotogrametría, en colaboración con el grupo asociado del Departamento de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Comenius en Bratislava (Eslovaquia), para identificar y determinar la geometría, volumen y actividad de fallas, movimientos en masa y cursos de agua estacionales. También, mediante la instalación de trampas de sedimento, se está cuantificando el material desprendido. Se analizará la evolución del deterioro en el monumento natural durante los últimos 125 años, comparando las fotografías históricas con el estado actual de las cuevas mediante técnicas de fotogrametría.

Para minimizar el deterioro debido a agentes antrópico-sociales se están desarrollando, en colaboración con el Ayuntamiento de Perales de Tajuña, actividades encaminadas a la puesta en valor del Risco de las Cuevas, como la recolección de fotografías antiguas entre los vecinos, organización de charlas sobre la geología de la zona y patrimonio troglodítico y la realización de Rutas Geomonumentales enmarcadas en la Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid.

## Monitorización para la conservación preventiva del patrimonio construido

M.I. Martínez-Garrido<sup>1,2\*</sup>, R. Fort<sup>1</sup> & M.J. Varas-Muriel<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040  
[\\*mi.martinez.garrido@csic.es](mailto:mi.martinez.garrido@csic.es)

<sup>2</sup>Campus de Excelencia Internacional\_Moncloa (UCM-UPM, CSIC), Madrid 28040

<sup>3</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Dpto. Petrología y Geoquímica, Facultad CC. Geológicas (UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

Hoy en día se aboga por una conservación preventiva del patrimonio cultural teniendo como objetivo fundamental una reducción del daño antes de su aparición, siendo muy necesaria la monitorización del patrimonio. Englobada en los objetivos del Programa Geomateriales se desarrolla la tesis doctoral del clúster de Patrimonio del CEI\_Moncloa titulada "Evaluación, diagnóstico y monitorización del deterioro en el patrimonio cultural mediante técnicas no destructivas a través de redes de sensores inalámbricas". En esta línea de investigación se emplean diferentes técnicas de monitorización, que engloban desde los *dataloggers* convencionales y las técnicas no destructivas, como la Termografía Infrarroja o las técnicas higrométricas, hasta las técnicas de monitorización inalámbricas. Mediante el empleo de sensores de botón y la información que proporcionan acerca de las fluctuaciones de temperatura y humedad, se han desarrollado diversos trabajos de monitorización de las condiciones microclimáticas en el interior de iglesias, para el estudio y caracterización de sus sistemas de ventilación-calentamiento y su relación con el deterioro.

Entre los trabajos presentados en esta línea, cabe destacar Varas-Muriel et al. (2014): Monitoring the thermal-hygrometric conditions induced by traditional heating systems in a historic Spanish church (XII-XVI C.), *Energy and Buildings Journal* 75, 119-132. Se ha realizado una estancia de investigación de tres meses de duración en el MPA-Universidad de Stuttgart (Alemania) y se han iniciado actividades de colaboración con el grupo asociado del IBAM-CNR (Italia) a través del proyecto PRO\_CULT. Fruto de la colaboración en la Universidad de Stuttgart se han iniciado trabajos de evaluación e implantación del sistema de redes inalámbricas de sensores desarrollado en dicha institución, herramienta indispensable para la obtención de un sistema multiparamétrico con procesado de información propio que permita actuar en aras a una conservación preventiva, desarrollándose trabajos en colaboración tras las labores realizadas en la estancia. Se destaca la publicación Martínez-Garrido et al. (2014): Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings, *Construction & Building Materials* 51, 383-394 y la contribución Martínez-Garrido et al. (2013): Assessment through wireless sensor networks implementation for architectural heritage, en *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*. Además, se participó como ponente en el curso "La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio".

## Validación y mejora de técnicas no destructivas: Raman portátil

S. Martínez-Ramírez<sup>1,2\*</sup>, M.T. Blanco-Varela<sup>1</sup>, P.M. Carmona-Quiroga<sup>1</sup>,  
I.F. Sáez del Bosque<sup>1</sup>, C. Vázquez-Calvo<sup>3</sup>, M. Álvarez del Buergo<sup>4</sup>,  
R. Fort<sup>3</sup>, P. López-Arce<sup>3</sup>, A. Zornoza-Indart<sup>3</sup> & M. Gómez-Heras<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC), c/Serrano Galvache 4,  
Madrid 28033 \*[sagrario.martinez@csic.es](mailto:sagrario.martinez@csic.es)

<sup>2</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Estructura de la Materia (IEM-CSIC), c/Serrano 121, Madrid 28029

<sup>3</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

<sup>4</sup>Laboratorio de Petrofísica del IGEO (RedLab 217)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

Este objetivo pretende potenciar la colaboración de los grupos en la validación de técnicas analíticas e instrumentales no invasivas aplicadas a geomateriales. En el ámbito de la investigación del patrimonio cultural se considera de máxima utilidad el uso de la Espectroscopía Raman, al ser una técnica de análisis no destructivo que permite la caracterización molecular de materiales de interés en el patrimonio y su conservación (pigmentos, morteros, hidrofugantes, etc.). En los últimos años ha crecido el interés en la utilización de técnicas portátiles, que a la vez de ser no destructivas permiten realizar estudios *in situ*.

En dicho marco se centra esta investigación, en la que se ha validado la utilización de un Raman portátil DeltaNu con tres objetivos fundamentales: el análisis de eflorescencias en edificios del patrimonio, la identificación y caracterización de pinturas en cuevas, y análisis de sales en muestras sometidas a ensayos de durabilidad. El primero de los objetivos se ha realizado en colaboración con el grupo PAP-IGEO y el segundo se ha efectuado en las cuevas de Maltravieso (Cáceres), en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Con respecto a la utilización en cuevas, se ha comprobado la validez en condiciones de bajas temperaturas (aprox 15°C) y a elevadas humedades relativas (98%), pudiéndose identificar tanto la piedra base como el pigmento y el depósito superficial de CaCO<sub>3</sub>.

El equipo Raman portátil ha permitido la identificación de silicio octaédrico presente en la taumasita, una de las sales formadas como producto del ataque por sulfatos en los materiales de construcción. Asimismo, se han identificado calcita y aragonito, dos formas cristalinas diferentes del carbonato cálcico.

Este trabajo ha dado lugar a las siguientes publicaciones, Lopez-Arce et al. (2011): Evaluation of Portable Raman for the characterization of salt efflorescences at Petra, Jordan, *Spectroscopy Letters* 44 (7-8), 505-510 y Vazquez-Calvo et al. (2012): The use of Portable Raman Spectroscopy to identify conservation treatments applied on stone in the architectural heritage, *Spectroscopy Letters* 45, 146-150.

## Validación y mejora de técnicas no destructivas: FTIR/TG/EGA

S. Martínez-Ramírez<sup>1,2\*</sup>, M.T. Blanco-Varela<sup>1</sup>, P.M. Carmona-Quiroga<sup>1</sup>,  
I.F. Sáez del Bosque<sup>1</sup>, M. Alonso<sup>1</sup> & N. Husillos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC), c/Serrano Galvache 4, Madrid  
28033 \*[sagrario.martinez@csic.es](mailto:sagrario.martinez@csic.es)

<sup>2</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Estructura de la Materia (IEM-CSIC), c/Serrano 121, Madrid 28029

El objetivo 4 del Programa Geomateriales pretende la validación de técnicas analíticas e instrumentales no invasivas aplicadas a geomateriales. En el ámbito de la investigación del patrimonio cultural se considera de máxima utilidad el uso de técnicas espectroscópicas de caracterización y cuantificación molecular. La técnica EGA permite la caracterización por FTIR de los gases procedentes de la descomposición térmica (ATD/TG) de una sustancia. Un ejemplo de aplicación de la técnica ha sido estudiar el comportamiento térmico de una sal expansiva que causa deterioro en morteros hidráulicos (taumasita,  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaCO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ). El trabajo se realizó en colaboración con el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Málaga y el Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC).

Existe controversia en torno a la naturaleza de las reacciones de descomposición que se producen en el tratamiento térmico, asignando algunos autores el primer pico endotérmico a la pérdida de agua o bien a la pérdida de agua y  $\text{CO}_2$ . Esto produce incertidumbre a la hora de cuantificar contenidos de taumasita en muestras deterioradas de morteros hidráulicos mediante ATD/TG. Con análisis cuantitativos FTIR/TG/EGA del gas producido en la descomposición térmica de la taumasita, avalados por otros de termodifracción, se ha podido establecer sin ambigüedad la naturaleza de las señales térmica observadas en ATD a las diferentes temperaturas.

Los resultados indican que el valor de la temperatura a la cual se inestabiliza la taumasita depende del procedimiento experimental utilizado, si el procedimiento es estático o dinámico etc. En las condiciones del estudio, la taumasita pierde toda su agua de constitución a temperaturas inferiores a  $194^\circ\text{C}$ . Su estructura cristalina se destruye tras su deshidratación y, de acuerdo con los resultados, el material amorfo resultante es más inestable térmicamente que cualquiera de los polimorfos del  $\text{CaCO}_3$ , descomponiéndose y perdiendo todo el  $\text{CO}_2$  a temperaturas inferiores a  $550^\circ\text{C}$ .

Además del interés puramente científico, estos estudios presentan una aplicación en el análisis cuantitativo mediante ATD/TG de la cantidad de taumasita en conglomerantes hidráulicos deteriorados. Los principales resultados alcanzados han sido presentados en un congreso internacional, Blanco-Varela et al. (2011): Thermal behaviour of thaumasite, XIII International Congress on the Chemistry of Cement.

## **Pastas y hormigones autocompactantes con componentes micro y nanométrico para reparación y rehabilitación del patrimonio**

J. Puentes\*, G. Barluenga & I. Palomar

Grupo *Intervención en el Patrimonio y Arquitectura sostenible* (IPAS-UAH)  
ETS Arquitectura y Geodesia, Universidad de Alcalá, c/Santa Úrsula 8, Alcalá de Henares, Madrid 28801

[\\*javier.puentes@uah.es](mailto:javier.puentes@uah.es)

Dentro de los trabajos de investigación sobre el diseño de nuevos materiales para el patrimonio construido, el grupo IPAS-UAH se ha enfocado en los materiales base cemento, buscando la autocompactabilidad del material, según criterios de sostenibilidad y nanotecnología aplicada. La investigación se enmarca en el objetivo 5 del Programa Geomateriales, especialmente en el diseño de nuevos materiales considerando las técnicas constructivas y de aplicación para la reparación y rehabilitación del patrimonio construido. Este estudio supone la continuación del proyecto "Propiedades a edades tempranas y durabilidad de hormigones autocompactantes (HAC) para edificación y rehabilitación del patrimonio arquitectónico", financiado por la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha. Para realizar estas investigaciones, se ha ofertado un contrato de investigación con cargo al Programa Geomateriales. El trabajo realizado ha incluido una estancia de movilidad investigadora en el Laboratorio de Petrofísica (RedLab 217) del Instituto de Geociencias.

Entre los resultados cabe destacar el diseño y caracterización a edades tempranas y en estado endurecido de pastas fluidas y hormigones autocompactantes con diferentes tipos de adiciones y fibras de tamaños micro y nanométricos. La evaluación a edades tempranas ha permitido identificar los parámetros más relevantes de la evolución de los materiales, la influencia de los diferentes componentes y los riesgos de daño por fisuración debidos a los efectos ambientales. En estado endurecido se mejoran las propiedades mecánicas y físicas que condicionan su aplicabilidad y durabilidad. La elevada fluidez permite un completo llenado de los encofrados sin necesidad de vibración, lo que mejora la seguridad en el trabajo sin afectar las estructuras en fase de consolidación. El material dispone de un mejor acabado superficial que lo hace menos vulnerable a los agentes ambientales externos.

Entre los resultados científicos obtenidos hasta el momento, indicar la publicación Barluenga et al. (2013): Early age and hardened performance of cement pastes combining mineral additions, *Materials and Structures* 46 (6), 921-941; 4 ponencias en congresos internacionales, destacando Puentes et al. (2012): Early age behaviour of self compacting concrete with polypropylene fibers and carbon nanofibers, en *Fibre Reinforced Concrete*; 3 ponencias en congresos nacionales; 3 capítulos de libro y la participación en 4 ediciones de la Semana de la Ciencia de Madrid. Se espera que hasta la finalización del programa se publiquen dos artículos en revista SCI.

## **Diseño y caracterización de morteros para rehabilitación con características mejoradas**

I. Palomar\*, G. Barluenga & J. Puentes

Grupo *Intervención en el Patrimonio y Arquitectura sostenible* (IPAS-UAH)

ETS Arquitectura y Geodesia, Universidad de Alcalá, c/Santa Úrsula 8, Alcalá de Henares, Madrid 28801

\*[irene.palomar@edu.uah.es](mailto:irene.palomar@edu.uah.es)

El trabajo de investigación del grupo IPAS-UAH responde al objetivo 5 del Programa Geomateriales, "Diseño de nuevos materiales para el patrimonio construido", centrándose en morteros ligeros con propiedades específicas. Para el desarrollo de este objetivo, el grupo ofertó un contrato con cargo al programa.

Los objetivos parciales establecidos han sido la mejora en los requisitos térmicos y acústicos debido a las exigencias actuales, la modificación de la estructura porosa y la aplicación de técnicas de ensayo. Las técnicas utilizadas han sido Absorción Acústica en tubo de impedancia y Rugosimetría (en colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha), Conductividad Térmica en cámara y Absorción por succión capilar, Porosimetría por Intrusión de Mercurio y Permeabilidad al vapor de agua.

El plan de trabajo se ha dividido en cinco fases: estudio previo sobre el estado del arte; diseño de dosificaciones del mortero y fabricación de muestras; caracterización de las muestras mediante ensayos; revisión y optimización de las dosificaciones para maximizar los resultados en relación a las mejoras térmicas y/o acústicas; y aplicaciones constructivas de los morteros desarrollados. La primera, segunda y tercera fases ya se han completado.

Está en fase de estudio la viabilidad de una patente, basada en la mezcla de cal y cemento modificada con características acústicas y térmicas mejoradas. En lo referente a los resultados científicos alcanzados, se ha presentado el trabajo Palomar et al. (2013): Estudio sobre morteros de revestimiento para la mejora acústica y térmica en construcción, rehabilitación o restauración del patrimonio edificado, en las Jornadas Internacionales de Investigación en Ciencias de los Ámbitos Antrópico. Se está elaborando una publicación internacional sobre las propiedades acústicas y térmicas en morteros modificados para rehabilitación y restauración.

Se ha participado durante cuatro años en las ediciones anuales de la Semana de la Ciencia Madrid, con actividades de difusión bajo el título "Materiales en el patrimonio arquitectónico".

## Nuevos nanomateriales para la consolidación y protección del material pétreo

A. Sierra-Fernández<sup>1\*</sup>, M.E. Rabanal<sup>2</sup>, L.S. Gómez-Villalba<sup>1</sup> & R. Fort<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

[\\*arsierra@ucm.es](mailto:arsierra@ucm.es)

<sup>2</sup>Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad 30, Leganés, Madrid 28911

En los últimos tiempos el desarrollo de la nanotecnología en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural se encuentra en un momento emergente. Este continuo avance brinda la oportunidad de obtener materiales con nuevas propiedades que permiten mejorar las actuaciones de protección y consolidación llevadas a cabo sobre los bienes culturales, Gómez-Villalba et al. (2010): La aportación de la nanociencia a la conservación de los bienes del patrimonio cultural, *Revista de Patrimonio Cultural de España* 4, 43-56. Por este motivo, el desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en el campo de la construcción y restauración del patrimonio ha sido uno de los objetivos claves del Programa Geomateriales. Dentro de esta línea de investigación cabe destacar el desarrollo de un nuevo nanomaterial como producto consolidante, hidrofugante y/o autolimpiante de mayor eficacia, idoneidad y durabilidad con el material pétreo dolomítico y calcítico. Para ello, se ha ofertado un contrato de investigación con cargo a fondos del programa.

Asimismo, en el desarrollo de esta investigación se han establecido nuevas colaboraciones que han permitido avanzar en el diseño de nuevos materiales nanoestructurados, principalmente entre el grupo PAP-IGEO y el grupo asociado del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid.

Hasta el momento, los principales resultados han sido la obtención de nanopartículas de hidróxido de magnesio con un importante potencial para la conservación del patrimonio pétreo dolomítico, dada su buena compatibilidad con este tipo de sustrato, Sierra-Fernández et al. (2013): Nuevos materiales nanoestructurados para la conservación del material pétreo dolomítico, en el LIII Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. La obtención de este tipo de nanopartículas se ha llevado a cabo mediante distintos métodos de síntesis. Además, se han estudiado diferentes parámetros experimentales de la síntesis (temperatura y tiempo de reacción, concentración de precursores y empleo de modificadores) que podrían influir en la formación de partículas no agregadas, de tamaño nanométrico, estructura cristalina y morfología más adecuada al tipo de material pétreo a tratar. Asimismo, las futuras líneas de investigación se centran en el estudio de la eficacia, idoneidad y durabilidad de su aplicación sobre diferentes sustratos desde distintos problemas típicos derivados de su aplicación, como son la concentración de la solución precursora, las condiciones medioambientales de aplicación del producto y la metodología de aplicación.

## Desarrollo de nuevos cementos sulforresistentes con aplicación en patrimonio

P.M. Carmona-Quiroga<sup>1</sup>, S. Martínez-Ramírez<sup>1,2</sup> & M.T. Blanco-Varela<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC), c/Serrano Galvache 4,  
Madrid 28033 \*[paulacq@ietcc.csic.es](mailto:paulacq@ietcc.csic.es)

<sup>2</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Estructura de la Materia (IEM-CSIC), c/Serrano 121, Madrid 28029

Son muchas las causas de deterioro que ponen en peligro la integridad del patrimonio construido con cemento Portland, tanto de reciente factura como empleado en reparaciones o restauraciones de bienes históricos, resultando el ataque por sulfatos (procedentes de aguas subterráneas, suelos, etc.) una de las más importantes. La resistencia a los sulfatos de los cementos especiales disponibles actualmente en el mercado ( $C_3A < 5\%$  en peso, UNE-EN 197-1:2011) es limitada: evitan la formación de una sal expansiva como la etringita ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), pero no la precipitación de otras sales también destructivas como el yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) o la taumasita ( $CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaO \cdot SiO_2 \cdot 15H_2O$ ).

Dentro del objetivo 5 del Programa Geomateriales "Diseño de nuevos materiales para el patrimonio construido", el grupo MORPATET-IETCC ha trabajado en el desarrollo de un cemento resistente a la formación de una mayor variedad de sales destructivas. A través de la adición de compuestos de bario ( $BaCO_3$ ,  $BaO$ ) al cemento Portland, se ha conseguido inhibir la formación no sólo de etringita sino también de taumasita, al quedar los sulfatos en disolución inmovilizados en forma de  $BaSO_4$  (barita), fase que a diferencia de las anteriores es muy insoluble y estable.

En primer lugar se realizaron estudios termodinámicos preliminares para evaluar la sulforresistencia del cemento con estas nuevas adiciones. Los resultados satisfactorios conseguidos fueron avalados experimentalmente en ensayos de deterioro acelerado en laboratorio (inmersión de pastas y morteros de cemento en una disolución agresiva de  $Na_2SO_4$  al 4 % en peso durante 5 meses). Los resultados de estas investigaciones se recogen principalmente en el artículo Carmona-Quiroga & Blanco-Varela (2013): *Ettringite decomposition in the presence of barium carbonate*, *Cement and Concrete Research* 52, 140-148, en 3 participaciones en congresos internacionales, Carmona-Quiroga et al. (2013): *Prevention of sulfate-induced thaumasite attack: thermodynamic modeling in  $BaCO_3$ -blended cement*, en *International Congress on Materials and Structural Stability*; Carmona-Quiroga et al. (2012): *Thermodynamic modelling of sulfo-resistant cements with barium compounds additions*, en *International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*, y Carmona-Quiroga et al. (2011): *Thermodynamic stability of hydrated Portland cement phases in the presence of barium carbonates*, en *XIII International Congress on the Chemistry of Cement*, y en 1 workshop internacional, Carmona-Quiroga et al. (2010): *Influence of  $BaCO_3$  and  $BaO$  on the hydration of OPC*, *Thermodynamic Modeling in Cementitious Systems*.

## **Modificaciones nanoestructurales en pastas hidráulicas curadas hidrotermalmente con adición de nanosílice**

I.F. Sáez del Bosque<sup>1\*</sup>, S. Martínez-Ramírez<sup>1,2</sup>, M. Martín-Pastor<sup>3</sup> & M.T. Teresa Blanco-Varela<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IC CET)  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC), c/Serrano Galvache 4, Madrid 28033 \*[i.fuencisla@ietcc.csic.es](mailto:i.fuencisla@ietcc.csic.es)

<sup>2</sup>Grupo *Morteros en el Patrimonio* (MORPATET-IETCC)  
Instituto de Estructura de la Materia (IEM-CSIC), c/Serrano 121, Madrid 28029

<sup>3</sup>Unidad de Resonancia Magnética de la Red de Infraestructuras de Apoyo a la Investigación y Desarrollo Tecnológico (RIAIDT), Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela 15782

El ligante en morteros y hormigones hidráulicos está fundamentalmente constituido por un silicato cálcico hidratado, de naturaleza amorfa, denominado gel C-S-H, que confiere al producto final sus propiedades adherentes y mecánico-resistentes, sin olvidar su contribución a los aspectos de durabilidad. En la actualidad el desarrollo de la nanotecnología ha potenciado el estudio de cementos con adiciones de nanopartículas. El desarrollo de estos nuevos materiales cementantes con propiedades mejoradas pasa necesariamente por aumentar los conocimientos en torno al gel C-S-H, al verse modificado por dichas adiciones. La experiencia del grupo MORPATET-IETCC en estos temas queda enmarcada en el objetivo 5 del Programa Geomateriales, habiéndose contratado un doctor con cargo al programa para continuar y potenciar estas investigaciones.

Se han establecido correlaciones entre algunas variables que afectan al proceso de hidratación del cemento, (e.j. temperatura y tiempo de curado) y las modificaciones nanoestructurales de los geles C-S-H formados cuando el cemento ha sido parcialmente sustituido por nanosílice amorfa (nSA). La adición de acelera la hidratación de las fases silicato del cemento, especialmente de la belita a corta edad, incrementándose dicho efecto por la aplicación de alta temperatura. La adición de nSA produce inicialmente geles C-S-H de mayor longitud media de cadena (MCL) y baja relación Al(IV)/Si. El incremento de la MCL por presencia de nSA se refuerza con la temperatura de curado. La presencia de nSA estabiliza la precipitación etringita hasta 28 días de hidratación en pastas curadas a 65°C, (temperatura a la cual la etringita es inestable termodinámicamente). Este comportamiento es interesante desde el punto de vista tecnológico ya que en el prefabricado de piezas de hormigón se aplican condiciones hidrotermales que conducen a una desestabilización de la etringita, favoreciendo la formación del monosulfoaluminato cálcico hidratado, así como una mayor adsorción de iones sulfatos en la nanoestructura del gel C-S-H con los problemas de durabilidad que ello podría acarrear. Destacar los trabajos Sáez del Bosque et al. (2013): Effect of temperature on C<sub>3</sub>S and C<sub>3</sub>S + nanosilica hydration and C-S-H structure, *Journal of American Ceramic Society* 96, 957-965 y Sáez del Bosque et al. (2013): Combined effect of amorphous nanosilica and temperature on white Portland cement hydration, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52, 11866-11874.

## Eficacia del laser para la eliminación de microorganismos y líquenes sobre materiales pétreos

M. Álvarez de Buergo<sup>1\*</sup>, C. Ascaso<sup>2</sup>, A. de los Ríos<sup>2</sup>, M. Gómez-Heras<sup>3</sup>, S. Pérez-Ortega<sup>2</sup>, R. Fort<sup>3</sup>, M. Sanz<sup>4</sup>, M. Oujja<sup>4</sup>, M. Speranza<sup>2</sup> & M. Castillejo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Petrofísica del IGEO (RedLab 217)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

\*[monica.alvarez@csic.es](mailto:monica.alvarez@csic.es), [alvarezm@ucm.es](mailto:alvarezm@ucm.es)

<sup>2</sup>Grupo *Ecología Microbiana y Geomicrobiología del Substrato Lítico* (ECOGEO-MNCN)

Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), c/José Gutiérrez Abascal 2, Madrid 28006

<sup>3</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

<sup>4</sup>Grupo *Procesado y Análisis de Materiales por Laser* (LAMAM-IQFR)

Instituto Química Física Rocasolano (IQFR-CSIC), c/Serrano 119, Madrid 28006

La dolomía de Redueña es un material pétreo tradicionalmente utilizado en la construcción del patrimonio arquitectónico de Madrid. Las canteras se encuentran a 50 km al norte de Madrid capital y, desde hace unos años, para los grupos firmantes de este trabajo, constituyen un laboratorio experimental. En esta investigación se ha evaluado *in situ* la eficacia del laser en la eliminación de biofilms sobre la roca. Para ello se irradió la roca con laser (Nd:YAG, 1064 nm, 10 ns, 200 mJ). La dolomía está colonizada por microorganismos (fundamentalmente cianobacterias) y líquenes. Se tomaron muestras de la roca irradiada para verificar la eficacia del tratamiento laser tanto en los talos liquénicos y comunidades microbianas (mediante SEM-BSE y TEM), como en el substrato lítico (SEM-SE+EDS).

Los resultados muestran que los talos liquénicos se eliminaron solo parcialmente. La fluencia del laser que se aplicó no fue capaz de eliminar y/o dañar la mayoría de los talos liquénicos, lo cual concuerda con resultados previos obtenidos en laboratorio, en donde se demostraba que se necesitaba una fluencia más elevada para limpiar y hacer inactivos a los líquenes. No se ha observado daño en los cristales de dolomita con la irradiación (SEM), y tampoco se ha producido un aumento de la rugosidad superficial (micro-rugosímetro óptico 3D). El color, después del tratamiento con laser y medido con un espectrofotómetro, se acerca al color de la roca fresca inalterada, aunque sin llegar a alcanzarlo.

También se ha monitorizado el proceso térmico durante la irradiación laser, mediante cámara de video de termografía de infrarrojos. Aunque las temperaturas máximas medidas durante la irradiación laser no suelen exceder 55°C, los gradientes térmicos pueden llegar a ser extremadamente elevados (5°C/0,01 s), especialmente en especies liquénicas de bajo albedo, como la *Verrucaria Nigrescens*. Entre los resultados científicos a los que ha dado lugar este trabajo, destacar Álvarez de Buergo et al. (2012): Assessment of laser treatment on dolostones colonized by microorganisms and lichens, en International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage.

## Biorreceptividad y tratamientos para el control del biodeterioro

C. Ascaso<sup>1\*</sup>, J. Wierzchos<sup>1</sup>, S. Pérez-Ortega<sup>1</sup>, M. Speranza<sup>1</sup>,  
B. Cámara<sup>1,2</sup> & A. de los Ríos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Ecología Microbiana y Geomicrobiología del Sustrato Lítico* (ECOGEO-MNCN)  
Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), c/José Gutiérrez Abascal 2,  
Madrid 28006, \*ascaso@mncn.csic.es

<sup>2</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)  
Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

La biorreceptividad de un material pétreo es la capacidad que tiene de ser colonizado. El primer trabajo realizado en la cantera de Redueña en el marco del programa fue efectuado con biocidas proporcionados por la empresa asociada THOR Especialidades S.A., aplicándose también técnicas de biología molecular. Se establecieron la secuencia de colonización y los procesos de bioalteración y la eficacia de los biocidas aplicados, analizada después de 4 y 16 meses. También se han investigado biocidas de la empresa CTS aplicados en el claustro de la Catedral de Segovia, mostrando que los biocidas que parecen actuar mejor sobre la colonización superficial no son tan eficaces sobre la microbiota del interior de la piedra y viceversa. En Redueña se ha continuado con la puesta a punto de protocolos para controlar el biodeterioro, usando biocidas de THOR y el biocida Koretrel. Se ha empleado una técnica no invasiva, que utiliza cambios en el rendimiento de la clorofila para obtener información del status del Fotosistema II (PSII). El tratamiento con biocidas de THOR y con el Koretrel proporcionó buenos resultados.

El tratamiento con láser en laboratorio, analizado en colaboración con el grupo LAMAM-IQFR, dio unos extraordinarios resultados en cuanto a la erradicación de talos líquénicos, recogidos en Speranza et al. (2013): Nd-YAG laser irradiation damages to *Verrucaria Nigrescens*, *International Biodeterioration and Biodegradation* 84, 281-290. Se hizo un experimento de aplicación de laser en la cantera de Redueña combinándolo con aplicación de biocidas, colaborando también con el grupo PAP-IGEO, resultando el trabajo Alvarez de Buergo et al. (2013): Assessment of laser treatment on dolostones colonized by microorganisms and lichens, en *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*. Todo ello se realizó en colaboración además con la empresa CTS. Se ha llevado a cabo también un diagnóstico de los procesos de biodeterioro existentes en la ciudadela de Machu Picchu, con cofinanciación de un proyecto de la Fundación Carolina y en colaboración con la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, el Parque Arqueológico de Machu Picchu y el grupo PAP-IGEO. Sobre piedra de cantera se ha analizado también el efecto de tratamientos combinados de biocida y limpieza con laser, en colaboración con el grupo LAMAM-IQFR. El grupo ECOGEO-MNCN ganó un premio de la empresa alemana PRESENS con un experimento efectuado en el Puente de Tamanca, consiguiendo tener prestado por un año un equipo que permite la medida del consumo de oxígeno en líquenes y microorganismos que colonizan la piedra.

## **Efecto de la orina en materiales del patrimonio construido**

B. Cámara<sup>1\*</sup>, R. Fort<sup>1</sup> & M. Álvarez de Buergo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo *Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio* (PAP-IGEO)

<sup>2</sup>Laboratorio de Petrofísica del IGEO (RedLab 217)

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), c/José Antonio Nováis 12, Madrid 28040

\*[b.camara@igeo.ucm-csic.es](mailto:b.camara@igeo.ucm-csic.es)

En este estudio se evalúa el efecto del deterioro de materiales del patrimonio construido por acción antrópica, específicamente por acción de la orina. Este trabajo se está llevando a cabo en el grupo PAP-IGEO y en el Laboratorio de Petrofísica (RedLab 217) del Instituto de Geociencias, y se encuadra dentro del objetivo 7 del programa "Deterioro generado por agentes antrópicos en el patrimonio construido". La orina presenta un alto contenido de agua (95%) y constituye una fuente potencial de sales solubles, siendo susceptible de generar alteración en geomateriales por diversos procesos, entre los que destacan la cristalización de sales, la disolución y el biodeterioro. La elevada producción de orina humana y de animales (principalmente perros) sobre las fachadas de los edificios, está adquiriendo cada vez una mayor relevancia, especialmente significativa en los centros históricos de ciudades como Madrid, ya que no sólo supone un riesgo para la salud humana sino que además pone en riesgo la durabilidad de los geomateriales del patrimonio construido.

Para evaluar los mecanismos de alteración provocados por este agente antrópico se está efectuando un experimento de simulación, utilizando calizas de Colmenar de Oreja y granito de La Cabrera, geomateriales ampliamente utilizados en distintas construcciones de la Comunidad de Madrid. Estos materiales están siendo sometidos a 100 ciclos de inmersión en orina humana y secado en estufa a 40°C o campana, simulando el efecto que se produce en la realidad. Se compararán las propiedades físico-químicas de rugosidad, color, ultrasonidos, capilaridad y porosidad de estos materiales al inicio y al final de la experimentación, así como el contenido en sales (aniones y cationes) mediante Cromatografía Iónica, y la observación en detalle de las muestras al microscopio electrónico de barrido.

Por otro lado, se va a evaluar el efecto de la orina sobre la comunidad microbiana litobiótica, mediante la aplicación periódica de este agente antrópico sobre una superficie rocosa con colonización microbiana existente y bajo condiciones naturales. Este estudio se llevará a cabo en las canteras de dolomía de Redueña, ampliamente caracterizadas y estudiadas en los Programas Maternas y Geomateriales, en colaboración con el grupo ECOGEO-MNCN. Los resultados de este estudio permitirán determinar en detalle los patrones de alteración generados en estos materiales del patrimonio construido, como consecuencia de la presencia de este agente antrópico. Además, ayudará a determinar qué medidas preventivas y correctivas son las más adecuadas.

