



Universidad
de Navarra



VI Jornadas



FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Pamplona | 28-30 | Mayo | 2018

Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia

VI Jornadas FICAL

Pamplona, 28-30 de mayo de 2018

Libro de Actas



Universidad
de Navarra



Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia

VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Libro de Actas

Livro de Atas

Editores:

José Ignacio Álvarez Galindo

José María Fernández Álvarez

Íñigo Navarro Blasco

Adrián Durán Benito

Rafael Sirera Bejarano

VI Jornadas FICAL – Fórum Ibérico de la Cal

Pamplona, 28-30 de mayo de 2018

La Organización de estas Jornadas se enmarca dentro de las actividades del Proyecto “Optimización de nuevos morteros de restauración de cal mediante combinaciones de aditivos y adiciones minerales puzolánicas” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) con la signatura MAT2015-70728-P, y han contado con el patrocinio de Grupo Puma, Heidelberg Cement, Saint-Astier, Lhoist, Ancade, Gordillos y Unicmall.

Grupo de investigación MIMED

Departamento de Química

Facultad de Ciencias

<https://www.unav.edu/en/web/heritage-materials-environment/home>

mimed@unav.edu



© Servicio de Publicaciones

Universidad de Navarra

www.unav.edu

ISBN: 978-84-8081-604-5

URL: <http://hdl.handle.net/10171/52333>

Cubierta: Castillo de Marcilla, Navarra, restaurado por Institución Príncipe de Viana, que ha cedido la foto ©.

ÍNDICE

Presentación.....	1
La cal en arquitectura.....	5
Cal y arquitectura tradicional gallega.....	7
La cal en el patio tradicional canario.....	19
Revestimientos com base em cal em monumentos de interesse histórico e patrimonial: Exemplos do repositório DB-HERITAGE.....	27
La cal como elemento bioclimático en la arquitectura tradicional canaria.....	39
Aplicaciones diversas de la cal.....	51
Cales aéreas especiales para morteros: el ejemplo de morteros de relleno para túneles.....	53
Propiedades de la cal en pasta obtenida a partir del tratamiento de fosfoyesos de la industria de fertilizantes.....	64
Hormigones de cal: nuevos “viejos” materiales.....	76
Aplicaciones de la cal en la ingeniería civil.....	87
Características de los morteros de cal.....	97
Comportamiento de fábricas de piedra tomada con mortero de cal.....	99
A avaliação do comportamento hídrico de argamassas com base em cal: O efeito dos agregados na capacidade de proteção.....	106
Incidencia de los valores de consistencia de los morteros de cal de elaboración artesanal en su comportamiento en estado endurecido.....	118
Análise experimental do fluxo de humidade em argamassas de cal aérea.....	129
Características de materiales con base cal.....	141
Estudo de revestimentos à base de cal: uma abordagem integrada.....	143
Caracterización de los morteros históricos del puente de Trillo (Guadalajara) ...	166
Estuques Maneiristas de uma Igreja de Lisboa: Caracterização Material e Técnica.....	177
Metodología simplificada de identificación mediante MOP de las cales hidráulicas y los cementos naturales.....	188

Desafios atuais na análise e na replicabilidade de argamassas históricas à base de cal aérea	200
Cal en restauración / Nanocales y aditivos	213
Aditivos de origen natural: su influencia en la reactividad y propiedades de morteros de cal aérea e hidráulica	215
Estudio del comportamiento en estado endurecido de morteros de cal aérea con metacaolín y superplastificantes	228
Protocolos de intervención en la restauración del Edificio catalogado del Puerto de Barcelona	241
Morteros de relleno con base cal con adición puzolánica y diversos aditivos.....	251
Efecto del disolvente en la síntesis de nanocal	263
Cal como sustrato para incorporación de agentes fotocatalíticos	268
Hornos de cal.....	281
Tres hornos de cal en la isla de Gran Canaria. Tipologías y funcionamiento	283



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Presentación

Este Libro de Actas recoge, en formato de trabajos completos, una parte de las comunicaciones presentadas durante las VI Jornadas del Fórum Ibérico de la Cal, organizadas por el Grupo de Investigación *Heritage, Materials and Environment* (MIMED) y celebradas en Pamplona, en la Universidad de Navarra, entre el 28 y el 30 de mayo de 2018. Estas comunicaciones han sido revisadas por expertos del Comité Científico, que han velado por el interés de los trabajos y su adecuación a criterios científico-técnicos o a su carácter divulgativo según los casos y, finalmente, han sugerido las modificaciones oportunas para conseguir estos fines.

El Libro está estructurado en secciones de interés para la obtención, aplicaciones y novedades en el empleo de la cal. La cal es un agente versátil, que ha resistido el avance de los tiempos y que permanece como uno de los materiales con más historia y, muy ciertamente, con más presente y futuro de entre los conocidos.

Así, pueden leerse comunicaciones relacionadas con la cal en arquitectura, usos actuales en edificación nueva y en rehabilitación y restauración del Patrimonio Edificado, propiedades novedosas de la cal, aplicaciones en ingeniería civil, desarrollo de morteros de cal para diversos usos, aditivos de origen natural y de síntesis para morteros de cal, nanocales y sus aplicaciones en la conservación del Patrimonio, cales en pasta, etc. Algunos de los trabajos tienen un perfil más científico, en tanto que otros, y respondiendo fielmente a los objetivos de estas Jornadas, son más divulgativos y de conocimiento general.

Todos ellos tienen como común denominador la cal como material más relevante, y son el resultado de diversos enfoques, multidisciplinares, que ayudan a enriquecer el conocimiento sobre la cal. Así, participan en las comunicaciones arquitectos, químicos, geólogos, arqueólogos, historiadores, conservadores y restauradores, ingenieros, técnicos y productores, que permiten que el texto final sea un interesante compendio, desde muy variados puntos de vista, de las características y empleo de la cal.

Prof. José Ignacio Álvarez
Organizador de las VI Jornadas FICAL

COMITÉ ORGANIZADOR / COMISSÃO ORGANIZADORA

Universidad de Navarra:

José Ignacio Álvarez Galindo

José María Fernández Álvarez

Íñigo Navarro Blasco

Adrián Durán Benito

Cristina Sanz Larrea

Rafael Sirera Bejarano

Jesús Fidel González Sánchez

Cristina Luzuriaga Catalán

Beatriz de Diego Díaz

COMITÉ CIENTÍFICO / COMISSÃO CIENTÍFICA

Adrián Durán Benito (*Departamento de Química, Universidad de Navarra*)

Ana Izaguirre Esevenri (*Centro Tecnológico L'Urederra, Navarra*)

Ana Velosa (*Universidade de Aveiro*)

Antonio Santos Silva (*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa*)

Carlos Rodríguez Navarro (*Universidad de Granada*)

David Sanz Arauz (*Universidad Politécnica de Madrid*)

Domingo Pellicer Daviña (*ETS Arquitectura, Universidad de Navarra*)

Esther Ontiveros Ortega (*Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, IAPH, Sevilla*)

Íñigo Navarro Blasco (*Departamento de Química, Universidad de Navarra*)

Javier Lanas Gonzalez (*CTH Navarra*)

Francisco Javier Alejandro Sánchez (*Universidad de Sevilla*)

Joan MestreRamis (*FICAL, Mallorca*)

Joan Ramón Rossell (*Universidad Politécnica de Cataluña*)

Judith Ramírez (*Universidad Politécnica de Cataluña*)

Luis Sánchez Granados (*Universidad de Córdoba*)

Mar Barbero Barrera (*Universidad Politécnica de Madrid*)

Paulina Faria (*Universidade NOVA de Lisboa*)

Rosario Veiga (*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa*)

Sagrario Martínez Ramírez (*Instituto de Estructura de la Materia, CSIC*)



VI Jornadas FICAL
Fórum Ibérico de la Cal

La cal en arquitectura

Cal y arquitectura tradicional gallega

María Teresa Gómez Morgade

Universidad de Vigo, España, tgomez@aboarq.com

Resumen

A lo largo de la estrecha relación que la arquitectura tradicional ha mantenido con el medio, han surgiendo una serie de tipologías constructivas resultado de los materiales disponibles en la zona y de la sabiduría constructiva de sus habitantes.

Aunque se puede decir que Galicia es una zona de rocas ricas en sílice (granitos y esquistos) las calizas ocupan un 5% de su superficie, apareciendo las mismas en la provincia de Lugo y en el NE de la de Orense.

Como consecuencia, lógica, de la existencia de la roca caliza contamos con la presencia de los hornos de cal y con el oficio tradicional de los caleros (Figura 1).

La arquitectura tradicional gallega utilizó la cal para terminar exteriormente sus muros de piedra, como consolidante de los revestimientos de tierra, para evitar la entrada de agua por sus juntas con la solución del encintado, y en zonas de la provincia de Lugo y Orense, como decoración de sus fachadas con elementos abstractos, geométricos o figuras.

En el interior de las edificaciones, la cal va ser utilizada como consolidante de los revestimientos de tierra, realizados en los muros de mampostería o sillería y en la tabiquería de entramado de madera, o para la realización de morteros para ejecutar dicha tabiquería.

Este artículo se plantea dar a conocer el uso de la cal en la arquitectura tradicional gallega, ya que se considera que el conocimiento es el primer paso para su puesta en valor.

Palabras clave: Cal; Jornadas; Patrimonio



Figura 1. Horno de cal y calero. Vilamor (Folgoso do Caurel)

La Caliza en Galicia

El sustrato geológico gallego está formado por una gran diversidad de materiales. Aunque se puede decir que predominan los granitos y esquistos, las calizas forman parte del mismo

Las rocas calizas no llegan a ocupar ni el 5% de la superficie total de Galicia, apareciendo en la mitad oriental de la provincia de Lugo y en el NE de la de Orense.

Son calizas metamórficas [1] que se disponen en forma de estrechas franjas de norte a sur (Figura 2 y 3), grises y cristalizadas, que en ocasiones presentan un alto grado de dolomitización y que adquieren un aspecto marmóreo.

Las calizas gallegas pertenecen a tres formaciones estratigráficas: la Caliza de Vegadeo, la Caliza de Cándana y la Caliza de la Aquiana. La caliza de Vegadeo, que es la de mayor extensión, aflora a lo largo de franjas estrechas en dirección NW-SE, de Mondoñedo a Monforte, pasando por Becerreá, y está formada por calizas y dolomías. La caliza de Cándana, tiene una composición principal de calcita y dolomía, de colores grises, aflora en Mondoñedo, Meira, Castroverde, Baralla, As Nogais, Oencia, Sarria, Monforte y Puertomarín.

La caliza de la Aquiana, es la que ocupa menos extensión (Monforte, Oencia y O Barco), constan de calizas marmóreas generalmente dolomitizadas y frecuentemente pigmentadas por óxidos de hierro [1].



Figura 2. Veta caliza. Folgoso do Caurel

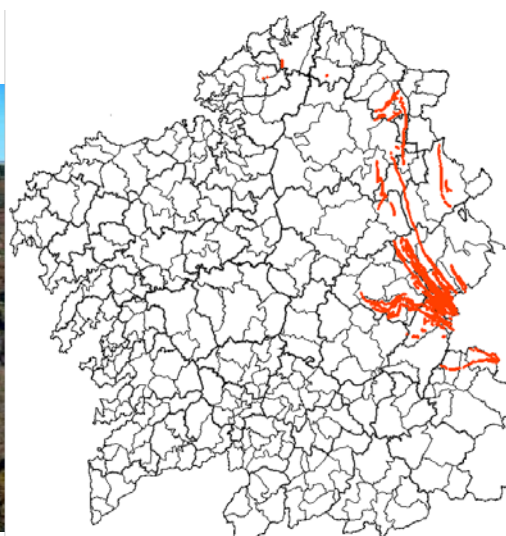


Figura 3. Afloramientos calizos en Galicia

Uso de la Cal. Aproximación histórica

Las primeras referencias bibliográficas del uso de la cal en Galicia datan del S XII, el Códice Calixtino, hace referencia a la piedra caliza que recogían los peregrinos en Triacastela y llevaban hasta los hornos de Castañeda (Arzúa) donde se hacía la cal para la catedral [2].

Aunque no se puede decir la fecha en la que se inicia el proceso artesanal de la producción de cal, en Mondoñedo ya hay constancia del oficio de calero en el S. XVI [3].

A mediados del S XVIII el Catastro del Marqués de la Ensenada hace referencia a los barcos que conducen cal a Galicia [4]. La falta caliza en el resto de Galicia y las malas comunicaciones existentes hizo que la cal se importara de otras regiones en embarcaciones, coincidiendo con el auge del intercambio de mercancías por mar.

La piedra caliza se importó de Asturias, Cantabria y Guipúzcoa en los barcos veleros a los puertos gallegos e incluso hasta el norte de Portugal. La distribución de la cal, una vez descargada en el puerto como piedra caliza, se hacía más fácil, si se calcinada la piedra, por lo que se construyeron hornos de cal en los puntos donde se efectuaba el desembarco de la piedra caliza (Vilaboa, la Guardia, Cambados,..).Una vez calcinada se transportaba en barricas para consumo local

Las fuentes bibliográficas de finales del S. XIX, el Diccionario Madoz, hacen referencias al trabajo de la cal en Galicia en dos núcleos Castroverde y Moeche, y en el Catastro del Marqués de la Ensenada comienzan a aparecer referencias claras de la producción de cal, a partir del S XIX , para abastecer a las curtidurías de Santiago y Ferrol [5] .

A partir del S. XX, en Mondoñedo, trabajan conjuntamente caleras tradicionales que cubrían las necesidades básicas, con otras que configuran un incipiente centro industrial de estilo artesanal (caleras de Masma) y el horno industrial de Sasdónigas [4]. Será a partir de este siglo, con los hornos industriales de Sasdónigas en Mondoñedo y con los de Valdeorras en O Barco, cuando Galicia se introduce en el entramado industrial de la producción de la cal.

En la década de 1950-1960, con la aparición del cemento, esta actividad comienza a disminuir progresivamente.

La producción artesanal de la cal. Hornos de cal

La arquitectura tradicional se ha caracterizado por aprovechar los recursos naturales disponibles en su entorno inmediato, por lo que un afloramiento calizo nos lleva a presuponer que los campesinos gallegos utilizaron la cal para ejecutar sus construcciones. Ligados a los afloramientos calizos nos encontramos los hornos de cal y el oficio tradicional de los caleros (Figura 4).

El horno de cal tradicional gallego, que suministraba la cal para las necesidades domésticas, adopta sencillas formas volumétricas cilíndricas en una estrecha relación con el territorio. Se sitúan normalmente solapados a las laderas de las montañas muy próximos a las canteras calizas (Figura 5).

La carga del horno se realiza por la parte alta, colocando capas alternas de leña, piedra caliza y carbón de uz, una vez lleno se le prende fuego por la abertura que presenta en su parte inferior.

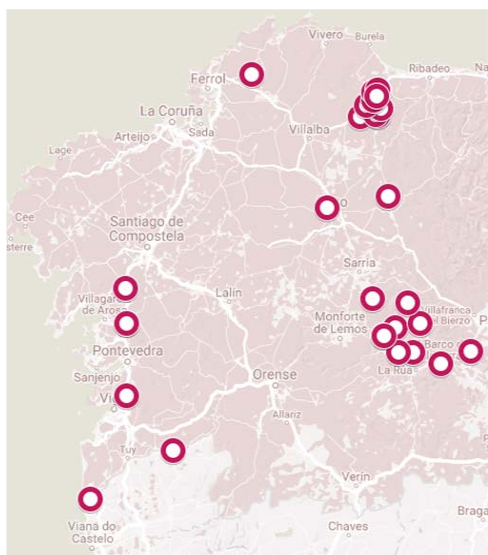


Figura 4. Localización hornos de cal



Figura 5. Horno de cal. Quiroga

En la veta caliza que atraviesa los montes del Caurel es donde se han localizado la mayor cantidad de pequeños hornos tradicionales, de propiedad privada o de uso comunal, se ponían en funcionamiento en las épocas de menos trabajo en el campo y antes de las lluvias (Figura 5).

Siguiendo los afloramientos de calizas se han localizado hornos de cal en Folgoso do Caurel (Vilamor, A seara, Vilasivil, Visiuña), Vilamartin de Valdeorras, Becerreá, Baralla, A Fonsagrada, Millares, Muiña, Quiroga (Cereixido, Paradeseca, Vilarbacú), O Incio (Goimil, A Ponte, Pedrido), Riotorto, etc (Figura 4).

En los afloramientos calizos de Mondoñedo, en el lugar denominado *O Chao das Caleiras* (Masma), se desarrolló un importante centro de producción de cal en Galicia. En esta zona, donde los afloramientos superficiales de materiales calcáreos ocupan extensas áreas, llegaron a estar en funcionamiento más de 20 hornos de cal.

Estos hornos, contruidos en piedra, tenían sección troncocónica y con un único acceso en la parte baja, aunque se utilizaba también la parte alta del horno para introducir el material y para retirarlo. Para mantener la temperatura, estas construcciones se encontraban enterradas casi en su totalidad, quedando al descubierto una pequeña parte, orientada al oeste, por donde se accede a la parte baja para cargar el horno y prender el fuego [6], (Figuras 6, 7).

En Mondoñedo se conservan hornos de cal en Masma, Pedrido, Santa María a Maior, Couboeira, Areas, Guillade y Sasdónigas.

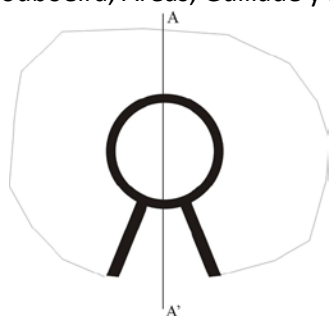


Figura 6. Horno de cal. Mondoñedo



Figura 7. Horno de cal. Mondoñedo

La mayor demanda de cal a finales en el s XIX, provoca el desarrollo de la actividad de la cal y hace que los hornos ganen en importancia.

En la Sierra da Enciñeira da Lastra se encuentran los afloramientos calizos del NE de la provincia de Orense. En el Lugar de Covas, ayuntamiento de Rubia, en una zona de impresionantes paredes calcáreas, se localiza un horno de cal de forma piramidal de grandes muros de piedra (Figura 8).

Esta dinamización del mercado hace que se optimice la estructura y el proceso de producción de cal evoluciona hacia los hornos continuos de mayor productividad, ejemplos de ellos son los hornos de Sásdonigas (Figura 9), construidos a comienzos de los años 50 sobre el antiguo horno tradicional e inspirado en los hornos que ya estaban funcionando en el Barco de Valdeorras .



Figura 8. Horno de cal. Rubia



Figura 9. Hornos de cal de Sadónigas

Con el desarrollo del intercambio de las mercancías por mar la piedra caliza llegó al litoral gallego, lejos de los afloramientos calizos. Su distribución se hacía más fácil una vez calcinada la piedra, por lo que se construyeron hornos de cal en los lugares autorizados por el Estado para su carga y descarga, en los puertos (horno de cal de la Guardia, Cambados y Ponte Cesures) o en pequeños embarcaderos construidos para horno de cal (horno de cal de Vilaboa).

Uso de la cal en la arquitectura tradicional

Como se ha dicho, Galicia es una región en la que predominan granitos y esquistos. El granito de calidad se encuentra en la Galicia Atlántica y al sur de la comunidad gallega, en el centro y noroeste gallegos abundan los granitos y esquistos, y en las zonas de transición, aparece el gneis, dando lugar a unos muros de peor calidad. Existen además áreas geológicas en el territorio donde abundan los depósitos sedimentarios de origen terciario y cuaternario, las grandes depresiones de Lugo y Orense, y pequeñas áreas de Pontevedra y A Coruña, donde la construcción con tierra supone una forma más de adaptación al medio utilizando los materiales disponibles y más económicos.

En este contexto geológico nos encontramos con una arquitectura tradicional formada por muros de piedra de granito, esquisto y gneis [7], realizados con las técnicas de la sillería y

mampostería, muros de tierra apisonada y por entramados estructurales de madera. La tierra se utiliza como mortero de unión o como recubrimiento de esos muros, tanto por el interior como por el exterior. En las zonas con afloramientos calizos se introducen también los revestimientos de cal.

La cal va a ser utilizada en toda la arquitectura tradicional gallega, ya sea como protección frente al agua de los muros exteriores, sobre los revestimientos de tierra o directamente sobre la piedra, como consolidante de los revestimientos de tierra, y en las zonas con afloramientos de calizas como morteros de revestimiento, como mortero de encintado, o como morteros en la ejecución de tabiques y muros de cerramiento realizados con entramado de madera.

Además de utilizarse en la ejecución de morteros y revestimientos, en determinadas zonas del centro de Galicia, se decoró tradicionalmente la arquitectura tradicional con cal, adoptando a veces los muros trazados llamativos, de fuerte carga figurativa.

Encalados y enlucidos

En las zonas donde predomina el granito de buena calidad, el aparejo normalmente se mantiene visto sin ningún tratamiento, en zonas costeras, muchas veces, las fachadas de sillería o mampostería concertada de grandes dimensiones, aparecen cubiertas por una simple mano de cal para protegerlos frente a la entrada del agua [8], (Figuras 10, 11).



Figura 10. Sillería encalada (Vigo)



Figura 11. Sillería encalada (Pontevedra)

En las zonas donde los muros se realizan con pequeñas piedras irregulares de granito o esquisto, las fachadas aparecen cubiertas por un revoco de barro encalado para la protección frente a la entrada de agua por la enorme cantidad de juntas del aparejo [9], (Figura 12).

En ciertas zonas del litoral de Galicia este revestimiento de tierra encalado recubría todo el paramento de las paredes más expuestas, y en algún caso se añadían pigmentos a la cal, para oscurecer una franja de unos 80 cm para proteger contra la suciedad y el polvo [8].

Por el interior los muros se revisten, para dar uniformidad a los paramentos, con revocos de barro encalado o con enlucidos de cal (Figura 13).



Figura 12. Revoco exterior, barro encalado (Goimil)

Figura 13. Revoco interior barro encalado (Santiso)

Revocos

En las zonas con afloramientos calizos y con hornos de cal, la arquitectura tradicional gallega utilizó los revocos de cal para la protección de los muros de mampostería (Figuras 14, 15). Con el mismo fin, las caras expuestas de los muros de tapia de Monforte de Lemos se recubrieron con morteros de cal y barro (Figura 16).

Según testimonios orales, la mezcla de los morteros para el revoco se hacía en la proporción de una parte de cal por tres de arena. La cal salida del horno se mezclaba con la arena, la masa resultante se amontonaba y se dejaba reposar protegida, de 10 a 12 días, y se volvía a amasar cuando esta fuese a ser utilizada.



Figura 14. Folgoso do Caurel



Figura 15. Folgoso do Caurel



Figura 16. Monforte

Decoraciones murales

Este tipo de decoraciones de las fachadas no es un hecho aislado, se trata de una manifestación cultural que abarca un amplio territorio de España y Portugal.

En los siglos XIX y XX, influenciados por las decoraciones que se están realizando en la arquitectura culta y más pudiente [10], en las zonas rurales de Zamora (Figura 17), Salamanca, Cáceres y Portugal (Braganca, Évora), las gentes más humildes de estos pueblos imitaron esas decoraciones en las fachadas de sus casas [11], encargando a los albañiles locales su ejecución o realizándolas incluso ellos mismos (Figura 18).



Figura 17. Zamora



Figura 18. Doade(Galicia)



Figura 19. Caminos de Santiago

Las principales vías de comunicación de Galicia con la Meseta, Extremadura y Portugal coinciden con las rutas de peregrinación a Santiago de Compostela. En torno a estas vías, encontramos una manifestación artística popular que se está desarrollando desde mediados del S XIX en Extremadura, Castilla y Portugal. Será en torno al Camino de Peregrinación de Invierno donde esta manifestación artística popular se encuentra más desarrollada. A finales del siglo XX todavía se conservan más de un millar de edificaciones decoradas con cal en la Ribeira Sacra (Figura 19), [12].

Los tipos de decoración utilizados son los grafitos incisos, los encintados y los esgrafiados. El grafito inciso se realiza con trazados mediante el rayado del revoco. Los encintados rellenan y marcan las juntas resaltándolas hacia el exterior.

Si el aparejo que forma el muro, mampostería o sillería, no deja demasiadas juntas por donde entrar el agua, se rellenan las juntas de las fábricas con el fin de lograr la estanqueidad de los paramentos exteriores (Figura 20). El material del relleno de las juntas, puede ser un mortero realizado con arena, cal y barro, que posteriormente se blanqueaba con cal diluida en agua, o un mortero de tierra acabado con cal [13].

Para encintar se rellenan primero las juntas con barro arcilloso apretándolo bien a paño con la pared. Con el barro fresco se realizan unas franjas con brocha mojada en agua de cal, luego con una paleta puesta de canto se va regularizando la cinta, raspando en los sitios en los que sobra y dándole el perfil deseado [14].

En los esgrafiados la composición de la decoración de las fachadas la marcan las fajas perimetrales de la fachada y los vanos, realizadas con trazos rectos enmarcan el espacio decorado. El relleno interior se realiza con formas geométricas, imitando bloques de piedra, o con trazos curvos a mano alzada, con formas derivadas de la gota (Figura 21).

La ejecución de los esgrafiados se realiza con la aplicación de una segunda capa de revoco, trazando los dibujos sobre el revoco y retirando mediante raspado la capa superficial antes de que endurezca, quedando al descubierto la capa inferior [12]. La capa superior se pinta con cal quedando de diferente color y textura que la capa inferior (Figuras 21, 22, 23, 24).

Las decoraciones se realizan con elementos abstractos, geométricos, figuras humanas o animales, y pueden estar pintadas en la totalidad de las fachadas, en una sola o en partes, y a veces solo enmarcando los vanos [11]. En ocasiones la decoración consiste únicamente en el enmarcado de vanos, paños o líneas de imposta de separación (Figura 25).



Figura 20. Agolada



Figura 21. Anllo (Sober)



Figura 22. Anllo (Sober)



Figura 23. Monterroso



Figura 24. Taboada



Figura 25. Montefurado (Quiroga)

Muros y tabiques de entramado de madera

La arquitectura tradicional utilizó soluciones constructivas de entramado de madera relleno de diferentes materiales (paja, ladrillo, tablas) en muros de cerramiento de plantas altas (Figura 28), corredores y en divisiones interiores.

Una técnica muy utilizada fue el “pallabarro” [9], sistema de origen medieval [14], formado por un entramado de madera vertical que se unían entre si por maderas más delgadas. Los espacios que dejaban se rellenaban con un trenzado de paja amasada con barro [15], se cubría el conjunto con un revoco de cal y finalmente se blanqueaba con cal (Figuras 26, 27).

El “Pallabarro” fue posteriormente mejorado con barrotos de madera colocados por las dos caras de los pies derechos y con relleno interior de paja de colmo, virutas de madera [15] o tablas, el conjunto al igual que el anterior, se cubría con mortero de tierra encalado (Figura 29), enlucido de cal o con mortero de cal (Figura 30).

El tabique trenzado o encestado (Figura 31) posiblemente sea el más primitivo, al ser la técnica utilizada en la construcción de las cabañas de los castros [16]. Se ejecutaba con pies derechos de suelo a techo sobre los que se van trenzando ramas de sauce. El entramado bien tejido se cubre con barro hasta conseguir una superficie uniforme y finalmente se encala. Se encontraron ejemplos en a Terra Chá, en Castro Caldelas, Lalín, Sober y en Agolada.



Figura 26. Mondoñedo



Figura 27. Mondoñedo



Figura 28. A Torre (Pantón)



Figura 29. Agolada



Figura 30. Cernego



Figura 31. Sober

Conclusiones

La arquitectura tradicional está sufriendo una constante transformación, las construcciones son despojadas de sus revestimientos originales para ser sustituidos por otros actuales, lo que está produciendo incompatibilidad material, lesiones; pero lo más importante es que se está perdiendo la coherencia histórica al modificarse su aspecto exterior y no respetarse su carácter original, adquiriendo una Figura de recién construidos que los aleja de su esencia: ser tradicionales.

La importancia de esta situación hace necesario conseguir que los profesionales involucrados en la intervención y rehabilitación de la arquitectura tradicional sean conscientes de la presencia de estos materiales tradicionales y de sus técnicas constructivas, ya que solamente siendo conscientes de ello se podrá conseguir la sensibilización necesaria para su conservación y puesta en valor.

No se pretende dar un testimonio de las técnicas y oficios tradicionales sino un modelo del que aprender y seguir evolucionando hacia una perspectiva más sostenible

Bibliografía

- [1] Taboada Castro, M.T., Silva Hermo, B.M. Coruña 1999. *Factores de formación de los suelos formados sobre calizas en Galicia*. Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Vol. 24, pp. 2-5
- [2] Sáez Ridruejo, C.; Sanz Pérez, E.; Abril Hurtado, J.. Santiago, 1999. *Patrimonio Geológico del Camino de Santiago*. Instituto Tecnológico Geominero de España, pp. 137.
- [3] Cal Pardo, Enrique. *Archivo Catedralicio*, S. XVI, pp. 424.
- [4] Fernández Negral, Justino. La Coruña 2009. *Estudio del proceso de calcinación y uso de la cal en los procesos sidero-metalúrgicos y en la construcción*. Tesis doctoral, pp. 293-322.
- [5] Madoz, P. *Diccionario Geográfico Estadístico, Histórico de España y sus Posesiones de Ultramar*. 1806-1870
- [6] Vigo Garcia, Abel. *A Calcinación tradicional da caliza. Caleiras de Masma (Mondoñedo)*, 2003.
- [7] Caamaño Suárez, Manuel. 2006. *Galicia, As Construcións da Arquitectura Popular. Hércules de ediciones*, pp.105-108, 117-118.
- [8] De Llano, Pedro. 1983. *Arquitectura Popular en Galicia.*, Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia, pp. 41,57,93,95.
- [9] De Llano, Pedro. 2006. *Arquitectura Popular en Galicia, Razón e construcción*. Xerais. pp. 79,90,92.
- [10] Vega Ballesteros, F.; Aguirre Sierra. 2014. *El Esgrafiado en la Comarca de la Carballeda*. Diputación de Zamora, pp. 23,24

[11] Lizancos Mora, Placido.1992. *Debuxo e Ornamentación na Arquitectura do Sur da Provincia de Lugo*.

[12] Vázquez Rodríguez, X. Manuel. 2017. *Esgrafiados na Ribeira Sacra. De tradición cultural a recurso turístico*. Consorcio de Turismo da Ribeira Sacra, pp 32, 42, 53, 94124, 129.

[13] Vega Pato, Tomás. 2007. *Arquitectura Popular Ourense*. Deputación Provincial de Ourense, pp. 95-112.

[14] Otero Pedrayo, Ramón. 1979. *Historia de Galiza*. Volumen II, Akal Editor, pp. 9-19.

[15] López Cuevillas, Florentino, Fernandez Hermida, Florentino, Lorenzo Fernandez, Xoaquin. *Parroquia de Velle*. Seminario de Estudos Galegos. pp. 79

[16] López Cuevillas, Florentino, Fernandez Hermida, Florentino, Lorenzo Fernandez, Xoaquin. *Las Habitaciones de los Castros*. Seminario de Estudos Galegos. pp. 8-16

La cal en el patio tradicional canario

J. Carmelo Arjona Montesdeoca

Grupo de Investigación Arquitectura y Paisaje. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

España

jcarn06@gmail.com

Resumen

Con el desarrollo de este tema, se pretende poner en valor aspectos relacionados con esta singular estancia de la arquitectura tradicional, ubicada tanto en viviendas, como en edificios públicos. Dotando a estas edificaciones de un carácter especial e incorporando características sociales y ornamentales muy características de Las Islas Canarias, como son los materiales que se han consolidado como propios: madera, piedra y la cal; siendo éste último, el objeto principal de estas jornadas.

Para el correcto desarrollo de la investigación, se ha llevado a cabo un proceso de estudio de distintas edificaciones que forman parte del patrimonio arquitectónico insular, para captar las peculiaridades de cada una, convirtiendo el trabajo de campo en una herramienta fundamental. Todo ello, acompañado de una ardua búsqueda de información, que no fue tarea fácil, ya que no es muy amplia la documentación al respecto.

El patio, juega un papel fundamental desde el punto de vista funcional, pero también lo es, desde otros aspectos como los constructivos y los relacionados con la habitabilidad. En lo que se refiere a los aspectos constructivos, donde la cal tiene una participación significativa, y en algunos casos, definitoria de la arquitectura de cada lugar.

Cuando hablamos de la cal en la arquitectura tradicional, debemos atender a su uso en los procesos originales de las edificaciones, pero además, en las actuaciones de rehabilitación y restauración; confiriéndole características de sostenibilidad.

Palabras clave: Cal; Jornadas; Revestimiento; Rehabilitación; Patrimonio; Sostenibilidad.

Introducción

El patio, es un elemento característico de la arquitectura tradicional de las Islas Canarias, por lo tanto, se puede afirmar que es un espacio generalizado y definidor de la edificación urbana y rural del archipiélago [Martín Rodríguez, F.G.,1978]. Ocupa la zona central de la edificación, que mayoritariamente son viviendas; pero también es reseñable su presencia en edificios públicos, compartiendo multitud de aspectos constructivos y formales, con la arquitectura doméstica.

Es un elemento, que adquiere a lo largo de su evolución características ornamentales y materiales muy propias. La estructura de este espacio, tiene su origen en la casa mediterránea, cruzando sucesivos períodos históricos y culturales. La idea de incorporar el jardín a la casa o

habitación humana, ya sea templo, lugar público o espacio residencial, puede datarse desde las más remotas culturas. Por lo que su implantación en el archipiélago, está alimentada por todo ese discurrir de la cultura mediterránea, que tras su implantación en Castilla, es traído a las islas en el momento de la conquista [Arjona Montesdeoca, J.C., 2015].

En cuanto a los materiales que definen y conforman el patio, destacan sobremanera en el archipiélago la madera y la piedra, siendo en ocasiones denominada la arquitectura tradicional canaria como: *“la arquitectura de la madera”*, por la abundancia de esta materia prima, principalmente en las isla occidentales [Quintana Andrés, P.C., 2008]. La piedra también tiene una notable presencia, tanto en elementos estructurales como ornamentales, y además, aparece en componentes del patio, como las fuentes. Y menos abundante, debido a la escasez y alto coste [Alemany Orella, L. y et al., 1977], es la presencia de la cal en la arquitectura tradicional canaria, pero ello no es óbice para que sea un material a incluir en las construcciones vernáculas, ya que forma parte de ésta por sus distintas cualidades constructivas.



Figura 1: Imagen de un patio tradicional canario. Fuente: Elaboración propia.

El patio

Es un espacio que dota a la arquitectura tradicional de identidad propia, y que su razón de ser derivada de las respuestas bioclimáticas, ya que provee a la construcción de cierto grado de confort, en respuesta a las demandas de uso y habitabilidad. Además, tiene connotaciones sociales, lo que le añade un valor que trasciende del arquitectónico. Entre las distintas descripciones, podemos destacar: *“El patio es un espacio constante en la vivienda canaria,*

constituyendo el núcleo en torno al cual, se distribuyen las dependencias bajas y altas, el catalizador de todas las actividades de la casa. Su instalación y su repercusión en las siete islas, se vio favorecida no sólo por factores culturales, sino también climáticos –la aclimatación del patio ayudada por un medio propicio, parecido al de las zonas europeas por donde se extienden los patios-. Al mismo tiempo que proporcionar luz y aire, produce un alejamiento del exterior que redundaba en beneficio de lograr una mayor intimidad para los habitantes, erigiéndose en el eje vital de la casa. Como forma de separación de dominios, su presencia, como señala Rapoport, se relaciona con la existencia de una sociedad jerárquica. Además, cuando en el patio hay agua, plantas y sombras, éstos actúan como elementos variantes del microclima, al disminuir la radiación y la temperatura, y su presencia es un intento de encerrar en la casa urbana un poco de naturaleza en su estado más puro”. [Martín Rodríguez, F.G.,1978].

Acabados del patio

Los muros de cerramiento que conforman el patio, generalmente son de piedra y barro, pero también nos podemos encontrar con soluciones de mampostería realizada en seco, siendo comúnmente denominada “*piedra seca*” [Pérez Vidal, J., 1967], que suele ser consecuencia de escasos recursos económicos, por lo que es más habitual en las zonas rurales. La piedra labrada no suele ser muy usual, ya que se reserva para elementos decorativos en fachada, marcos de puertas y ventanas, y para las esquinas de la vivienda, donde por lo general se deja vista [González Carrillo, W., 2003]. Para recibir los mampuestos que formaban los muros, se empleaba el barro, y cuando la economía lo permitía, se utilizaba mortero de cal [León Espinosa, R.E., sin fecha].

La fachada exterior de la vivienda muchas veces se dejaba sin revestir, empleándose los recursos disponibles en los acabados de las estancias interiores de la vivienda, o en aquellas dependencias de mucho uso [Alemán de Armas, A., 1988], como es el caso del patio, que se enlucían con mortero de cal, arena y tierra.

La cal

Se trata de un material conglomerante, que mejora las prestaciones de morteros de agarre y acabados [Rodríguez García, M. R., et al, 2014], cuya utilización data desde la antigüedad hasta mediados del siglo XX, y su empleo, comprendía construcciones tanto arquitectónicas, como civiles [Mireles Betancor, F., 1996]. También fue usado como material para elementos decorativos [Brüemmer, M., 2003]. Pero con la aparición del cemento Portland, a mediados del siglo XX, cae en desuso por las facilidades que ofrecía éste [Mireles Betancor, F., sin fecha], lo que tiene como consecuencia, la renuncia a las propiedades que ofrecía la cal en favor de las edificaciones y de sus moradores.

Entre los distintos usos de los que se ha tenido constancia en Canarias, se pueden destacar: las obras hidráulicas (estanques, acequias o cantoneras) [García, C., 1993], la potabilización del agua de consumo [Manzano Cabrera, J.L. y Mireles Betancor, F.M., 2017] y el blanqueo del azúcar obtenida en ingenios azucareros [Lobo, M., 2004]. Y debido a su poder cáustico, también se empleaba como desinfectante [Medina, E., 2003].

En cuanto al uso de la cal en la arquitectura, podemos mencionar su aplicación para la impermeabilización de cubiertas [Martín Rodríguez, F.G.,1978], en pintura para el albeo de la vivienda, en tejas y piezas de decoración [Brüemmer, M., 2003]. Pero, principalmente destaca su aplicación como mortero para revestimientos exteriores, a base de cal hidráulica natural, buscando refractar la luz [Martín Rodríguez, F.G.,1978], que incide tanto en los muros de fachada, como de los patios, con ello se consigue controlar la incidencia solar (junto con otros elementos que forman parte de la arquitectura tradicional, como son los corredores, balcones, aleros, etc.), funcionando como aislamiento térmico; y como acabado de interiores a base de estuco, que aumentaba la proyección de la luz desde la entrada hacia las zonas más oscuras del fondo de la estancia [Quintana Andrés, P.C., 2015], resultando un espacio más diáfano. También, se encuentra en los morteros de asiento de los sillares y de anclaje de la madera en las paredes [Alemán de Armas, A., 1988].

Acabado de los muros

Al predominar la mampostería en la fachadas, se trataba de disimular su pobreza con continuos enjalbegados, que no siempre conseguían corregir las imperfecciones de los muros [Martín Rodríguez, F.G.,1978]. Los muros de piedra mampuesta, se recibían con mortero de barro y arena [Alemán de Armas, A., 1988], reservando la cal para revestir total o parcialmente la fachada [Quintana Andrés, P.C., 2015].



Figura 2: Imagen de un patio tradicional canario. Fuente: Elaboración propia.

Pero en la arquitectura vernácula canaria, nos encontramos casos en los que solo se encala la junta entre las piedras que forman el cerramiento y éstas quedan al descubierto [Martín

Rodríguez, F.G.,1978], dejando a la vista en las fachadas exteriores o las situadas en los patios, lo que algunos autores definen como “*almendrado o dálmata*”. y que ha derivado en denominarse “*típico canario*”. Esta solución nada tiene que ver con un estilo o solución de la arquitectura típica canaria, ya que, se debe a que originalmente las juntas entre piedras se llenaban con ripios, los cuales corrían el peligro de desprenderse al realizarse en seco, y por tanto, poder desestabilizar el muro. Para solventar este problema, se empleaba la cal para recibir esas pequeñas piedras al muro y rematar las juntas entre las piedras mayores o mampuestos, cuyo resultado final presentaba esa apariencia, en la que sobresalían las juntas. Este era el primer paso que realizaban los propietarios para estabilizar el muro, pero en cuanto su economía se lo permitía, realizaban el encalado o enjalbegado de los muros en su totalidad, que además de mejorar la construcción, lo hacía en favor de sus moradores, al mostrar una mejor imagen de sus casas [González Carrillo, W., 2003].

Rehabilitación de muros

En los procesos de rehabilitación de construcciones vernáculas, que se están realizando actualmente, hay ocasiones en las que se opta por dejar la piedra vista, renunciando al encalado o enfoscado que reviste el muro. Dicha solución, se justifica aludiendo a la construcción tradicional, lo cual, no está del todo fundamentado por lo comentado en el párrafo anterior. También se argumentan motivos estéticos, aspecto éste, que se aleja en cierta medida del hilo argumental que nos ocupa, por lo que no se profundizará en él, sin menoscabo de su importancia.

Al dejar las piedras vistas, se expone la mampostería a la inclemencia de agentes atmosféricos, y por tanto, a quedar debilitadas. Es por ello, que se hace necesario su revestimiento con mortero. El revoco que protege estos materiales naturales, tradicionalmente está compuesto por mezcla de cal con arena y agua, que al endurecer tiene la propiedad de quedarse adherido al soporte y con el paso del tiempo, mejora sus prestaciones de impermeabilidad y dureza.

Cuando hay que actuar en edificios antiguos de fábrica o mampostería tomada con mortero de cal, cuyas fachadas “modernamente” han sido revocadas con mortero de cemento, en sustitución del mortero original de cal, o bien han sido pintadas con pinturas plásticas por encima del revoco, hay que volver a dejar la pared desnuda, eliminar ese revoco y volver a proteger el paramento con mortero de cal [Baquer Sistach, J., 2016].

Lo que nos presenta un importante reto: afrontar adecuadamente las obras de rehabilitación, restauración y conservación del patrimonio. Para lo que será imprescindible entender las soluciones constructivas tradicionales, que siendo válidas en la actualidad, hay que saber interpretar, para establecer las soluciones de manera correcta y coherente, en combinación con los sistemas constructivos y materiales actuales. Así pues, vistamos completamente las fachadas. Desterremos de una vez, esa falsedad arquitectónica [González Carrillo, W., 2003].

Revestimiento de los patios

Para dar respuesta a los trabajos de revestimiento de los patios, es decir, al blanqueo o enjalbegado de los muros [Rodríguez Molina, A. y de Armas Morales, I., 1995], se plantean dos

posibilidades desde las labores de mantenimiento y rehabilitación, como son el empleo de morteros a base de cal o a base de cemento; producto de la disyuntiva entre conservación y sustitución.

Como estamos hablando de arquitectura vernácula, es claro, que un material como la cal es más coherente para dicha solución, ya que forma parte de la construcción tradicional, pero además, debemos aprovechar las cualidades que por su propia naturaleza aporta a las construcciones.

Para acondicionar esta estancia a las demandas actuales, fruto de la obsolescencia de los usos tradicionales, al haberse alterado radicalmente los programas domésticos; se está procediendo al cambio de uso del patio, pasando de ser el eje central de la vivienda tradicional, para transformarlo en un espacio complementario de los nuevos usos: salas de exposiciones, sala de conferencias, comedor de restaurantes, etc. En ese proceso de acondicionamiento, hay que afrontar el acabado y revestimiento de los muros, ya que se han tenido que alojar nuevas instalaciones o se han modificado, al abrirse nuevos huecos o cerrarse los existentes. Es aquí, donde se deben aprovechar las bondades de los morteros de cal, ya que a diferencia de tiempos pretéritos, hoy es más factible su uso en intervenciones arquitectónicas, tanto patrimoniales como de obra nueva.

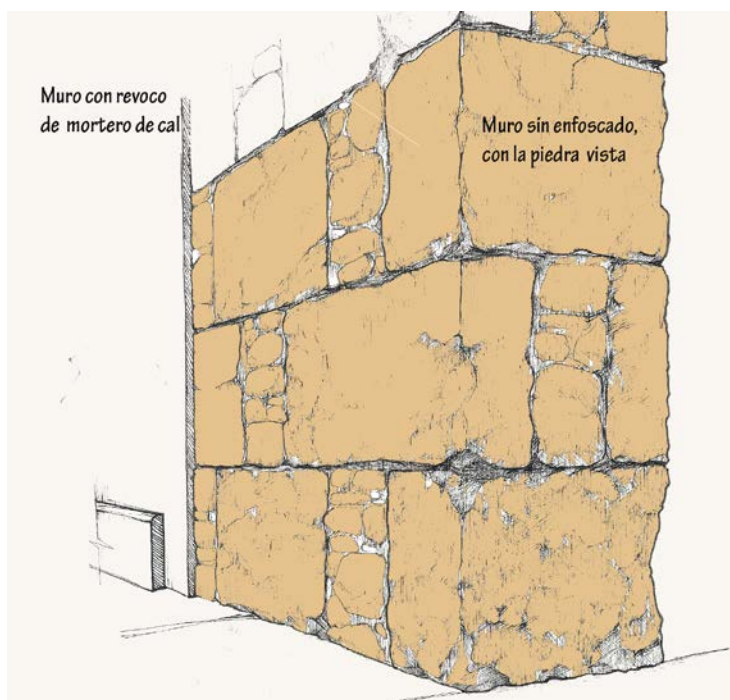


Figura 3: Muro con mortero de cal y erosionado por su falta . Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Entendiendo la arquitectura tradicional canaria como sostenible, al aprovechar las materias primas de la que dispone en su entorno para realizar sus construcciones. Se debe atender a esta premisa, y utilizar dichos materiales a la hora de realizar obras de rehabilitación. Lo cual, también implicará la recuperación de las profesiones artesanales, tan necesarias para la conservación del patrimonio.

Por tanto, el uso de morteros de cal, se convierte en una solución óptima para revestir los muros de los patios tradicionales, ya sea enjalbegar, enlucir o revocar, cuyas propiedades redundan en su protección y mantenimiento. Huyendo de la opción de dejar el muro sin revestir, o de hacerlo con otros materiales o acabados, que además de poder ser incompatibles, son poco afines a la arquitectura vernácula.

Agradecimientos

A Jose Charro Martínez, por su colaboración y aportaciones en distintos momentos de la elaboración de éste y otros trabajos.

Bibliografía

Libro:

Alemán de Armas, A. (1988). *Título: La vivienda tradicional canaria*. Santa Cruz de Tenerife: Interinsular Canaria.

Alemaný Orella, L, M. y Et. Al. (1977). *Título: La Arquitectura Popular en el Archipiélago Canario*. Madrid. Aguiar. Tomo 5º

González Carrillo, N. W. (1996). *Título: La arquitectura en Canarias*. Santa Cruz de Tenerife. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Santa Cruz de Tenerife.

Lobo, M. (2004). *Título: Los comienzos de la industria de la cal en canarias. En homenaje a Francisco Navarro Artilés*. Madrid. Academia Canaria de la Lengua.

Martín Rodríguez, F. G. (1978). *Título: Arquitectura doméstica canaria*. Santa Cruz de Tenerife. Aula de cultura de Tenerife.

Revistas:

Brüemmer, M. (2003). *Título: La cal. Pequeña guía de la cal en la construcción*. Rincones del Atlántico nº1, páginas 112-115.

Fernández Rodríguez, J. J. (2008). *Título: Detrás del muro: razón de ser y valoración de la arquitectura tradicional*. Catharum nº9, páginas 5-16.

Medina, E. (2003). *Título: El trabajo tradicional de la piel en la isla de Gran Canaria*. Revista Tenique nº5, páginas 291-306.

Mireles Betancor, F. M. (1996). *Título: En torno a la cal*. Guía Histórico Cultural de Telde, nº8, páginas 433-44.

Pérez Vidal, J. (1967). *Título: La vivienda canaria. Datos para su estudio*. Madrid-Las Palmas. Anuario de Estudios Atlánticos nº13.

Quinta Andrés, P.C. (2008). *Título: El hábitat y la vivienda rural en Canarias: las transformaciones históricas de un espacio social*. Rincones del Atlántico nº 5, páginas 10-79.

Quinta Andrés, P.C. (2015). *Título: El hábitat rural en Gran Canaria: una breve aproximación histórica*. Rincones del Atlántico nº 9, páginas 8-175.

Rodríguez García, M.R., et al (2014). *Título: La cal de Morón en la arquitectura tradicional andaluza*. Patrimonio cultural de España nº8, páginas 213-227.

Rodríguez Molina, A. y de Armas Morales, I. (1995). *Título: La Cal en Fuerteventura*. Aguayro nº211, página 10.

Tesis doctorales:

Arjona Montesdeoca, J. Carmelo (2015). *Título: El patio, un espacio abierto al cambio. Intervenciones en los patios de Vegueta y Triana: Adaptabilidad y nuevos usos*. Las Palmas de Gran Canaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Dpto. de Construcción arquitectónica.

Información online:

Baquer Sistach, J. (2016). *Título: Rehabilitación de edificios de muros de piedra*. <http://aceweb.cat/es/noticias/rehabilitacion-de-edificios-de-muros-de-piedra-anotaciones-de-josep-baquer-sistach/>

Flores, C. (2008). *Dirección: <http://www.rinconesdelatlantico.es/num5/index.php>*.

León Espinosa, R.E. (sin fecha). *Título: La arquitectura tradicional y Canarias*. *Dirección: http://atlasruraldegrancanaria.com/articulos_int.php?n=362*.

Mireles Betancor, F. M. *Título: Incidencias de la cal en el paisaje tradicional de gran canaria*. *Dirección: <http://docplayer.es/21003574-Incidencias-de-la-cal-en-el-paisaje-tradicional-de-gran-canaria.html>*

Otros:

García, C. (1993), *Título: La cal vuelve a estar viva*. Canarias 7, página 32.

Revestimentos com base em cal em monumentos de interesse histórico e patrimonial: Exemplos do repositório DB-HERITAGE

António Santos Silva⁽¹⁾, Maria do Rosário Veiga⁽²⁾, Maria João Correia⁽³⁾, João Lains do Amaral⁽⁴⁾

(1) *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, ssilva@lnec.pt*

(2) *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, rveiga@lnec.pt*

(3) *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, mjmcorreia@lnec.pt*

(4) *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, jpamaral@lnec.pt*

Resumo

É reconhecido que as intervenções de conservação e restauro em edifícios e monumentos antigos devem respeitar os materiais originais, implicando por isso o conhecimento das características dos materiais, originais e de reparação, bem como os seus desempenhos nas condições de uso.

O registo e preservação de informação sobre o desempenho de diferentes tipos de materiais de construção é útil em termos do valor histórico dos materiais, mas também para a inovação e desenvolvimento na área da preservação do património construído. Partindo dum largo arquivo de informação já existente e em constante desenvolvimento, mas disperso por várias entidades, sobre a caracterização física, química e mecânica de materiais, projetou-se o projeto DB-HERITAGE (Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial) com o objetivo de construir um repositório de materiais históricos. O repositório inclui a compilação física de amostras de referência e uma aplicação para registo sistematizado de dados relativos à história, propriedades e desempenho dos materiais. Pretende-se assim criar uma plataforma de investigação sobre o desempenho passado e futuro de materiais de construção históricos. A cal e as argamassas de cal são um dos materiais históricos incluídos, com grande quantidade de informação já recolhida.

Neste artigo apresentam-se alguns dos meios criados pelo projeto DB-HERITAGE ilustrando o seu potencial de partilha e divulgação de informação com alguns exemplos de dados relativos à composição, estado de conservação e desempenho de revestimentos com base em cal em monumentos de interesse histórico e patrimonial.

Palavras-chave: Materiais; Cal; Desempenho; Património histórico e arquitetónico; Ferramentas TIC.

Introdução

O estudo de revestimentos à base de cal de monumentos ou edifícios históricos antigos, através da caracterização das suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, mineralógicas e microestruturais, dá a conhecer o tipo de ligante e a sua proporção, o tipo, forma e distribuição granulométrica dos agregados, o uso de adições ou de aditivos e o estado de conservação nas

condições de uso, ou seja, permite descodificar a sua composição, mas também o seu comportamento na estrutura [Santos Silva, 2002; Veiga et al., 2013].

É consensual que as intervenções de conservação e restauro em revestimentos de edifícios e monumentos antigos devem respeitar os materiais originais, implicando por isso o conhecimento das características e funções dos materiais existentes, bem como o seu desempenho nas condições de uso [Veiga et al., 2001]. Por isso, na formulação de argamassas de reparação, para além das características das argamassas antigas, devem ser tidos em conta os materiais adequados disponíveis, a própria estrutura e o ambiente de exposição [Riccardi, 2007; Veiga, 2012]. Essas preocupações, essencialmente relacionadas com a compatibilidade entre materiais, permitirá manter a estrutura antiga sem lhe causar efeitos colaterais nocivos.

No entanto, para que este processo tenha sucesso é fundamental que se proceda ao registo e preservação da informação acerca das características dos materiais antigos, mas também dos que são usados nas intervenções de conservação e restauro.

Este foi, portanto, o enquadramento para a criação dum projeto de investigação que reunisse a informação já existente, ou que estivesse em estudo e dispersa por várias entidades, sobre a caracterização física, mecânica, química, mineralógica e microestrutural de materiais de construção históricos. O projeto tem como acrónimo a designação DB-HERITAGE, e intitula-se *Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial*, e tem como principais objetivos a construção de um repositório de materiais históricos de monumentos e edifícios históricos em Portugal que sejam considerados de referência em termos do tipo de material ou técnica de construção, e ainda uma ferramenta informática para o registo sistematizado dos dados relativos à história, propriedades e desempenho desses materiais. Pretende-se assim criar uma plataforma de investigação sobre o desempenho passado e futuro de materiais de construção em edifícios e monumentos históricos e disponibilizar essa informação a toda a comunidade científica e técnica. A cal e as argamassas de cal são um dos materiais históricos incluídos, com grande quantidade de informação já recolhida.

Neste artigo apresentam-se alguns dos meios criados pelo projeto DB-HERITAGE, nomeadamente da Base de Dados (BD), com alguns exemplos de revestimentos de cal de monumentos de interesse histórico e patrimonial portugueses já incluídos.

Base de dados de materiais de construção – características gerais

A BD (Figura 1) permite ao utilizador a seleção da visualização de dados por tipo de material (ex: argamassa, pedra, madeira, tijolo, bronze, etc.), tipo de estrutura (ex. igreja, forte, palácio, edifício, etc.) ou ainda pelo nome do caso de estudo (Figura 2).

Os dados arquivados na BD consistem em informação de carácter documental sobre os monumentos/casos de estudo, as características ambientais dos locais de construção desses monumentos, resultados de caracterização dos materiais e o histórico de ações realizadas nos monumentos (por exemplo: inspeção, monitorização, reparação). Os dados relativos a um dado monumento estão agrupados de forma hierárquica em termos dos elementos e/ou componentes desse caso de estudo (Figura 3).

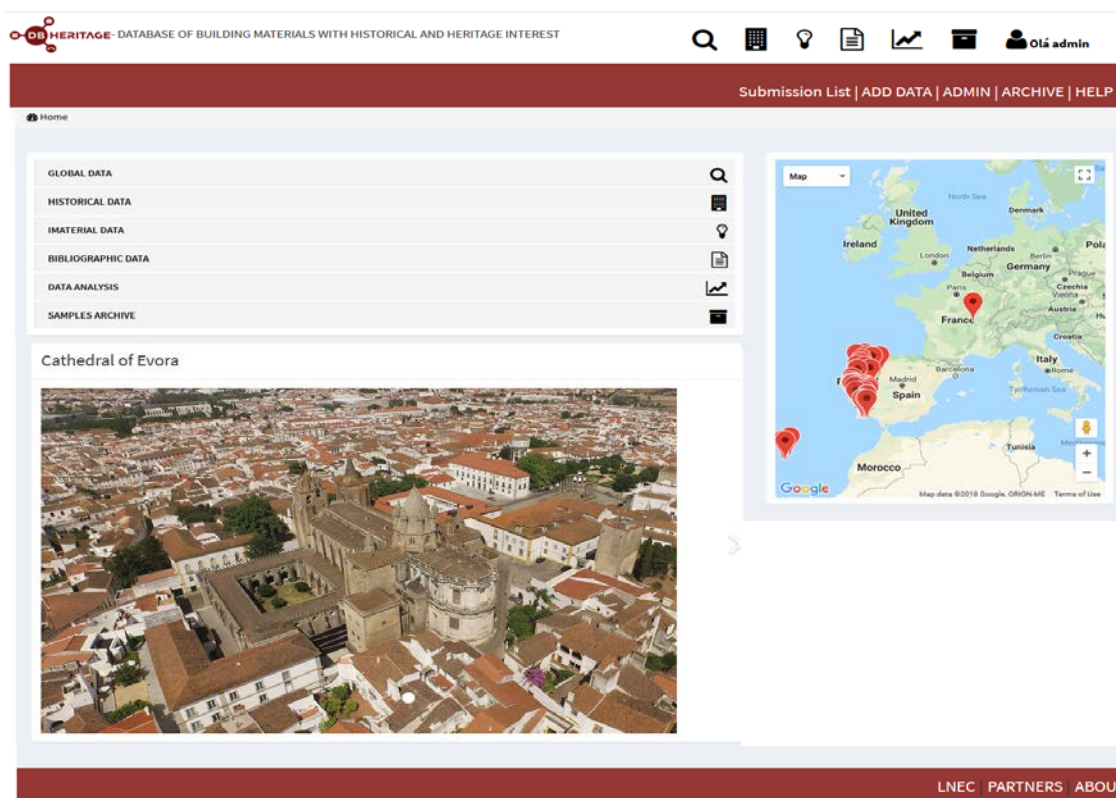


Figura 1: Opções de consulta de dados. No mapa à direita é possível selecionar pela localização os casos de estudo existentes na base de dados

No que se refere à caracterização ambiental, os dados inseridos incluem informação meteorológica e de poluição atmosférica, e em alguns casos características do solo e da água. O utilizador poderá aceder à informação ambiental registada na região em que se encontra localizado o monumento ou aceder aos registos locais associados a um determinado elemento desse monumento.

Os dados de caracterização do material incluem características químicas, mineralógicas, microestruturais, físicas e mecânicas, sendo ainda possível indicar as características de eventuais sistemas de proteção.

A secção do histórico de ações realizadas encontra-se subdividida nas ações de inspeção, manutenção, monitorização e intervenções de conservação/ reparação. A cada uma destas ações está associada uma lista a partir da qual é possível aceder à respetiva informação. Esta informação é sintetizada num quadro dinâmico que possibilita a navegação até aos resultados referentes à aplicação de um dado método de ensaio nos materiais aplicados num determinado componente do monumento.

A BD foi preparada para facilitar a análise dos dados, integrando também algumas ferramentas de análise simplificada tais como representações gráficas, filtros diversos e possibilidade de exportação de dados em diferentes formatos. É também possível aplicar filtros à estrutura hierárquica permitindo visualizar apenas os elementos que cumprem os critérios selecionados pelo utilizador.

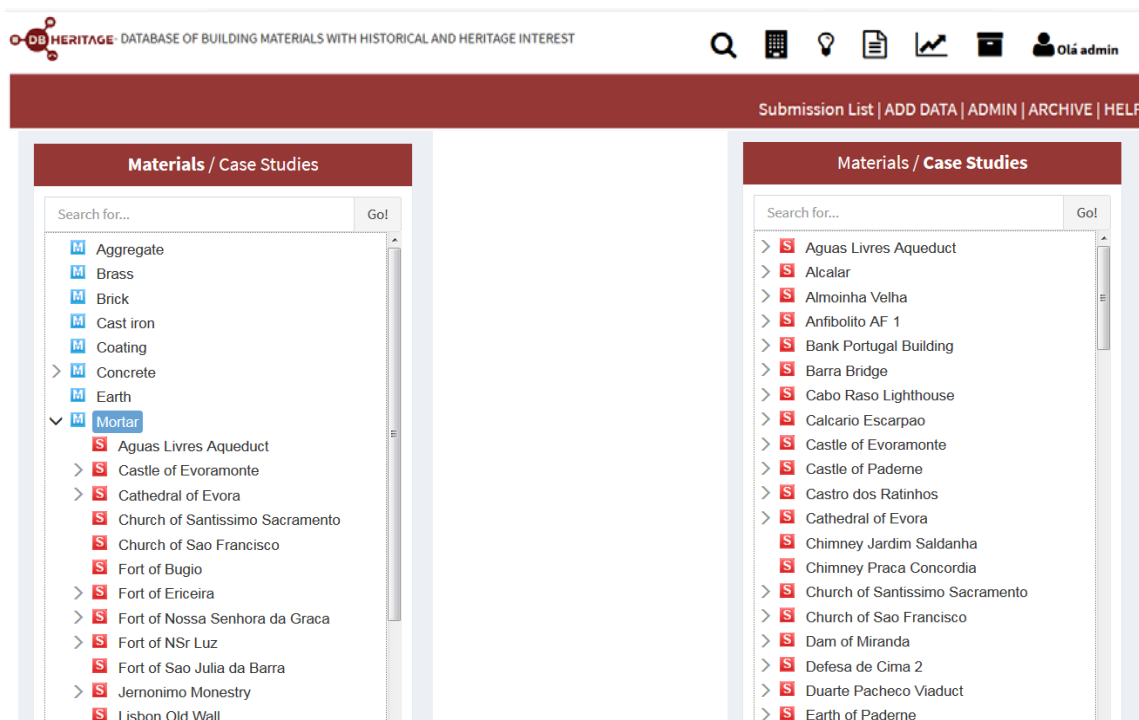


Figura 2: Diferentes opções de organização dos dados

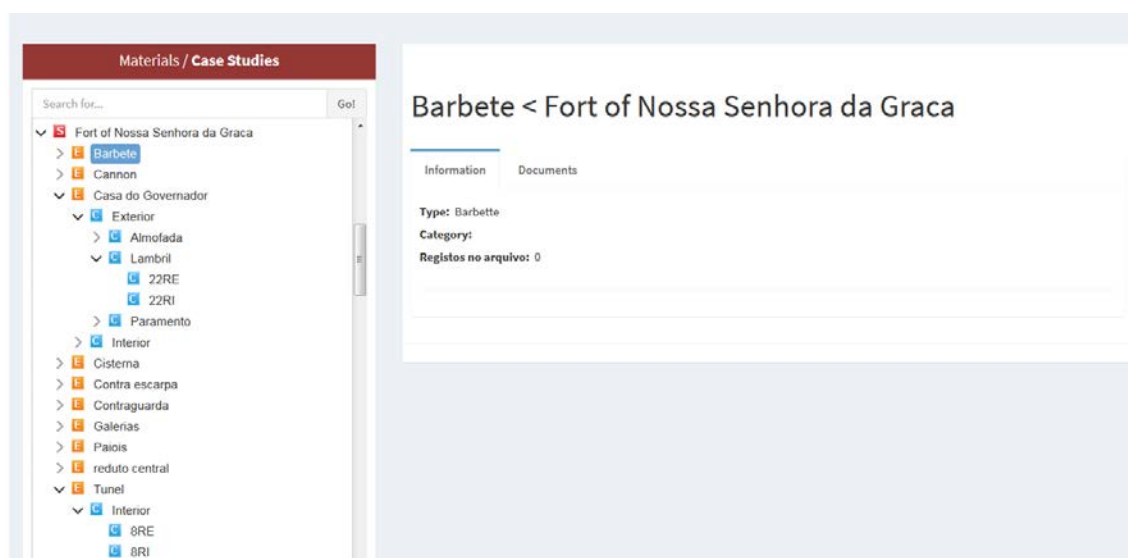


Figura 3: Exemplo de esquematização hierárquica de um caso de estudo

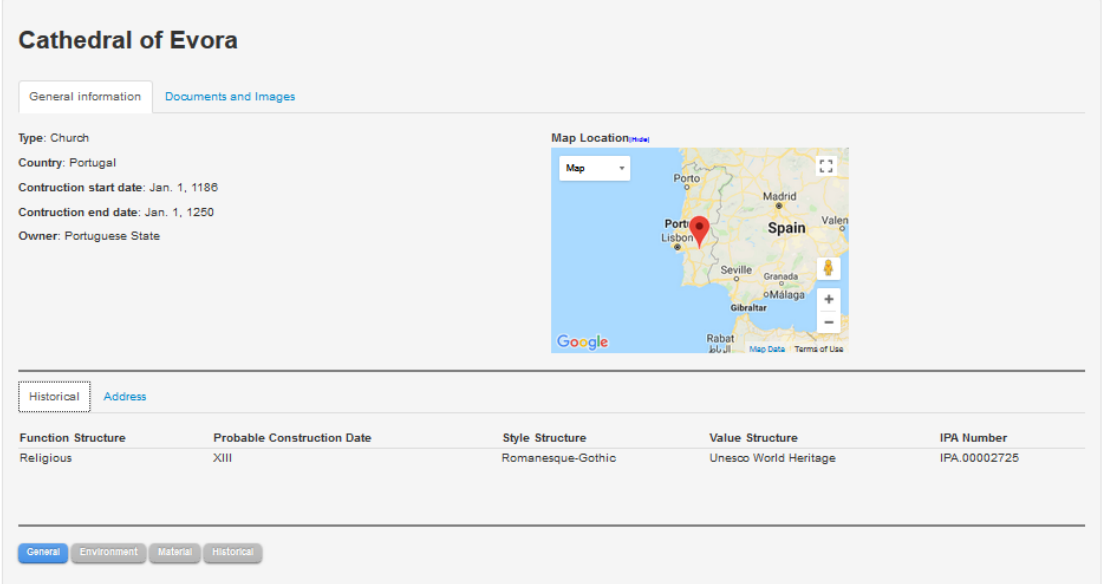
Revestimentos de cal – exemplo das funcionalidades da BD

Para ilustrar algumas das funcionalidades da BD apresenta-se um exemplo com os dados de caracterização de amostras de argamassa de revestimento da Sé Catedral de Évora.

A Catedral de Évora (Igreja de Santa Maria de Évora) é um dos monumentos mais importantes de Évora, cidade do Sul de Portugal classificada pela UNESCO como Património Mundial. A sua construção remonta ao século XIII e foi inspirada no modelo da Catedral de Lisboa e em catedrais estrangeiras. De estilo românico-gótico é um complexo monumental que inclui um claustro além da igreja [Patrícia et al., 2009].

Na Figura 4 apresenta-se a interface preliminar da BD com a informação genérica sobre o monumento exemplificado, nomeadamente com a indicação do tipo de estrutura e função, a sua localização, o período de construção, o estilo arquitetónico e o seu número de registo no sistema de informação para o património arquitetónico. É possível também aceder a documentos e imagens relacionados com o monumento, bem como a informações sobre as características climáticas exteriores onde está inserido ou a medições nele efetuadas sobre o histórico de ações realizadas (inspeção, manutenção, monitorização e intervenções de conservação/ reparação) e sobre as características dos materiais originais aplicados, ou de materiais usados em campanhas de conservação e restauro.

Na Figura 5 ilustra-se um exemplo da informação existente no histórico para este monumento, relacionada com uma inspeção realizada no ano 2005 e que conduziu ao estudo das argamassas de revestimento. Nessa área do histórico é possível aceder aos documentos e imagens relacionados com essa ação (Figura 6), bem como aos métodos de ensaio que nela foram utilizados (Figura 7). A informação sobre os ensaios realizados pode ser consultada e exportada, por exemplo para posterior tratamento gráfico.



The screenshot displays the 'Cathedral of Evora' page in a database interface. It features a 'General information' tab and a 'Documents and Images' tab. The general information section includes: Type: Church; Country: Portugal; Construction start date: Jan. 1, 1186; Construction end date: Jan. 1, 1250; Owner: Portuguese State. A map shows the location in Portugal. Below this is a table with columns: Function Structure, Probable Construction Date, Style Structure, Value Structure, and IPA Number. The table contains one row: Religious, XIII, Romanesque-Gothic, Unesco World Heritage, IPA.00002725. At the bottom, there are tabs for General, Environment, Materials, and Historical.

Function Structure	Probable Construction Date	Style Structure	Value Structure	IPA Number
Religious	XIII	Romanesque-Gothic	Unesco World Heritage	IPA.00002725

Figura 4: Informação geral referente ao caso de estudo exemplificado

Cathedral of Evora, historical data - Cathedral of Evora

Cathedral of Evora Mortar Study

General Information Documents and Images Applied Methods

Name: Cathedral of Evora Mortar Study
Date: May 10, 2005
Description: In this work were analysed mortars from several places of the Santa Maria's Church in Évora, a historical monument constructed between centuries XIII and XVI.

General Environment Material **Historical**

Figura 5: Informação relacionada com uma ação de inspeção efetuada em 2005

Cathedral of Evora, historical data - Cathedral of Evora

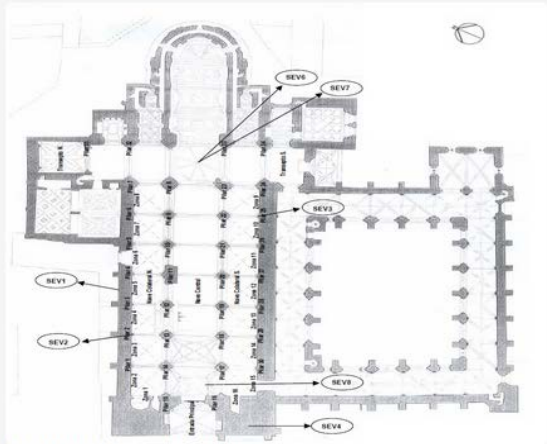
Cathedral of Evora Mortar Study

General Information Documents and Images Applied Methods

Documents

- Cathedral of Evora Mortars Report 2006

Images



Cathedral of Evora Sample Location Map

General Environment Material **Historical**

Figura 6: Informação sobre a ação de inspeção efetuada em 2005, mostrando uma planta da Catedral com a indicação dos locais que foram amostrados

Cathedral of Evora, historical data - Cathedral of Evora

Cathedral of Evora Mortar Study

General Information Documents and Images Applied Methods

Filter

	Element			
	Jube	Lantern Tower	Nave	Zimborio Tower
Absorption capillary coefficient	-	+	-	+
Chemical analysis	+	+	+	+
Compressive strength	+	+	+	+
DTA/TG/DTG	-	-	-	+
Grain-size distribution (sand)	+	+	+	+
Macro Description	+	+	+	+
Mercury intrusion porosimetry (MIP)	+	+	+	+
Microstructural analysis	-	-	-	+
Optical analysis (sand)	+	+	+	+
Polish Section	+	+	+	+
Thin Section Descrip	-	+	+	+
XRD Composition	+	+	+	+

General Environment Material Historical

Figura 7: Informação sobre a ação de inspeção efetuada em 2005 onde são indicados os locais amostrados e os ensaios efetuados

Os dados de caracterização das amostras, que incluem características químicas, mineralógicas, microestruturais, físicas e mecânicas, podem ser visualizados na forma de tabelas (Figuras 8-10) ou imagens (Figura 11).

Cathedral of Evora, historical data - SEV1

May 10, 2005 Inspection

General information documents and images

Structural Element: SEV1
Method used: Macro Description
Material: Mortar:Mortar:Mortar

Macro Description

10 records

Chart Report - Export - Select all Show / hide columns

Mortar Aggregate				Mortar Descrip Layer						
Agg Colour	Agg Sorting	Lime Lumps	Pozzolanic Frag	Layer Cohesion	Layer Colour	Layer Label	Layer N°	Layer Thickness [mm]	Layer Type	
Grey	poorly sorted	Yes	Yes	High	White	SEV1	1	30	Plaster	
<input type="text" value="Search Agg Ct"/>	<input type="text" value="Search Agg Sc"/>	<input type="text" value="Search Lime L"/>	<input type="text" value="Search Pozzolan"/>	<input type="text" value="Search Layer Cc"/>	<input type="text" value="Search Layer t"/>	<input type="text" value="Search Layer"/>	<input type="text" value="Search Layer"/>	<input type="text" value="Search Layer Th"/>	<input type="text" value="Search Layer"/>	

Showing 1 to 1 of 1 entries

First Previous 1 Next Last

Other Methods Applied

Microstructural analysis Optical analysis (sand) Compressive strength XRD Composition Mercury intrusion porosimetry (MIP) Chemical analysis DTA/TG/DTG Grain-size distribution (sand) Polish section Thin section Descrip Absorption capillary coefficient

General Environment Material Historical

Figura 8: Informação relacionada com a descrição macroscópica dos constituintes da amostra de argamassa SEV 1

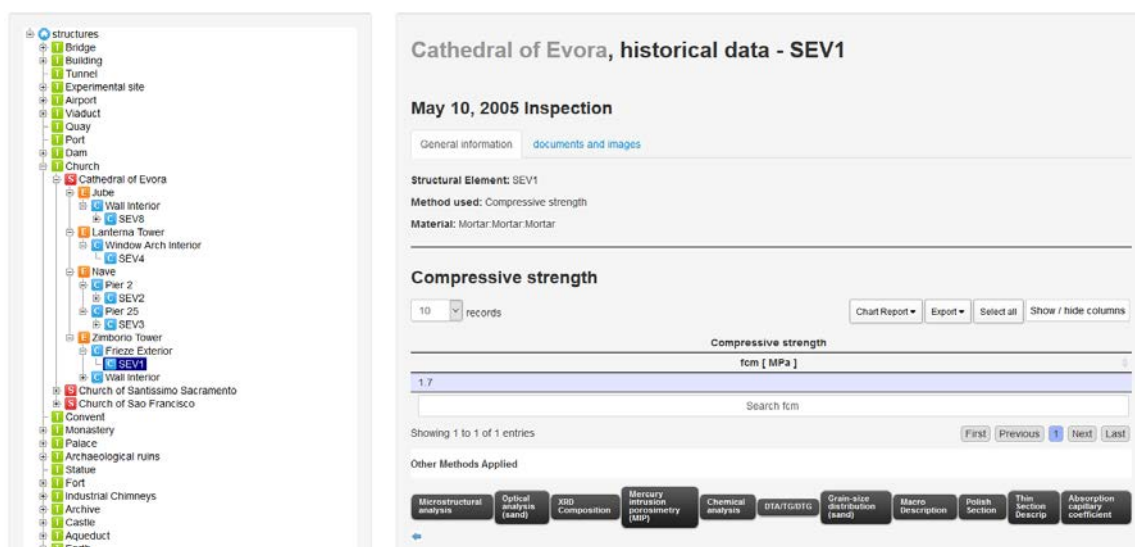


Figura 9: Visualização dos resultados de resistência à compressão da amostra de argamassa SEV 1

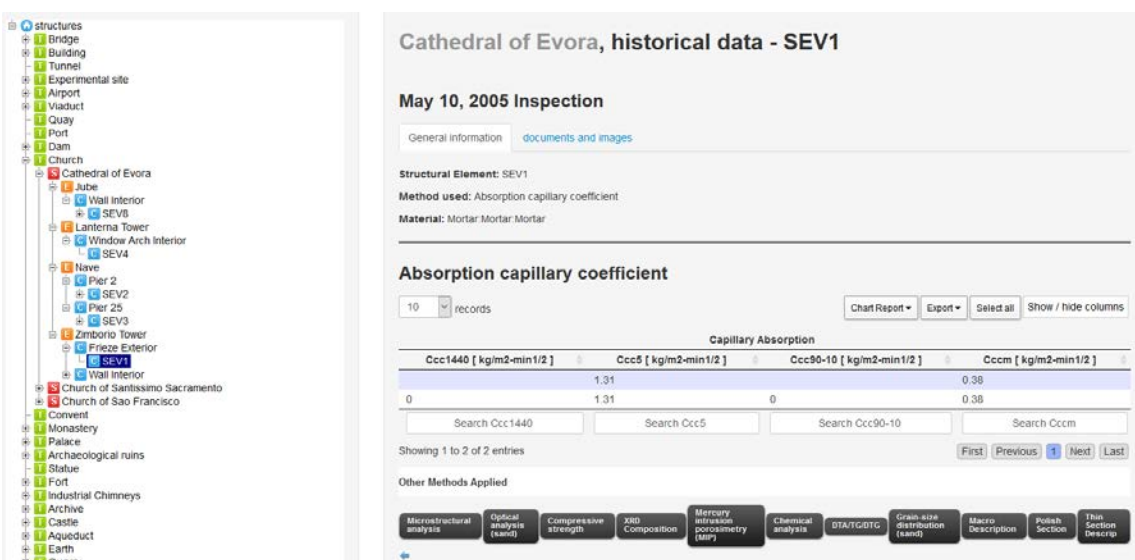


Figura 10: Visualização dos resultados de absorção capilar da amostra de argamassa SEV 1

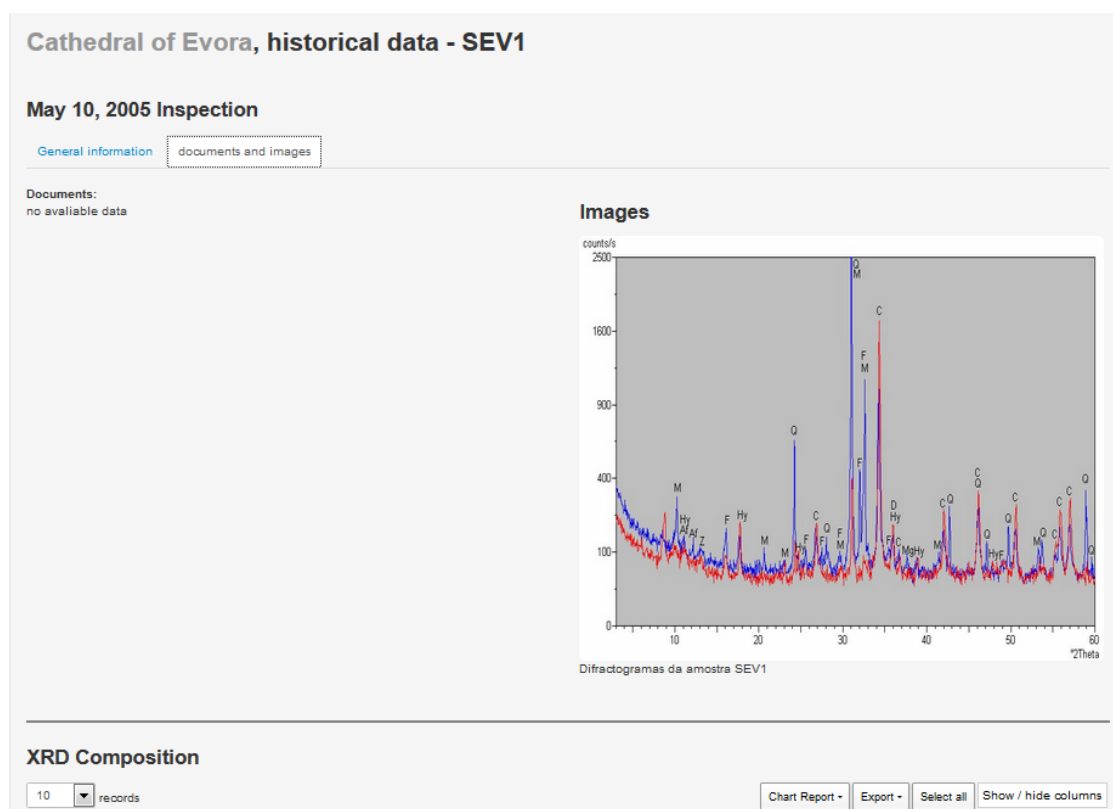


Figura 11: Visualização do difratograma da amostra de argamassa SEV 1

Está prevista para breve a possibilidade de se visualizarem na BD os dados de diferentes casos de estudo em simultâneo, o que permitirá comparar as características de materiais similares em diferentes tipos de ambiente, e assim avaliar os diferentes tipos de desempenho ajudando dessa forma o estabelecimento de recomendações para a seleção dos materiais e das características a que deverão obedecer.

A BD possui ainda um módulo relacionado com a gestão das amostras físicas (Figura 12), módulo esse que permite, à semelhança da restante BD, a pesquisa por tipo de material ou por tipo de estrutura. Na figura 13 apresenta-se uma imagem que mostra os tipos de materiais atualmente disponíveis no arquivo físico. Neste módulo a pesquisa por tipo de material permite aceder aos casos de estudo referentes às amostras catalogadas no arquivo (Figura 14), bem como à identificação das amostras de um determinado caso de estudo (Figura 15). Este módulo permite ainda a gestão das amostras, nomeadamente em termos do seu empréstimo para estudo e investigação.



Figura 12: Sala do repositório físico de amostras de materiais de construção históricos

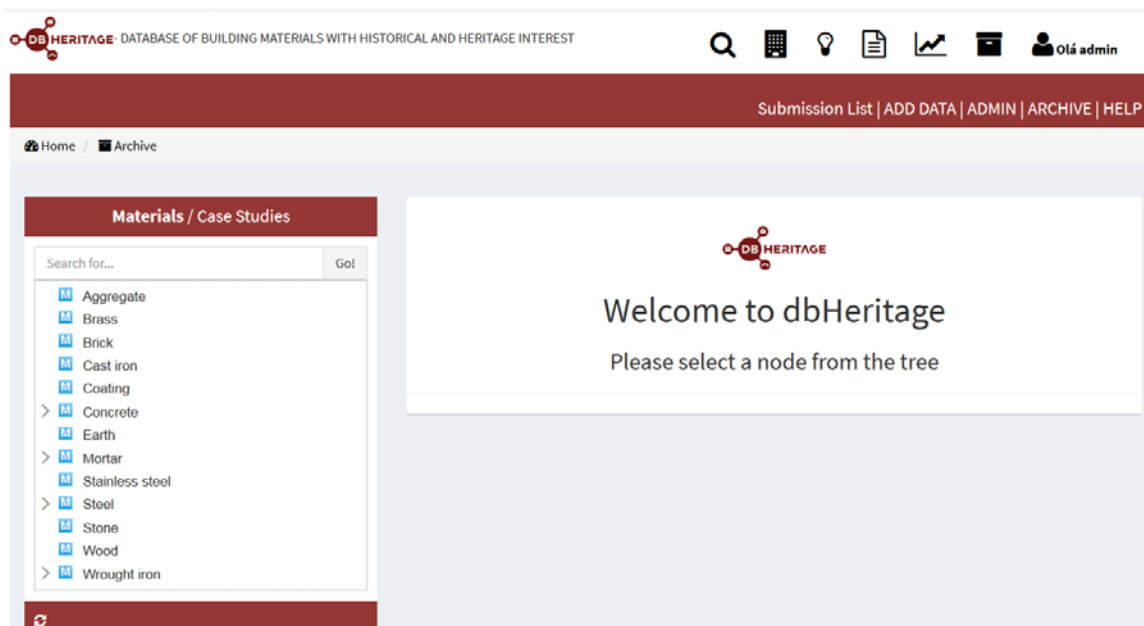


Figura 13: Indicação do tipo de materiais atualmente disponíveis no arquivo físico

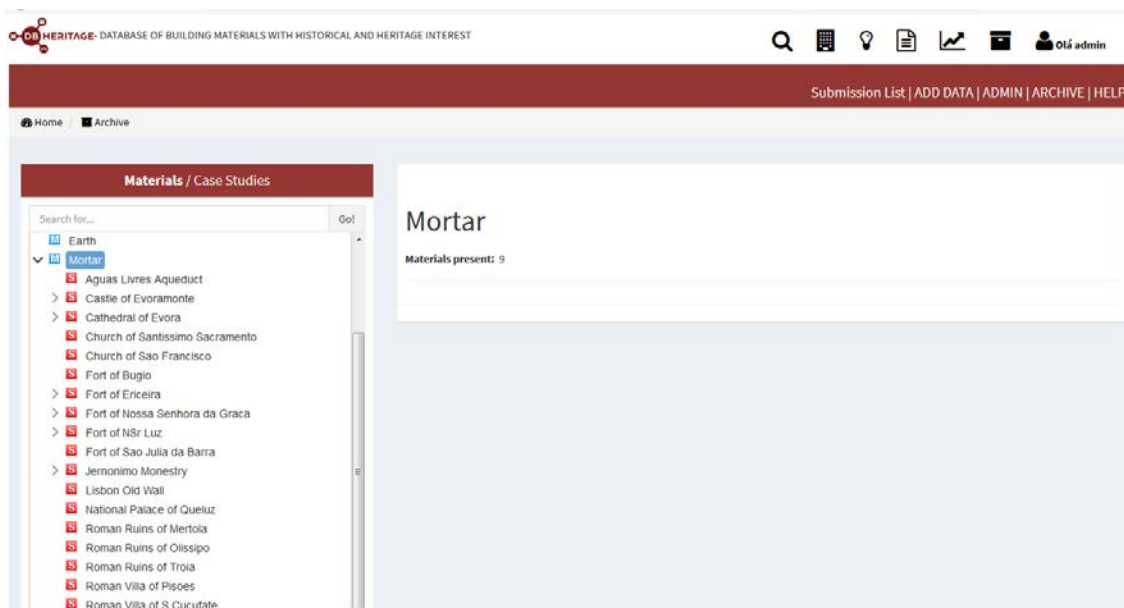


Figura 14: Indicação dos casos de estudo referentes a argamassas de cal existentes no arquivo físico

The screenshot shows the DB-HERITAGE database interface. The top navigation bar includes 'Submission List | ADD DATA | ADMIN | ARCHIVE | HELP'. The main content area is titled 'Archive - Cathedral of Evora'. On the left, there is a search bar and a tree view of materials/case studies. The main table displays the following data:

Arquivo	AutoID	Room	Line	Box n.	Structure	State	Options
LNEC	SEV2	107	F	1F-1	SEV2	Arquived	edit
LNEC	SEV2-2	107	F	1F-1	SEV2-2	Arquived	edit
LNEC	SEV2-4_5	107	F	1F-1	SEV2-4_5	Arquived	edit
LNEC	SEV3	107	F	1F-1	SEV3	Arquived	edit
LNEC	SEV3-B	107	F	1F-1	SEV3-B	Arquived	edit
LNEC	SEV3-EXT	107	F	1F-1	SEV3-EXT	Arquived	edit
LNEC	SEV3-IM	107	F	1F-1	SEV3-IM	Arquived	edit
LNEC	SEV3-INT	107	F	1F-1	SEV3-INT	Arquived	edit
LNEC	SEV6	107	F	1F-1	SEV6	Arquived	edit
LNEC	SEV7	107	F	1F-1	SEV7	Arquived	edit

Figura 15: Indicação das amostras de argamassa da Catedral de Évora existentes no arquivo físico

Conclusões

Este artigo apresentou a base de dados DB-HERITAGE, uma ferramenta em desenvolvimento que visa criar um espaço de informação sobre as características e o desempenho de materiais de construção históricos, onde é possível aceder aos dados de caracterização de amostras provenientes de monumentos e edifícios em Portugal com valor histórico e patrimonial.

Inserida nesta base de dados está também um repositório físico de amostras de diferentes tipos de materiais, nomeadamente de revestimentos de cal, para estudos de comparação. Este repositório é o resultado de um grande esforço dos membros do consórcio DB-HERITAGE, no sentido de proporcionar à comunidade técnica e científica um ponto de acesso único onde os seus recursos podem ser acedidos através duma única base de dados.

Esta base de dados irá também, em breve, permitir a comparação de dados dum mesmo tipo de material aplicado em diferentes tipos de monumentos, o que possibilitará fazer a relação entre a composição e o desempenho dos materiais em diferentes ambientes de exposição.

O caso relativo à caracterização das argamassas de cal de revestimento da Sé Catedral de Évora, apresentado como exemplo demonstrativo das capacidades da base de dados, mostra as características de composição da amostra SEV1, constituída principalmente por calcite (cal) e quartzo (areia) e as suas características mecânicas e físicas, revelando uma resistência elevada e uma boa capacidade de proteção à água.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo seu apoio através do projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial, e também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) pelo seu apoio através do projeto DUR-HERITAGE - Durabilidade e caracterização de materiais com interesse histórico.

Bibliografia

Adriano, P.; Santos Silva, A.; Veiga, M. R.; Mirão, J.; Candeias, A. (2009). Microscopic characterisation of old mortars from the Santa Maria Church in Évora. *Materials Characterization*. 62, pp. 610-620.

Riccardi M.; Lezzerini M.; Caro F.; Franzini M.; Messoga B. (2007). Microtextural and microchemical studies of hydraulic ancient mortars: Two analytical approaches to understand pre-industrial technology processes. *Journal of Cultural Heritage*. 8, pp. 350-360

Santos Silva, A. (2002). Caracterização de argamassas antigas – Casos paradigmáticos. *Cadernos de Edifícios Nº 2 – Revestimentos de paredes em edifícios antigos*, LNEC, pp. 87-101.

Veiga, M.R.; Aguiar, J.; Santos Silva, A.; Carvalho, F. (2001). Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. *Proceedings of the 3rd International Seminar Historical Constructions*, Guimarães, Universidade do Minho, pp. 353-362.

Veiga, M. Rosário; Santos Silva, António; Tavares, Martha; Santos, Ana Rita; Lampreia, Nádía (2013). Characterization of renders and plasters from a 16th Century Portuguese Military Structure: Chronology and durability. In *Restoration of Buildings and Monuments*. Vol. 19, n. 4, pp. 223–238.

Veiga M. R. (2012). Conservation of Historic Renders and Plasters: From Laboratory to Site. In: Válek J., Hughes J., Groot C. (eds) *Historic Mortars*. RILEM Bookseries, vol 7. Springer, Dordrecht, pp 207-225.

La cal como elemento bioclimático en la arquitectura tradicional canaria

Eduardo Martín del Toro

Grupo de investigación ARQUITECTURA Y PAISAJE de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, España, eduardo@deltoroantunez.com

Resumen

La arquitectura tradicional canaria es el resultado de la adaptación de una arquitectura importada, a las condiciones muy particulares de las islas, lo que le imprime un sello muy personal que la hace diferente. Esta arquitectura realiza una labor natural de adaptación e integración con el menor esfuerzo material y energético, razón por la cual es ejemplo de arquitectura bioclimática, ya que a base de ensayos y errores, a través de la experimentación cotidiana, representa la adecuación perfecta entre el clima, las necesidades humanas y la construcción sostenible. En la arquitectura vernácula del archipiélago canario -del mismo modo que ha sucedido en muchas otras arquitecturas tradicionales- la cal ha sido un material fundamental, pero no sólo como componente aglomerante para consolidar los muros o revestir las fábricas de piedra, gracias a sus cualidades de resistencia, durabilidad o flexibilidad, sino sobre todo como elemento fundamental dentro de su estrategia bioclimática, a través de sus múltiples propiedades, funcionando como elemento de aislamiento térmico, corrector de la humedad ambiental, desinfectante, impermeabilizante, etc. Este artículo analiza el uso que la cal ha tenido en la arquitectura doméstica canaria, no tanto como material constructivo, sino como elemento sostenible que forma parte fundamental de las estrategias bioclimáticas de esta arquitectura.

Palabras clave: Islas Canarias; cal; arquitectura tradicional; arquitectura vernácula; arquitectura bioclimática; arquitectura sostenible

Introducción

La arquitectura tradicional canaria es el resultado de la adaptación de una arquitectura importada, a las condiciones muy particulares del archipiélago, lo que le imprime un sello muy personal que la hace diferente.

Existen cuatro factores que han influido en esta adaptación al territorio y que son:

En primer lugar, el factor humano: Canarias es punto de encuentro de gentes de diferentes procedencias (andaluza, portuguesa y gallega principalmente) que introducen en canarias los modos y estilos particulares de sus lugares de procedencia.

En segundo lugar, la disponibilidad de los materiales de construcción: Canarias es una tierra escasa en recursos, los cuales fueron determinantes para el desarrollo de la arquitectura, como la piedra, la madera, el barro y en menor medida, la teja y la cal.

En tercer lugar, el socio-económico: La arquitectura tradicional rural fue obra de sus propios dueños ayudados por sus familias, amigos y paisanos, tal como sucedía en las zonas humildes urbanas, quedando exceptuada de esta regla la casa de los grandes propietarios.

Por último -y el que se ha tomado como base de esta investigación- el climático, muy ligado a la orografía: Ha sido precisamente el que más ha influido en el cambio de las arquitecturas importadas por sus primeros moradores y ha llevado a constituir el "modo canario" o -mal llamado- "estilo canario", ya que este estilo no existe: "Existe una manera o modo de hacer canarios, basados en la experimentación y en la sabia aplicación de medios y recursos, cosa que siempre ha sabido hacer el pueblo" [FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, J. J., 2008].

La influencia cultural en Canarias es uno de los factores determinantes de la forma arquitectónica, pero siempre adaptada al medio natural en que se encuentra. A pesar de la aparente bondad del clima canario, para alcanzar el confort o bienestar en el ambiente interior de una vivienda, hay que seguir alguna estrategia bioclimática como la captación solar activa o la ventilación.

Como veremos a lo largo de este trabajo, los primeros constructores apreciaron los beneficios del sol y los perjuicios del viento, frío o caliente, lo que se tradujo en una arquitectura preocupada por el confort y la salubridad de sus ocupantes.

La arquitectura tradicional canaria como ejemplo de arquitectura bioclimática

Una de las bondades de la arquitectura tradicional canaria reside en que es capaz de garantizar un ambiente interior estable y cómodo frente a los condicionantes climáticos del medio. Para lograr este propósito se sirve de mecanismos de aprovechamiento natural energético como la protección o la captación de luz y energía solar, del viento o de la lluvia, según lo requieran los locales, su uso o función y los ocupantes [PÉREZ ROMERO, M. 2004].

El tipo de construcción tradicional de la edificación en Canarias buscaba la estabilidad térmica interior incorporando para ello técnicas y materiales aceptados y sancionados por el uso que, debido a la cultura tradicional adquirida a lo largo de los años, permitían crear el ambiente interior más confortable posible en la vivienda [ÁLVAREZ-UDE, L. et al., 2004]. A ello se unía una forma de habitar la vivienda que ayudaba a ese confort.

Por este motivo, se puede considerar que la arquitectura vernácula forma parte de la arquitectura bioclimática, ya que consigue acondicionar el ambiente interior de la vivienda a los parámetros de confortabilidad mediante mecanismos únicamente arquitectónicos y no tecnológicos [GIL CRESPO, I.J., 2014].

Los muy variados microclimas han generando diferentes respuestas arquitectónicas. La utilización de recursos para adaptarse al microclima local existente en su ubicación es patente: las estancias principales se orientan al abrigo de los vientos dominantes, los tejados permiten la evacuación rápida del agua de lluvia, se habilitan patios interiores para el refresco de la vivienda... sin duda, el conocimiento acumulado permitió la adecuación de las construcciones al entorno.

La arquitectura tradicional es el resultado -entre otros condicionantes- de la adecuación al entorno, el clima y las exigencias humanas naturalmente satisfechas. De manera natural y en tanto que la arquitectura tradicional daba respuesta a las inclemencias del clima, a las dificultades del acceso y a otros problemas planteados por el propio medio resultó establecer los condicionantes que en la actualidad precisamos para la arquitectura que hoy hemos dado en llamar bioclimática.

La cal como material bioclimático

La cal artesanal procede de la calcinación de las piedras calizas, un material que se encuentra en la naturaleza, no necesitándose de una alta industrialización para su obtención, ofreciendo grandes beneficios a un costo razonable. Se integra con el ambiente de forma respetuosa, con emisiones de CO₂ muy reducidas, puesto que el producido en su fabricación es absorbido en gran medida posteriormente durante la carbonatación, compensándose así gran parte de las emisiones de gases [MARTÍN DEL TORO, E., 2018a].

La durabilidad de la cal es uno de sus mayores puntos fuertes, debido entre otros a la flexibilidad que presenta, dotándola de una alta resistencia a movimientos térmicos o aquellos de la propia superficie a la que protegen, lo que evita el agrietamiento y la apertura de puntos de acceso de agua. Además, el no tener sales nocivas y otros elementos extraños en su composición, también favorece su alta durabilidad [USED VALLES R. M., 2015].

Aislante térmico y acústico, reduce la demanda energética, por lo que supone un ahorro económico y una disminución en las emisiones tóxicas para la atmósfera. Permite, en climas cálidos, reflejar los rayos solares hacia la atmósfera, evitando la incidencia solar y mitigando parte del calentamiento, para disminuir considerablemente la temperatura al interior de los espacios [ROBADOR GONZÁLEZ, M. D., 2015].

Es un material transpirable, con alta difusividad al vapor de agua e impermeable a la vez al agua en estado líquido, es decir, tiene la capacidad de dejar pasar el vapor de agua pero no el agua de lluvia; e higroscópico, siendo capaz de absorber gran cantidad de agua sin apenas aumentar de volumen durante los períodos frescos y húmedos, mientras que la difunde al ambiente en las épocas calurosas y secas, no sólo favoreciendo una correcta humedad relativa sino generando el enfriamiento de los muros cuando se produce la difusión de dicha humedad [MARTÍN DEL TORO, E., 2018b], con lo que es un regulador natural de la humedad en el interior del edificio, especialmente en zonas húmedas como baños y cocinas. Esto es debido a la amplia red capilar que forma el material en su interior, lo suficientemente estrecho para permitir que pase el vapor de agua pero no el agua de lluvia [PALENZUELA ILLÁN, J., 2014].

El mortero de cal es desinfectante y fungicida natural debido a su alcalinidad natural [AA. VV., 2009], por lo que en caso de algún tipo de problema con humedades evita la aparición de mohos, ácaros y otros microorganismos. El poder caústico de la cal viva se ha aprovechado como desinfectante o para la potabilización del agua de consumo [MANZANO CABRERA, J. L. y MIRELES BETANCOR, F. M., 2017].

También, su capacidad impermeabilizante para aislar de la humedad [TOVAR ALCÁZAR, R., 2017] la hace adecuada en la construcción hidráulica como estanques para el almacenaje de aguas

pluviales y piscinas naturales. La cal hidráulica es impermeable, resistente a la compresión, resistente a las sales minerales y capaz de endurecerse incluso debajo del agua, sin la presencia de aire [BRÜEMMER M., 2003/2004].

La cal como elemento sostenible en la arquitectura tradicional canaria

En la arquitectura vernácula del archipiélago canario -del mismo modo que ha sucedido en muchas otras arquitecturas tradicionales- la cal ha sido un material fundamental, pero no sólo como componente aglomerante para consolidar los muros o revestir las fábricas de piedra, gracias a sus cualidades de resistencia, durabilidad o flexibilidad, sino sobre todo como elemento fundamental dentro de su estrategia bioclimática, a través de sus múltiples propiedades, funcionando como elemento de aislamiento térmico, corrector de la humedad ambiental, desinfectante, impermeabilizante, etc.

"La cal oscura o gris, que sirve para encalar paredes de casas y aljibes, se obtiene cuando se toma la parte superficial de la piedra de cal cocida, contaminada por las cenizas de la combustión. La cal interior es blanquecina y sirve sobre todo para albear, aunque también tiene otros usos, como desinfectante de aljibes y repelente de insectos en las casas" [GONZÁLEZ, C, 2015].

"La cal es, salvo en la dos islas más orientales, un material escaso y, por ese mismo motivo, caro y, por lo tanto, definidor del estatus económico y social de sus propietarios" [LEÓN ESPINOSA, R. E, s.f.].

Veamos pues a continuación como la cal tiene una función fundamental en las distintas tipologías de la arquitectura tradicional canaria:

La casa-cueva

La cal es un elemento frecuente en la arquitectura troglodita canaria, donde todo el interior está albeado con cal en paredes y techo y en muchas ocasiones el encalado se extiende al exterior de la misma, donde contrasta con el color oscuro de la toba (Figura 1) y sobre el que destaca una gran profusión de plantas de colores vivos.

La arquitectura subterránea posee unas características bioclimáticas inmejorables y sostenibles en cuanto a su ejecución o rehabilitación. Sin embargo, la humedad contenida en el terreno y la propia del uso de la edificación junto con las bajas temperaturas en condiciones de invierno provocaría situaciones de malestar al aumentar la sensación térmica de frío con la presencia de humedad.

El recubrimiento exterior de la cueva de cal -permeable- permite cierta transpirabilidad al terreno que reacciona a las lluvias absorbiendo agua, reteniéndola e impermeabilizándose internamente al tiempo. Cuando llega el verano la evaporación de ese agua ayudará a mantener las bajas temperaturas interiores [NEILA GONZÁLEZ, F.J., 2013].



Figura 1. Hornos y casas cuevas en la Atalaya Santa Brígida 1890-1895. Exposición fotografías antiguas "Gran Canaria desconocida". Las colecciones fotográficas de la Casa de Colón. Las Palmas de Gran Canaria. Fuente: Flickr [<https://www.flickr.com/photos/azuaje/8311114927>]

En zonas de rocas blandas, la parte del terreno por encima de la cueva se impermeabiliza mediante enfoscados de mortero de cal, para evitar filtraciones y humedades [AA. VV., 2008] y en el interior de las viviendas sirve de barrera para pequeños insectos de la tierra [SANTANA RODRÍGUEZ, R., et al., 2011].

Por otro lado, para proveer de iluminación natural a un espacio enterrado -y que por tanto en principio carece de ella- se conjugan dos estrategias: por un lado, se busca el color claro de sus caras internas, a través del encalado o el albeado del interior; por otro lado, implantando un pequeño ventanillo practicado sobre el dintel de la entrada, el cual suministra una fuente de luz que se difundía por reflexión en las paredes [SABATÉ BEL, F., 2008].

A esto ayuda el hecho de que las cuevas canarias no suelen tener grandes profundidades -no siendo común que se concatenen más de dos estancias en profundidad-, sino que se constituyen

normalmente a partir de cámaras contiguas que dan directamente al exterior o, más normalmente, a un patio que les provee de iluminación y ventilación al tiempo que sirve de elemento protector.

La casa terrera

La vivienda tradicional canaria de una planta, con muros de piedra y cubierta de tejas es denominada en el archipiélago como "casa terrera" (Figura 2).



Figura 2. Casa terrera. Autores: Eduardo Martín del Toro y Sara Acosta Pérez.

Es la vivienda rural canaria por antonomasia, siendo la más común y la de mayor arraigo en casi todas las comarcas del archipiélago por lo que también se la conoce como "casa canaria" y es, por consiguiente, la que ha llegado hasta nuestros días con todas las formas y combinaciones que la cultura y los tiempos han ido imprimiendo sobre ella [MARTÍN RODRÍGUEZ, F.G., 1978].

Los muros de carga son de sillares basálticos o mampostería ordinaria calzados con hijas o ripios. En las fachadas abunda la mampostería mientras se destinan los sillares a los marcos de los huecos y a las esquinas. Se emplean como elemento de relleno el barro, trozos de teja o pequeñas lascas de piedra. Éstos se terminan con enjalbegado de cal o cal y arena, que mejora sus características térmicas.

El empleo de la cal en el recubrimiento de los muros les confiere la capacidad de ser impermeables a la lluvia, al tiempo que permite respirar a la pared, facilitando la eliminación de la humedad del interior.

El encalado de la fachada principal, orientada normalmente al sur, que solía ser restaurado cada seis meses o cada año -junto antes de la llegada de la época de lluvia y/o la calurosa- para mantener todas sus propiedades y evitar el calentamiento del interior mediante el aumento del su albedo o cantidad de radiación solar que es devuelta a la atmósfera tras chocar con una

superficie. Un alto albedo consigue reflejar la luz y el calor recibido regulando el calor y manteniendo los hogares a temperaturas inferiores a la exterior.

La casa de azotea

Además de la casa terrera con cubierta de teja, podemos encontrar la vivienda de techo plano transitable -de torta o azotea- el cual sirve de elemento de recogida de agua para el aljibe, espacio de secado de frutos o zona para el tendido de ropa.

Los muros antiguamente se construían con piedra seca, luego piedras aglutinadas en barro, más tarde con mortero de cal y finalmente con bloques de arena volcánica y cemento [Arquitectura en Fuerteventura, s.f.]. Originalmente de piedra vista por el exterior y blanqueados en el interior -que en ocasiones se deja asomar por los bordes de los huecos, lo que se denomina "bigotes" [ALONSO FERNÁNDEZ-ACEYTUNO, J.M., 1979]-, posteriormente han terminado siendo blanqueados también por el exterior, al menos, con el encalado de la fachada principal.

Esta tipología predomina en las islas más orientales -Lanzarote y Fuerteventura- y en las zonas costeras de las islas orientales.

Una de las principales características que constituyen las edificaciones es la blancura de todas las superficies exteriores -incluidas las cubiertas- para reflejar la luz solar, impidiendo que el calor pase al interior de la vivienda y convirtiéndose en un aislante térmico, contribuyendo a la refrigeración por alta masa térmica (aplicable en temperaturas entre 20º C y 36º C, con casi cualquier humedad: desde 8% hasta 80%) [Conceptos bioclimáticos en la arquitectura contemporánea, s.f.], ya que reduce sus ganancias diurnas gracias al efecto del albedo, mientras que disipa el calor por la noche, al bajar las temperaturas y por radiación a la bóveda celeste, como se muestra en la Figura 3.

Las cubiertas planas -o de azotea- se fabrican de barro reforzado con paja, o barro y picón con cal. Estas cubiertas se combinan con las de teja en un mismo edificio, conformando una azotea o un mirador.

La escasez de agua hace necesaria la recogida, sin que se pierda ninguna gota de la agualluvia, término empleado en Lanzarote para designar el agua de la lluvia. Esta necesidad ha determinado la forma de las viviendas lanzaroteñas, de modo que sus plantas tradicionales en "L" o en "U" no sólo son idóneas para proteger el patio del alisio sino que ayudan a verter el agua de las azoteas al patio interior bajo el cual se ubica el aljibe.

El aljibe es un depósito o cisterna subterránea cuyo fin es almacenar agua, en este caso de lluvia. Se sitúa bajo el patio principal o en el patio entre varias construcciones de una misma vivienda [CÁRDENAS Y CHÁVARRI, J. de, et al., 2007a].

Este tipo de infraestructuras hidráulicas se fabricaban con *mezcla real* -cal mezclada con arena y aglutinada con arcilla- ya que "queda mejor que con cemento, se estalla menos" [MIRELES BETANCOR, F. M., 2011], y de vez en cuando se le echaba una piedra pequeña de cal viva al agua del aljibe para que desinfectase el agua [CÁRDENAS Y CHÁVARRI, J. de, et al., 2007b].

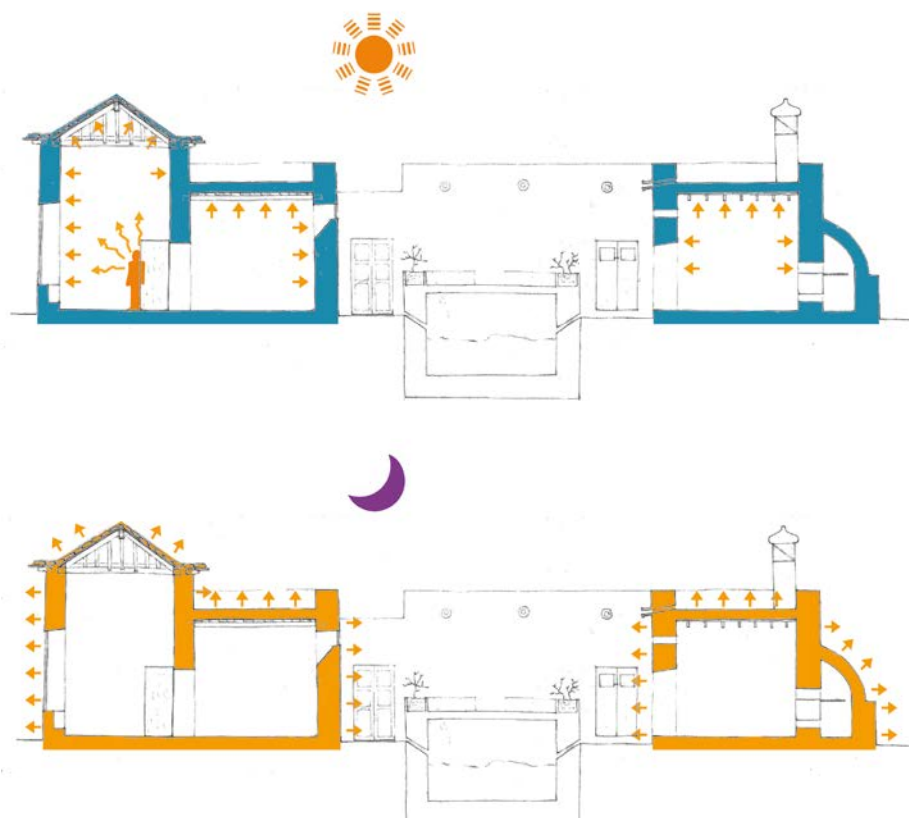


Figura 3. Refrigeración por alta masa térmica: Ante necesidades moderadas de disipar calor se puede aprovechar la gran capacidad de la masa de los cerramientos del recinto para absorber calor. Si paredes, suelo y techo están más frescos que el aire, se reduce la sensación térmica. Pero requiere mucha masa para disipar el calor absorbido, generalmente de noche, al bajar las temperaturas exteriores. Autores: Eduardo Martín del Toro y Sara Acosta Pérez.

Las azoteas poseen una ligera pendiente hacia los desagües, que lanzan el agua al patio a través de las gárgolas o caños. El exterior de la cubierta se encala para favorecer la escorrentía y evitar su filtración, que con una ligera pendiente facilita la conducción del agua hacia las gárgolas, que la vierten al patio.

El patio y los alrededores de la casa se pavimentan con una torta de barro y cal para poder recoger el agua de la lluvia limpia y desinfectada y conducirla, mediante la pendiente del patio y pequeños muretes y maromas tendidas para la ocasión, hasta el caño del aljibe.

El patio genera un espacio protegido del sol, con la presencia del aljibe para la recogida de aguas que, junto con algo de vegetación -como un parral o algún árbol-, aporta frescor y humedad al ambiente del mismo constituyendo el mejor regulador de la temperatura. En climas secos, o que tienden a secos en época estival, un aumento controlado de la humedad relativa del aire permite capturar la energía del ambiente para mejorar los niveles de confort.

El patio es un fenómeno bioclimático excepcional capaz de intervenir directa o indirectamente en el acondicionamiento de los edificios, en ocasiones, colaborando en el mejor funcionamiento de algunas estrategias bioclimáticas y, en otras, con aportaciones propias.

En el patio, el empleo de vegetación, de agua y la radiación nocturna con el embolsamiento de aire frío lo convierten en una estrategia imprescindible en climas calurosos.

En verano, la evapotranspiración -fenómeno conjunto de evaporación directa más la transpiración de la vegetación- [RODRIGUES DE SOUSA MACANJO FERREIRA, D. y COSTA SOBRINHO CORREIA, R.A., 2013] que se produce en los patios por la presencia del agua de los aljibes, junto con la vegetación hará que disminuya la temperatura del patio creando una zona de altas presiones que provoca la succión del aire que se encuentra a nivel superior. Con la abertura de ventanas o puertas en el patio, el aire entrará por la casa pudiendo recurrir a la ventilación cruzada por medio de la abertura de ventanas u otro tipo de vanos en paredes opuestas.

En invierno, la temperatura del patio será también mayor que la temperatura del aire exterior.

Conclusiones

Canarias es un territorio fragmentado, con recursos naturales muy limitados. La arquitectura tradicional canaria cuenta con escasos medios materiales y económicos, reduciéndose al mínimo el número de materiales empleados e incluso la calidad de éstos. Sin embargo, posee una gran riqueza en variedad y lenguajes, y de sus espacios arquitectónicos en cuanto a la ordenación y la configuración, siendo uno de los elementos más importantes del patrimonio cultural de Canarias y -por supuesto- del paisaje de las islas.

Las condiciones climáticas y orográficas del entorno canario han generado que su arquitectura se entienda claramente como propia, aunque elaborada. A pesar de admitir corrientes exteriores de variados orígenes, la fuerte personalidad del medio de nuestro archipiélago la ha evolucionado a modelos adaptados al lugar, diversificando su respuesta a medida que se asentaba en uno u otro microclima.

Como hemos visto, la arquitectura tradicional del archipiélago intenta resolver su adaptación al microclima local con todos los medios a su alcance, siendo la cal un elemento versátil que aporta muchas ventajas y otorga gran calidad a la construcción.

Es evidente que, por sus ventajas y su actual comercialización, el uso de cal es una posibilidad muy real incluso en la construcción convencional. Así que al margen de la bioconstrucción y la rehabilitación hay un abanico muy amplio de posibilidades para un uso habitual y fácil de la cal.

Existe la imperiosa necesidad de rescatar las técnicas y soluciones que las generaciones anteriores habían adoptado y de explotar sus ventajas. No se trata de copiar los diseños y las soluciones antiguas, sino de aprovechar esos principios e integrarlos en la arquitectura contemporánea.

Agradecimientos

A la arquitecta Sara Acosta Pérez por su ayuda en la edición y mejora gráfica de los dibujos.

Bibliografía

Arquitectura en Fuerteventura. Fuerteventura-tour.com (sin fecha). <http://www.fuerteventura-tour.com/es/arquitectura.php>. Julio 2015.

Conceptos bioclimáticos en la arquitectura contemporánea: El edificio EREN, (sin fecha). S.I.: Regional de Energía de Castilla y León.

<http://biourbhost.net/descargas/Edificio%20EREN/BIOURB%20Folleto%20Edificio%20bioclim%C3%A1tico%20EREN.pdf>.

AA. VV., (2008). *El patrimonio troglodítico de Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria: Asociación Insular de Desarrollo Rural de Gran Canaria.

AA. VV., (2009) *Guía práctica para los morteros con cal*. Madrid: Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE)

ALONSO FERNÁNDEZ-ACEYTUNO, J. M., (1979). *Estudio sobre arquitectura popular Fuerteventura (Islas Canarias)*. Las Palmas de Gran Canaria: Colegio Oficial de Arquitectos de Canarias. Colección ARCHIVO HISTORICO, 2.

ÁLVAREZ-UDE, L., CASANOVAS, X., CUCHÍ, A., BALDRICH, X., GARCÍA DE VINUESA, L. y DÍAZ FERIA, L., (2004). *Análisis de los materiales empleados en la edificación en la isla de Lanzarote desde una perspectiva medioambiental* Las Palmas de Gran Canaria: Caja Insular de Ahorros de Canarias. Equipo Life 2001-2004.

BRÜEMMER M., (2003/2004) *La cal. Pequeña guía de la cal en la construcción*. Rincones del Atlántico, nº 1, pp. 112-115.

CÁRDENAS Y CHÁVARRI, J. de, GIL CRESPO, I.J. y MALDONADO RAMOS, L., (2007a). *Arquitectura popular de Lanzarote*. Madrid: Fundación Diego de Sagredo.

CÁRDENAS Y CHÁVARRI, J. de, MALDONADO RAMOS, L., y GIL CRESPO, I.J. (2007b). *La ingeniería tradicional del agua en Lanzarote*. V Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 7-9 junio 2007, Burgos. pp. 183-194.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, J. J., (2008). *Detrás del muro: razón de ser y valoración de la arquitectura tradicional*. Catharum: revista de ciencias y humanidades, nº 9, pp. 5-16.

GIL CRESPO, I.J. (2014). *El lenguaje vernáculo de las ventanas tradicionales canarias: antecedentes, tipología y funcionamiento bioclimático*. Anuario de estudios Atlánticos, nº 60, pp. 817-858.

GONZÁLEZ, C, (2015). *La cal como motor económico tras la conquista*. Mi Pueblo Fuerteventura, nº 46, Ediata Ana Notario, pp. 6-7.

LEÓN ESPINOSA, R. E., (s.f.). *La arquitectura tradicional y Canarias* en Atlas rural de Gran Canaria. AIDER Gran Canaria Asociación Insular de Desarrollo Rural de Gran Canaria, pp. 44-47. [http://www.aidergc.com/documentos/GC%20isla%20rural%20FINAL%20\(1\).pdf](http://www.aidergc.com/documentos/GC%20isla%20rural%20FINAL%20(1).pdf)

MANZANO CABRERA, J. L. y MIRELES BETANCOR, F. M., (2017). *Incidencias de la cal En el paisaje tradicional de Gran Canaria*. El Pajar. Cuaderno de etnografía de Canarias, III Época, nº 32, A. C. "Pinolere. Proyecto Cultural", pp. 121-139

MARTÍN DEL TORO, E., (2018a). *Materiales sostenibles*. Sustentable & Sostenible. <https://blog.deltoroantunez.com/2018/01/materiales-sostenibles.html>. Enero 2018.

MARTÍN DEL TORO, E., (2018b). *Estudio del comportamiento bioclimático de un inmueble previo a su rehabilitación*. Sustentable & Sostenible.

<https://blog.deltoroantunez.com/2018/02/estudio-del-comportamiento-bioclimatico.html>.
Febrero 2018.

MARTÍN RODRÍGUEZ, F.G. (1978). *Arquitectura doméstica canaria*. Santa Cruz de Tenerife: Aula de Cultura de Tenerife.

MIRELES BETANCOR, F. M., (2011). *Juan de León y Castillo, y el uso tradicional de la cal*. I Jornadas de Cultura del Agua. <https://jornadasdeculturadelagua.wordpress.com/2012/07/10/el-ingeniero-juan-de-leon-y-castillo-y-el-uso-hidraulico-de-la-cal-por-francisco-mireles-betancor>.
Enero 2018.

NEILA GONZÁLEZ, F.J., (2013). *Las casas cueva granadinas*. Sostenibilidad de Javier. <http://sostenibilidadjavierneila.blogspot.com.es/2013/12/las-casas-cueva-granadinas.html>.
Mayo 2015.

PALENZUELA ILLÁN, J., (2014). *Las ventajas de la CAL*. De cal y canto. <https://decalycanto.es/las-ventajas-de-la-ca>. Marzo 2018.

PÉREZ ROMERO, M. (2004). *La vivienda Lanzaroteña*. en NEILA GONZÁLEZ, F.J. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Lería. pp. 31-34.

ROBADOR GONZÁLEZ, M. D., (2015). *Sostenibilidad de la luminosa cal en la arquitectura*. 2º Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes. Sevilla. Chapter I: Building Refurbishment. pp. 124-135.

RODRIGUES DE SOUSA MACANJO FERREIRA, D. y COSTA SOBRINHO CORREIA, R.A., (2013). *Manual para la conservación y rehabilitación de la diversidad bioconstructiva*. Bragança (Portugal): Câmara Municipal de Bragança (CMB).

SABATÉ BEL, F., (2008). *El territorio rural como encuentro entre la naturaleza y la cultura humana: Reflexiones sobre su construcción histórica y su crisis contemporánea*. Rincones del Atlántico, nº 5, pp. 80-129.

SANTANA RODRÍGUEZ, R., PÉREZ LUZARDO, J.M. y PÉREZ-LUZARDO DÍAZ, J., (2011). *El hábitat troglodita en Gran Canaria: Evolución del hogar desde tiempos prehistóricos*. Almogaren, nº 42, pp. 89-108.

TOVAR ALCÁZAR, R. (2017). *La cal en la arquitectura bioclimática*. Foccal: México. http://www.foccal.org/descargas/ART-CAL-BIOCLIMATICA_0.pdf. Febrero 2018.

USEDÓ VALLES R. M., (2015). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*. Proyecto final máster. Máster en Conservación del Patrimonio Arquitectónico. Universitat Politècnica de València. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. <http://hdl.handle.net/10251/60200>. Diciembre 2017.



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Aplicaciones diversas de la cal

Cales aéreas especiales para morteros: el ejemplo de morteros de relleno para túneles

Didier Lesueur⁽¹⁾, Ulrike Peter⁽²⁾, Marion Lorgouilloux⁽³⁾, Fernando Moreno⁽⁴⁾

(1) Lhoist, Francia, didier.lesueur@lhoist.com

(2) Lhoist, Bélgica, ulrike.peter@lhoist.com

(3) Lhoist, Bélgica, marion.lorgouilloux@lhoist.com

(4) Lhoist, España, fernando.moreno@lhoist.com

Resumen

La cal aérea siempre ha sido un material utilizado para fabricar morteros. Desde el primer uso conocido como “ligante”, durante el sexto milenio antes de Cristo, la mayoría de los morteros antiguos de Europa, se basaron en la utilización de cal aérea.

A lo largo del tiempo la cal aérea empleada en la fabricación de los morteros, ha evolucionado muy poco y los procedimientos industriales de producción utilizados en la actualidad, no han cambiado de forma sustancial, salvo para obtener producciones a mayor escala y homogeneizar la calidad. En consecuencia los morteros a base de cal aérea que se formulan en nuestros días, utilizan una cal muy parecida a la que se usaba hace siglos.

En este contexto resulta muy interesante ver, como tecnologías avanzadas en la hidratación de la cal, consiguen controlar al mismo tiempo el tamaño de las partículas y su superficie específica, permitiendo el desarrollo de nuevas formulaciones con altas prestaciones, compatibles con el uso moderno de adiciones y aditivos.

En este artículo se describen los recientes resultados obtenidos al utilizar novedosas cales aéreas y su interés en la formulación para morteros. Se desarrolla su uso a gran escala en morteros muy específicos, como son los “morteros de relleno” en túneles. También se describen ejemplos recientes de su utilización en este tipo de obras, como: la del “Groene Hart Túnel” en Países Bajos, o la de la galería de seguridad del “Túnel de Fréjus” en Francia.

Palabras clave: Cal; Mortero; Relleno; Túnel; Formulación

Introducción

La cal aérea siempre ha sido un material utilizado para fabricar morteros. Desde el primer uso conocido como “ligante”, durante el sexto milenio antes de Cristo, la mayoría de los morteros antiguos de Europa, se basaron en la utilización de cal aérea [Carran et al., 2012].

A lo largo del tiempo la cal aérea empleada en la fabricación de los morteros, ha evolucionado muy poco y los procedimientos industriales de producción utilizados en la actualidad, no han cambiado de forma sustancial, salvo para obtener producciones a mayor escala y homogeneizar

la calidad. En consecuencia los morteros a base de cal aérea que se formulan en nuestros días, utilizan una cal muy parecida a la que se usaba hace siglos.

En paralelo, el desarrollo del cemento moderno ha focalizado el interés técnico en desarrollar nuevas fórmulas utilizando nuevos aditivos para el hormigón, en vez de optimizar las fórmulas tradicionales con cal. Recientemente, se ha vuelto a considerar la cal con interés, ya que aporta propiedades como la estética, la manejabilidad, la ductilidad, la porosidad, la capacidad autoreparante, al mismo tiempo que una imagen ambiental positiva [Schlegel & Shtiza, 2014; Peter & Lorgouilloux, 2015].

En este contexto resulta muy interesante ver, como tecnologías avanzadas en la hidratación de la cal, consiguen controlar al mismo tiempo el tamaño de las partículas y su superficie específica, permitiendo el desarrollo de nuevas formulaciones con altas prestaciones, compatibles con el uso moderno de adiciones y aditivos [Peter & Lorgouilloux, 2015].

En este artículo se describen los recientes resultados obtenidos al utilizar novedosas cales aéreas y su interés en la formulación para morteros. Se desarrolla su uso a gran escala en morteros muy específicos, como son los “morteros de relleno” en túneles. También se describen ejemplos recientes de su utilización en este tipo de obras, como: la del “Groenehart Túnel” en Países Bajos, o la de la galería de seguridad del “Túnel de Fréjus” en Francia.

Cales para la construcción

La cal es el nombre genérico del óxido y/o hidróxido de calcio, incluyendo también compuestos similares de magnesio. La cal se produce por la descomposición térmica (calcinación) de carbonato cálcico natural (caliza) o carbonato mixto de calcio y magnesio (dolomita).

Las cales para la construcción vienen definidas en la normativa europea UNE EN 459-1, donde se diferencia entre cales aéreas y cales hidráulicas. Las cales aéreas, de las que hablamos en detalle en este artículo, tienen la particularidad de ser de alta pureza. Solidifican en contacto con el dióxido de carbono presente en el aire, de aquí su nombre [Van Balen, 2005]. Al contrario, las cales hidráulicas solidifican en presencia de agua, al igual que el cemento [Cizer, 2009].

Cales aéreas pueden ser cálcicas (CL) o dolomíticas (DL) y existen en 2 formas:

- La cal viva (Q por su nombre en inglés “Quicklime”), que corresponde al óxido de calcio, que reacciona exotérmicamente con el agua,
- la cal hidratada o apagada (S por su nombre en inglés “Slaked Lime”), que corresponde al hidróxido de calcio obtenido, al reaccionar cal viva con agua (hidratación). La cal hidratada se encuentra en forma de polvo o en forma de suspensión en el agua, donde se llama lechada de cal si fluye con facilidad o pasta de cal si presenta una textura espesa.

La norma UNE EN 459-1 contempla todas las aplicaciones de las cales en el campo de la construcción e ingeniería civil. Las propiedades relevantes para su uso, incluyen sobre todo la composición química y la granulometría. Para la cal hidratada, se contempla también: la humedad, la ausencia de partículas gruesas, la completa hidratación (soundness) y su comportamiento en mortero estándar en fresco (consistencia, demanda en agua y aire).

En este artículo, presentamos a continuación el uso de cales aéreas hidratadas en varios tipos de morteros, vinculados a la construcción o la obra civil [Peter & Lorgouilloux, 2015]. Son casos donde la cal hidratada no se emplea sola, y forma parte de un conglomerante más complejo con presencia de otros compuestos como el cemento, el filler calizo, cenizas volantes y aditivos.

En principio, ciertos de los aglomerantes presentes en las formulaciones estudiadas en este trabajo, podrían ser identificados como cales hidráulicas bajo la denominación de cales formuladas (FL) en la normativa EN 459-1. Pero para eso, deberían de existir como producto industrial antes de mezclarse con el árido, y llevar el adecuado marcado CE. Como eso no ocurrió, y aunque se utilizaron formulaciones hidráulicas, los aglomerantes estudiados siguen siendo mezclas de varios compuestos, incluso cemento, y de cales aéreas con el marcado CE correspondiente.

Cales aéreas hidratadas

Tal y como se ha descrito anteriormente, la cal hidratada o apagada está compuesta en su gran mayoría de hidróxido cálcico $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se trata de un material granular muy fino, cuyas partículas gruesas (granos) se componen de clústeres de partículas submicrónicas aglomeradas (Figura 1a). Esos clústeres son formados por cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que crecen en forma de estructura lamelar alternando capas de Ca^{2+} y OH^- . Eso genera la formación de plaquetas (Figura 1b), y aglomerados en forma de plaquetas (Figura 2a).

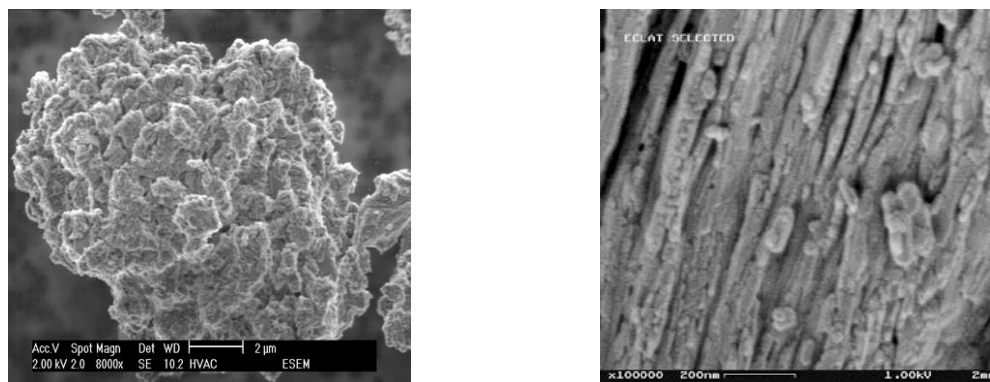


Figura 1: a) Grano de cal hidratada formado por numerosos clústeres (escala: 2 µm). b) Plaquetas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aglomeradas en un clúster (escala: 200 nm).

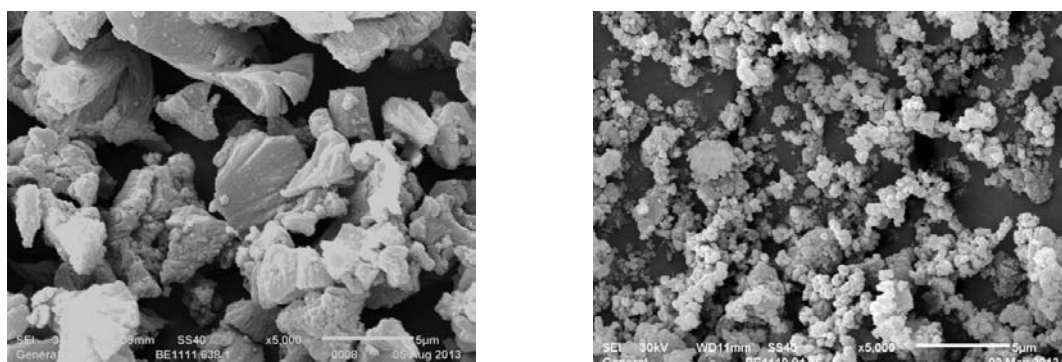


Figura 2: Vista de dos cales hidratadas con microscopio electrónico de barrido (escala: 5 µm).

La cal hidratada puede presentar formaciones variadas en términos de tamaño de partículas y de morfología (Figura 2b). Esto se puede comprobar utilizando técnicas como la granulometría por difusión de luz, donde se observan distribuciones mono- o bi-modales (Figura 3a) o incluso multi-modales (Figura 3b). De forma genérica, los clústeres de cal hidratada tienen un tamaño de partícula de 1 – 10 μm , cuando los granos tienen un tamaño de 20 μm hasta centenas de μm . La distribución de partículas y la morfología tienen un impacto profundo en la manejabilidad de los productos [Sébaïbi et al., 2004].

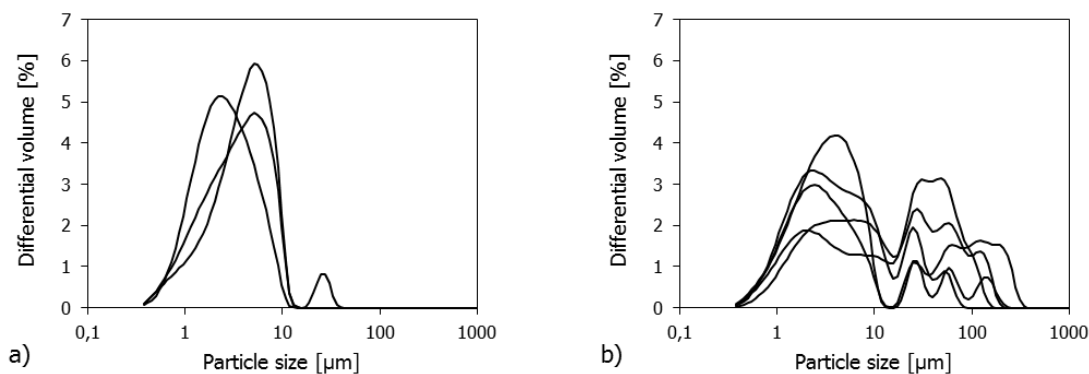


Figura 3: Ejemplos de granulometrías de cales hidratadas obtenidas por granulometría laser. a) Distribuciones mono- o bi-modales. b) Distribuciones multimodales.

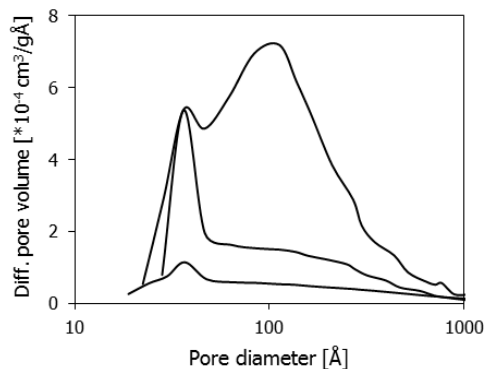


Figura 4: Distribución de tamaño de poros para 3 cales hidratadas medida por adsorción de nitrógeno utilizando el método Barrett-Joyner-Halenda (BJH).

Las características fisicoquímicas de las cales hidratadas dependen de la mineralogía, y de la composición química de la caliza de partida, pero también de parámetros ajenos como : las condiciones de calcinación e hidratación. En consecuencia, una cal hidratada puede tener una porosidad controlada a escala nanométrica (Figura 4). La experiencia del grupo Lhoist en el control de esos parámetros a nivel industrial ha permitido desarrollar un rango de productos especiales con mucho interés para su aplicación en la construcción. Cabe destacar que la actual normativa en vigor (UNE EN 459-1) no permite diferenciar entre esas calidades, ya que todas éstas cales vienen tipificadas como CL 90-S. En éste artículo también se alude a la necesidad de caracterizar las cales a un nivel superior, para permitir optimizar su uso en morteros.

Cales aéreas hidratadas en morteros

El uso de cales hidratadas en morteros tiene como principal objetivo, el control de la consistencia del mortero fresco, la durabilidad y la sostenibilidad de la construcción [Lucideon, 2014]. Para el mortero en fresco, la adición de cal hidratada permite mejorar su manejabilidad y la retención de agua [Singh & Mandal, 1980; Tsimas & Raikos, 1995; Hendrickx et al., 2010]. A más largo plazo, las resistencias mecánicas más bajas asociadas a una mayor ductilidad, permiten aguantar grandes deformaciones, incluyendo la deformación por fluencia y los movimientos debidos a cambios térmicos [Hendry, 2001; Arandigoyen & Alvarez, 2007]. En paralelo, la gran microporosidad aportada por la cal mejora el mortero final, permitiendo un excelente transferencia de humedad [Philippi, 1994; Philippi & Souza, 1995; Mosquera, 2006]. En combinación con la retención de agua, ambos factores justifican que morteros a base de cal se usan con éxito en la formulación de productos tan complejos como son los hormigones de cáñamo [Faure et al., 2012]. Está reconocido que los morteros a base de cal son autoreparantes (“self-healing”), gracias a la disolución y posterior re-precipitación de carbonato cálcico [Lubelli, 2011]. El Análisis del ciclo de vida demuestra el interés medio-ambiental de los morteros a base de cal, comparándoles con morteros a base de cemento, por su capacidad para capturar el dióxido de carbono ambiental [Schlegel & Shtiza, 2014].

La solidificación de los morteros a base de cal aérea se debe a la carbonatación producida en contacto con el dióxido de carbono atmosférico, el cual se disuelve en el agua presente en el interior poroso del mortero. Se ha estudiado en detalle sobre los morteros basados exclusivamente en cal aérea [Van Balen & Van Gemert, 1994; Van Balen, 2005; Lawrence et al., 2006; Lawrence et al., 2007; De Silva et al., 2006] y también utilizando formulaciones que aporten hidráulica, por ejemplo realizando mezclas de cal aérea con puzolanas [Cultrone et al., 2005; Cizer et al., 2010]. Se ha estudiado en varias ocasiones el rol que juega el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante las fases iniciales de la hidratación del cemento [Damidot et al., 1990; Garrault & Nonat, 2001], con la conclusión reciente de que la cal suprime el periodo inicial de inducción típico del cemento y acelera su solidificación [Fourmentin et al., 2015]. No obstante, solo existen unos pocos trabajos publicados sobre la microestructura de los sistemas que contienen cal hidratada y cemento [Sébaibi et al., 2006; Cizer, 2009].

Metodología: Cales especiales

Las prestaciones de los morteros basados en la cal dependen del tipo de cal empleada. Para ilustrar eso, hemos tomado cales industriales fabricadas por el grupo Lhoist en distintas plantas, con distintos procesos de hidratación y con diferentes calidades de calizas de partida. Han sido caracterizados por varios medios (Tabla 1), en particular su densidad aparente según UNE EN 459-2 y su superficie específica medida por adsorción de nitrógeno utilizando el método Brunauer-Emmett-Teller (BET).

Tabla 1: Relación de cales aéreas hidratadas especiales

	Nombre	Densidad g/L	Superficie Especifica m ² /g
Cales Industriales	IL1	556	6,5
	IL2	453	14,0
	IL3	404	22,0
	IL4	266	31,7
	IL5	422	36,2

Se estudiaron esas cales en 2 tipos de fórmulas de mortero: morteros tradicionales de mampostería, sin aditivos, o morteros modernos de revoques con aditivos. La evaluación de los morteros se hizo utilizando la normativa vigente (UNE EN 998-1).

La retención de agua se midió a los 15 minutos sobre el mortero fresco aplicando la normativa ASTM C1506, que da incertidumbres del orden del 1,6 %. Se evaluaron las resistencias mecánicas a flexión y a compresión utilizando la normativa UNE EN 1015-11, con una consistencia del mortero fresco de 175 ± 5 mm según UNE EN 1015-3 (mesa de sacudidas).

Morteros tradicionales de mampostería

En esta sección, se describen resultados con morteros tradicionales tipo 1:2:9, donde se utilizaron 1 volumen de cemento, 2 de cal hidratada y 9 de arena (Tabla 2). La arena empleada era silíceo de grava y el cemento, un CEM I 52,5.

Tabla 2: Composición de los morteros tradicionales y modernos

Ingrediente	Mortero tradicional Contenido en peso %	Mortero moderno Contenido en peso %
Arena cuarcica (0.1/1.2)	83,1	
Arena cuarcica (0.1/0.6)		74,5
Filler calizo (0/0.1)	4,4	
Cal hidratada CL90-S	6,0	12,0
Cemento Gris (CEM I 52.5)	6,5	
Cemento Blanco (CEM I 42.5)		13,0
Derivado celulósico		0,12
Incorporador de aire		0,02
Hidrófugo		0,3

El impacto de la cal hidratada sobre la retención de agua y las resistencias mecánicas se describen en la Figura 5. Se observa que la superficie específica de la cal tiene un efecto muy pronunciado para controlar a la retención de agua (Figura 5a). Aumentar la superficie específica permite una clara mejora de este parámetro, sin afectar a las resistencias mecánicas (Figura 5b). A su vez esta mejora permite en paralelo controlar la porosidad final del mortero, y en consecuencia su capacidad de transporte de agua y sus propiedades térmicas.

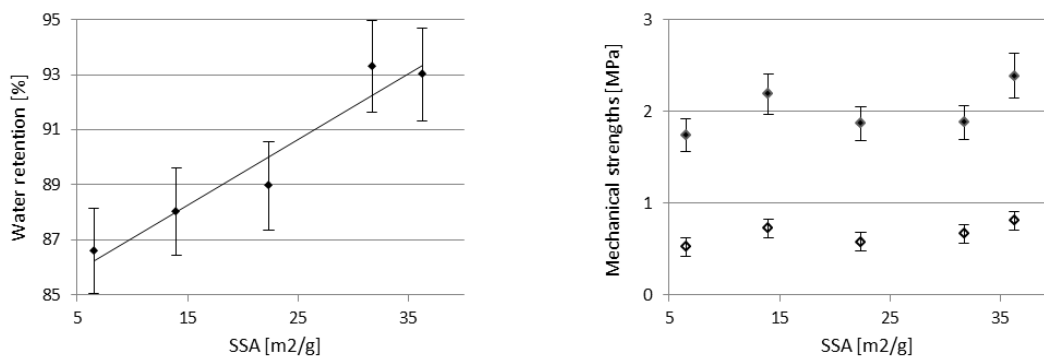


Figura 5: a) Retención de agua b) Resistencia a compresión (Rc, símbolos llenos) y a flexión (Rf, símbolos abiertos) para el mortero tradicional en función de la superficie específica (SSA) de la cal hidratada.

Morteros modernos de revocos

En esta sección, se describen resultados con morteros modernos tipo 1:2:6, donde se utilizaron 1 volumen de cemento, 2 de cal hidratada y 6 de arena (Tabla 2). La arena sigue siendo la misma arena silícea de gravera, pero el cemento es ahora un cemento blanco CEM I 42.5.

El impacto de la cal hidratada sobre la retención de agua y las resistencias mecánicas se describen en la Figura 6. Se observa ahora que la superficie específica de la cal tiene un efecto contrario (Figura 6a) al observado con morteros tradicionales (Figura 5a). En paralelo, las resistencias mecánicas siguen poco afectadas (Figura 6b). Del mismo modo, eso permite en paralelo controlar la porosidad final del mortero, y entonces su capacidad de transporte de agua y sus propiedades térmicas.

Las diferencias entre ambas formulaciones se explican por la presencia de aditivos ; en presencia de altos contenidos de aditivos, la gran superficie específica aportada por la cal genera una fuerte adsorción de esos compuestos. En consecuencia, la cantidad útil para controlar las propiedades del mortero disminuye a medida que crece la superficie aportada por la cal. De aquí la bajada de la retención de agua (Figura 6a).

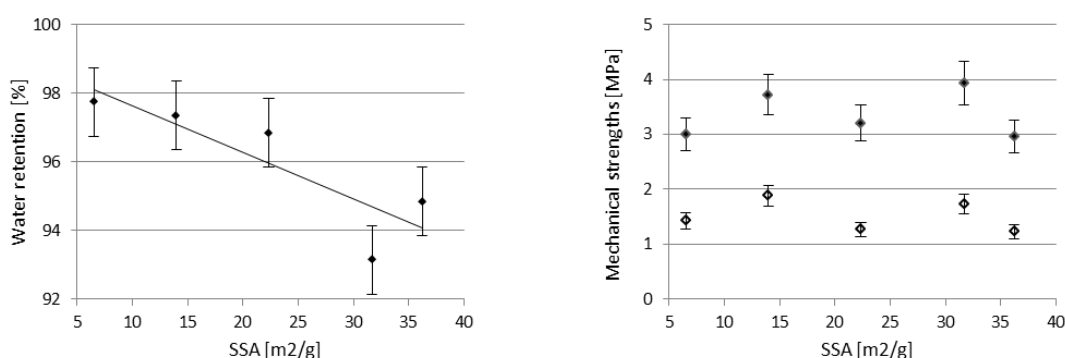


Figura 6: a) Retención de agua b) Resistencia a compresión (Rc, símbolos llenos) y a flexión (Rf, símbolos abiertos) para el mortero moderno en función de la superficie específica (SSA) de la cal hidratada.

Morteros de relleno en túneles

Un ejemplo práctico del uso de esas calces especiales se ilustra ahora con los morteros de relleno de túneles. Son formulas muy específicas, que sirven para llenar el espesor de unos ~10 cm entre las dovelas y el terreno excavado cuando se excava un túnel utilizando una tuneladora. El mortero se suele fabricar fuera del túnel mientras se construye, lo que implica grandes distancias de transporte. En consecuencia, la toma de cohesión no puede ser demasiado rápida (salvo en los arranques o en las fases terminales), ya que no permitiría tener la consistencia necesaria para colocar correctamente el producto. Además, tiene especificaciones mecánicas para garantizar la transmisión de esfuerzos entre el terreno y las dovelas, que entonces dependen de las propiedades mecánicas del terreno. En consecuencia, las especificaciones suelen variar bastante de un túnel al otro, como detallado a continuación con dos ejemplos reales.

Túnel del Groene Hart (NL)

El túnel del Groene Hart, en los Países Bajos, fue excavado entre 2002 y 2004, para permitir la construcción de la línea ferroviaria de alta velocidad entre París y Amsterdam, operada por Thalys desde 2007. Se trata de un túnel de 9 km de longitud entre Rotterdam y Amsterdam, construido por la empresa francesa Bouygues con el apoyo de la holandesa Koop Holding Europe. Los 7,2 km centrales del túnel fueron excavados en arena saturada de agua con la entonces tuneladora más grande del Mundo con escudo de bentonita (sistema Benton'Air del fabricante NFM Technologie) y un diámetro de 14,87 m (Aristaghes, 2004).

Las especificaciones que se exigieron para el mortero de relleno se describen en la Tabla 3. Como queda claro a la vista de esos datos, el control de la reología en fresco tiene bastante importancia.

Se consiguieron las propiedades adecuadas utilizando las formulas descritas en la Tabla 4. En la obra, se utilizó finalmente la cal especial de Lhoist Proviacal[®] SP, con alta superficie específica de 43 m²/g, ya que permitía cumplir todos los requisitos y además permitía rebajar el coste total al utilizar menos cal y menos aditivos [Lesueur et al., 2013]. En efecto, los datos que se detallan en la Tabla 4 demuestran que el uso de cal hidratada convencional Proviacal[®] H, con superficie específica ~15 m²/g, necesita más cal y más aditivos. El efecto dominante es aquel ya demostrado con los morteros tradicionales, donde las propiedades aportadas por si misma por la cal especial, más que compensa la mayor adsorción de aditivos.

Galería de Seguridad del Túnel de Fréjus (F)

La galería de seguridad del túnel de Fréjus se excavo sobre 12,9 km entre 2009 y 2014 en esquistos duros en los Alpes. La galería es paralela al ya existente túnel de Fréjus, que permite el paso por carretera entre la ciudad francesa de Modane y la italiana de Bardonecchia. El consorcio liderado por la francesa Razel-Bec con la alemana Bilfinger-Berger, utilizó una tuneladora para roca dura Herrenknecht de 9,46 m de diámetro.

Las especificaciones para los morteros se describen en la Tabla 3. Cabe destacar que esas especificaciones no son necesariamente las que se cumplieron finalmente, ya que las descritas en la Tabla 4, fueron propuestas por el grupo Lhoist. La fórmula final era bastante parecida, aunque no exactamente, y llevaba otra vez la cal especial de Lhoist Proviacal[®] SP [Lesueur et al., 2013].

Tabla 3: Especificaciones para los morteros de relleno de los túneles del Groene Hart y de la galería de seguridad del túnel de Fréjus.

Propiedad	Groene Hart		Fréjus
	Normal	Break-in / Break-Out	Normal
Permeabilidad (m/s)	< 10 ⁻⁴	< 10 ⁻⁴	
Densidad (kg/m ³)	2 000	2 000	2 000
Punto de flujo (kPa)	> 1,25	> 1,25	
Pérdidas en filtro 7.5 min / 2 bars	a documentar	a documentar	
Estabilidad	< 2 %	< 2 %	< 5 % a 3 horas
Consistencia	45 cm	45 cm	> 20 cm a 5 horas (cono de Marsh de 16 mm)
Fluidez (s)			12-20
Bombeabilidad (horas)	24		
Resistencia a compresión a 20°C (MPa)	0,5 a 90 días	1,5 a 24 horas	1 MPa a 28 días

Tabla 4: Formulas para los morteros de relleno de los túneles del Groene Hart y de la galería de seguridad del túnel de Fréjus.

Ingrediente	Groene Hart		Fréjus
	Fórmula estudiada	Fórmula usada	Fórmula estudiada
Slurry 0/2 (kg/m ³)	820	820	
Gravilla 2/8 (kg/m ³)	400	400	
Arena 0/4 (kg/m ³)			1 170
Proviacal [®] H (kg/m ³)	82		
Proviacal [®] SP (kg/m ³)		65	50
Cenizas volantes (kg/m ³)	300	300	230
Plastificante (l/m ³)	5,6	3,6	4,2
Estabilizante (l/m ³)	0,35	0,2	
Incorporador de aire (l/m ³)			2,8

Conclusión

En este artículo, se han descrito los recientes resultados obtenidos al utilizar novedosas cales aéreas y su interés en la formulación de morteros tradicionales y/o modernos. En el primer caso, el uso de cales especiales, especialmente las de alta superficie específica, permite aportar mejoras sustanciales al mortero como una mejor retención del agua. En el segundo caso, el uso

de cales especiales, especialmente las de baja superficie específica, permite minimizar las interacciones con aditivos.

En el caso práctico de los “morteros de relleno” en túneles, se usó la cal especial de superficie específica Proviacal[®] SP del grupo Lhoist, permitiendo optimizar las formulas finales con un coste total inferior al obtenido con cal estándar, al llevar menos aditivos y rebajar el contenido total de cal.

Finalmente, este trabajo demuestra como tecnologías avanzadas en la hidratación de la cal, consiguen controlar al mismo tiempo el tamaño de las partículas y su superficie específica, lo que permite desarrollar nuevas formulaciones con altas prestaciones, compatibles con el uso moderno de adiciones y aditivos, ampliando de esta forma, las posibilidades de utilización de los morteros a base de cal aérea.

Bibliografía

- Arandigoyen M. & Alvarez J. (2007). *Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars*. Cement and Concrete Research, 37, 767-775.
- Aristaghes P., Autuori P., Blanchet V., Hemery J.-P. & Longchamp P. (2004), *Le tunnel TGV du Groene Hart – Un ouvrage exceptionnel qui ouvre de nouvelles perspectives*. Travaux, 805, 49-52.
- Carran D., Hughes J., Leslie A. & Kennedy C. (2012). *A short history of the use of lime as a building material beyond Europe and North America*. International Journal of Architectural Heritage, 6, 117-146.
- Cizer Ö. (2009). *Competition between carbonation and hydration on the hardening of calcium hydroxide and calcium silicate binders*. PhD dissertation, K.U. Leuven.
- Cizer Ö., Van Balen K. & Van Gemert D. (2010). *Competition between hydration and carbonation in hydraulic lime and lime-pozzolana mortars*. Advanced Materials Research, 133-134, 241-246.
- Cultrone G., Sebastian E. & Huertas M. O. (2005). *Forced and natural carbonation of lime based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes*. Cement and Concrete Research, 35, 2278-2289.
- Damidot D., Nonat A. & Barret P. (1990). *Kinetics of tricalcium silicate hydration in diluted suspensions by microcalorimetric measurements*. J. Am. Ceram. Soc., 73, 3319-3322.
- De Silva P., Bucea L., Moorehead D. & Sirivivatnanon, V. (2006). *Carbonate binders: Reaction kinetics, strength and microstructure*. Cement & Concrete Composites, 28, 613-620.
- Diquélou Y., Gourlay E., Arnaud L. & Kurek B. (2015). *Impact of hemp shiv on cement setting and hardening*. Cement & Concrete Composites, 55, 112-121.
- Faure, P., Peter, U., Lesueur, D., & Coussot, P. (2012). *Water transfers within hemp lime concrete followed by NMR*. Cement and Concrete Research, 42, 1468-1474
- Fourmentin M., Faure P., Gauffinet G., Peter U., Lesueur D., Daviller D. & Coussot P. (2015). *Porous structure and mechanical strength of cement-lime pastes during setting*. Cement and Concrete Research 77, 1-8.
- Garrault S. & Nonat A. (2001). *Hydrated layer formation on tricalcium and dicalcium silicate surfaces: Experimental study and numerical simulations*. Langmuir, 17, 8131-8138.
- Hendrickx R., Roels S. & Van Balen K. (2010). *Measuring the water capacity and transfer properties of fresh mortar*. Cement and Concrete Research, 40(12), 1650-1655.

- Hendry E. (2001). *Masonry walls: material and construction*. Construction and Building Materials, 15, 323-330.
- Lawrence R.M., Mays T., Rigby S., Walker P. & D'Ayala D. (2007). Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. Cement and Concrete Research, 37, 1059-1069.
- Lawrence R.M., Mays T., Walker P. & D'Ayala D. (2006). Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. Thermochemica Acta, 444, 179-189.
- Lesueur D., Joly C., Puiatti D., Verhelst F. & Burdin J. (2013). *Use of special hydrated lime in the design of grouting mortars*. Tunnels et espace souterrain, 235, 35-42.
- Lubelli B., Nijland T. & Van Hees R. (2011). *Self-healing of lime based mortars: microscopy observations on case studies*. HERON, 56, No. 1/2.
- Lucideon. (2014). *Hydrated lime - Benefits of use in mortar*. European Lime Association (EuLA).
- Mosquera M., Silva B., Prieto B. & Ruiz-Herrera E. (2006). *Addition of cement to lime-based mortars : Effect on pore structure and vapour transport*. Cement and Concrete Research, 36, 1635-1642.
- Peter U. & Lorgouilloux M. (2015). *On the impact of hydrated lime in drymix mortars*. 5th International DryMix Mortars Conference. Nürnberg (Alemania).
- Philippi P. & Souza H. (1995). *Modelling moisture distribution and isothermal transfer in a heterogeneous porous material*. Int. Journal of Multiphase Flow, 21, 667-691.
- Philippi P., Rosendo Yunes P., Fernandes C. & Magnani F. (1994). *The microstructure of porous building materials: Study of a cement and lime mortar*. Transport in porous media, 14, 219-245.
- Schlegel T. & Shtiza, A. (2014). *Environmental footprint study of mortars, renders and plasters formulations with no, low or high hydrated lime content*. International Masonry Conference, (p. 530). Guimarães (Portugal).
- Sébaïbi Y., Dheilly R. & Quéneudec M. (2003). *Study of the water retention capacity of lime-sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime*. Cement and Concrete Research, 33, 689-696.
- Sébaïbi Y., Dheilly R. & Quéneudec M. (2004). *A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime*. Construction and Building Materials, 18, 653-660.
- Sébaïbi Y., Dheilly R., Beaudoin B. & Quéneudec M. (2006). *The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime-cement-sand mortar*. Cement and Concrete Research, 36, 971-978.
- Singh V. & Mandal U. (1980). *Effect of lime on the properties of Portland cement*. Transactions of the Indian Ceramic Society, 39, 161-164.
- Tsimas S. & Raikos K. (1995). *Lime, an irreplaceable mortar constituent*. Zement Kalk Gypsum International, 6, 350-356.
- Van Balen K. (2005). *Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature*. Cement and Concrete Research, 35, 647-657.
- Van Balen K. & Van Gemert D. (1994). *Modelling lime mortar carbonation*. Materials and Structures, 27, 393-398.

Propiedades de la cal en pasta obtenida a partir del tratamiento de fosfoyesos de la industria de fertilizantes

M.I. Romero-Hermida ⁽¹⁾, A. Santos ⁽²⁾, L. Esquivias ⁽³⁾, V. Flores-Alés ⁽⁴⁾ y F.J. Alejandro ⁽⁵⁾

(1) Dpto. de Física de la Materia Condensada, Universidad de Sevilla, España, isaromerohermida@us.es

(2) Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, España, alberto.santos@uca.es

(3) Dpto. de Física de la Materia Condensada, Universidad de Sevilla, España, luisesequivias@us.es

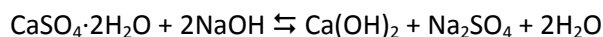
(4) Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II, Universidad de Sevilla, España, vflores@us.es

(5) Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II, Universidad de Sevilla, España, falejan@us.es

Resumen

El proceso industrial de fabricación de ácido fosfórico tiene como materia prima principal la roca fosforita, compuesta mayoritariamente por apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$); produciéndose el ácido fosfórico por un lado y por otro un subproducto formado principalmente por sulfato hidratado de calcio, denominado fosfoyeso.

La producción de ácido fosfórico en Huelva (SO España) ha sido objeto de controversia por la formación de balsas de este subproducto, sin suficiente control, en las marismas de la desembocadura del río Tinto. Un grupo de investigadores liderados desde el Dpto. de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Sevilla ha desarrollado un procedimiento sencillo y muy eficiente de obtención de portlandita, en forma de pasta de cal, como producto de la reacción química de una disolución de fosfoyesos con una solución de sosa alcalina:



Como es previsible, la portlandita obtenida es susceptible de carbonatación, actuando como sumidero para el secuestro mineral de CO_2 . Esta metodología tiene el potencial de reducir simultáneamente dos problemas ambientales: la gestión de los residuos industriales peligrosos; y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este trabajo presenta la caracterización química, mineralógica, morfología y granulométrica del producto obtenido de cara su potencial utilización en aplicaciones relacionadas con el sector de la construcción, considerando inicialmente sus posibilidades como conglomerante y consolidante.

Palabras clave: Cal en pasta; Fosfoyeso; Residuo; Sosa

Introducción

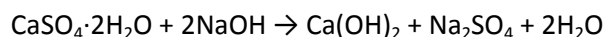
La industria de fabricación de fertilizantes en la provincia de Huelva (España) se basa en una importante producción por vía húmeda de ácido fosfórico a partir del tratamiento con ácido sulfúrico de la roca fosfórica, formada principalmente por el mineral apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) con ácido sulfúrico. Este proceso tiene como resultado la producción de ácido fosfórico y un residuo industrial denominado fosfoyeso, cuya composición básica es un sulfato de calcio hidratado [Chang, 1990]. Los fosfoyesos se llevan a una suspensión con agua y son bombeados a balsas de almacenamiento, donde se produce su decantación y desecación. Actualmente el material almacenado alcanza los 120 millones de toneladas y ocupa un área de 1.200 hectáreas en una zona de marismas próxima al río Tinto [Bolívar et al., 2009] (Figura 1).



Figura 1. Mapa de localización de las balsas de fosfoyeso (Fuente: Google Maps)

Este residuo, en cuya composición aparecen impurezas metálicas tóxicas y radionúcleidos de origen natural, ha sido acumulado a lo largo de años en balsas al aire libre con el consiguiente conflicto social y medioambiental. Las características de estos residuos hacen que en la industria de producción de ácido fosfórico esté considerada como “Naturally Occurring Radioactive Material” (NORM). En el caso particular que nos ocupa, los fosfoyesos resultantes concentran importantes cantidades de isótopos de ^{226}Ra , ^{238}U , ^{230}Th y ^{210}Pb - ^{210}Po , que precipitan con el fosfoyeso por su similitud con el calcio [Pérez-López et al., 2010] y cuya presencia debe ser considerada en su gestión y tratamiento [Periañez et al., 1996; Tayibi et al., 2009].

Resulta crucial encontrar alternativas para una menor gestión de estos residuos. En el marco de la necesidad de avanzar en una tecnología científica que permita su tratamiento como subproducto para otros procesos industriales, se ha desarrollado un procedimiento simple que permite la disolución de los fosfoyesos en una solución de hidróxido sódico obteniéndose sulfato de sodio y un precipitado de hidróxido de calcio (portlandita) [Cárdenas-Escudero et al., 2011; Romero et al., 2014]:



Esta reacción tiene una doble ventaja, por una parte provoca la precipitación de los isótopos presentes en los fosfoyesos [Haridasan et al., 2001] y por otra tiene como resultado un producto, la pasta de cal, con una interesante versatilidad de posibles aplicaciones relacionadas con la industria de la construcción. Resultados previos han demostrado un alto rendimiento en la reacción de precipitación del hidróxido de calcio y la transferencia de los metales pesado al producto sólido, de manera que se consigue un interesante grado de estabilización, frente a la peligrosidad que supone su presencia en estado fluido con el consiguiente riesgo derivado de las lixiviaciones [Contreras et al., 2015]. De acuerdo con las regulaciones de la UE, las muestras de cal en pasta obtenidas son materiales NORM y debe controlarse para cualquier aplicación comercial.

Una ventaja añadida al proceso es el gran capacidad potencial de carbonatación del hidróxido obtenido, lo que supone un aporte medioambiental positivo por el secuestro mineral de CO₂ a partir de un residuo potencialmente peligroso.

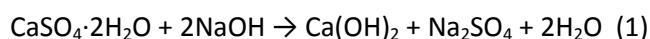
En este trabajo se presenta el estudio de caracterización química, mineralógica, textural y granulométrica de la pasta de cal obtenida por precipitación a partir del tratamiento de fosfoyesos procedentes de la producción de ácido fosfórico mediante su dilución en Na(OH), con el objetivo de comparar sus propiedades con las de las cales en pasta empleadas en construcción y obtenidas mediante el proceso de hidratación del óxido de calcio o cal viva.

Materiales

Síntesis de la cal en pasta a partir de los fosfoyesos

El proceso que se ha utilizado para la obtención de la cal en pasta está basado en el método propuesto por Cárdenas-Escudero [2011]. Se han realizado algunas modificaciones respecto a su metodología inicial debido a la necesidad de un escalado que permitiera pasar de la generación de gramos de subproductos (escala laboratorio) a kilogramos (previa a una planta piloto).

En una primera etapa se han disuelto 300g de fosfoyesos PG (~ 96% en peso de CaSO₄·2H₂O) en 500 ml de H₂O destilada bajo agitación magnética, obteniéndose una suspensión después de la agitación. Por otro lado, a dicha suspensión se le añade una disolución alcalina 9M de Na(OH) (pellets PA-ACS-ISO, PANREAC Química SAU, 98% chemical purity) muy lentamente para favorecer la cristalización de la fase sólida. La mezcla se mantiene a presión y temperatura ambiente bajo agitación magnética durante aproximadamente 10 min. La reacción química asociada a este proceso químico se describe a continuación:



Este proceso da como resultado la disolución del PG y la precipitación de una fase sólida de color blanquecino etiquetada como "C_S" formado por cal en pasta y un líquido sobrenadante transparente designado como "C_L". La fase sólida "C_S" se ha obtenido por centrifugación durante 5 min a 3000 rpm y la fase líquida se ha descartado ya que no es objeto de nuestro estudio (véase esquema del proceso Fig. 2 y Tabla 1).

La muestra “C_S” se ha llevado para su análisis mediante difracción de rayos X (XRD) (Fig.3) y fluorescencia de rayos X (XRF) (Tabla 2). Se tomaron varias muestras de la fase sólida para su estudio. Se secaron en una estufa a 40° C y se mantuvo en ella a esas condiciones para evitar la hidratación y la carbonatación debido a humedad y el CO₂ atmosférico. Dicha muestra fue lavada cinco veces y etiquetada como “C_W”, donde se analizó por XRF (Tabla 2). Además, se hizo un estudio mediante XRD de la pasta de cal sin hacer un secado previo, para determinar si la manipulación previa de la muestra afecta a los parámetros de nuestro estudio. Dicha muestra la etiquetaremos como “C_P”.(Fig. 4)

Precipitación de los sulfatos solubles

Considerando la conocida influencia del sulfato de sodio en el deterioro de los materiales de construcción [Rodríguez-Navarro et al., 2000; Camuffo et al., 2010] se decidió emplear el método del bario [Hansen et al., 2003], como tratamiento complementario al lavado con agua, para precipitar los sulfatos solubles restantes en forma de sulfato de bario (barita) con un K_{sp} = - 9.96 a 25°C. Para esta segunda etapa, se han tomado 600g de muestra de cal en pasta obtenida en la primera etapa con un contenido en agua del 50% y a continuación se le ha añadido una disolución alcalina de hidróxido de bario (Ba(OH)₂·8H₂O, PANREAC) en relación molar Ba²⁺/SO₄²⁻= 1.4 en 700ml de agua destilada.

La mezcla que se obtiene se ha mantenido a temperatura y presión ambiental bajo agitación magnética durante aproximadamente 20 min. De este proceso químico se ha conseguido la precipitación de una fase sólida de color blanquecino que etiquetaremos como “B_S” y un líquido sobrenadante transparente que etiquetaremos como “B_L”. La fase sólida se ha obtenido por centrifugación durante 5 min a 3000 rpm y la fase líquida se descartó (Fig. 2 y Tabla 1). La reacción química asociada a este proceso químico se describe a continuación:



Se tomaron varias muestras para su estudio, se secaron en una estufa a 40°C, donde se mantuvieron para preservar su posible hidratación y carbonatación debido a las condiciones ambientales. La muestra “B_S” fue llevada para su análisis mediante XRD (Fig. 5).

Tabla 1. Condiciones experimentales que se han llevado a cabo en ambas etapas.

PRIMERA ETAPA		SEGUNDA ETAPA	
CaSO ₄ ·2H ₂ O+2NaOH→Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ +2H ₂ O		Na ₂ SO ₄ +Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O→BaSO ₄ +2Na(OH)+8H ₂ O	
CaSO ₄ ·2H ₂ O+2NaOH		Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ +Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	
CaSO ₄ ·2H ₂ O	NaOH	Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄	Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O
Masa=300g Vol. H ₂ O= 500mL	Masa= 180g Vol. H ₂ O= 500mL	Masa= 300g [SO ₄ ²⁻]=2,6%	Masa = 36g Vol. H ₂ O= 700mL [Ba ²⁺ /SO ₄ ²⁻] = 1,4

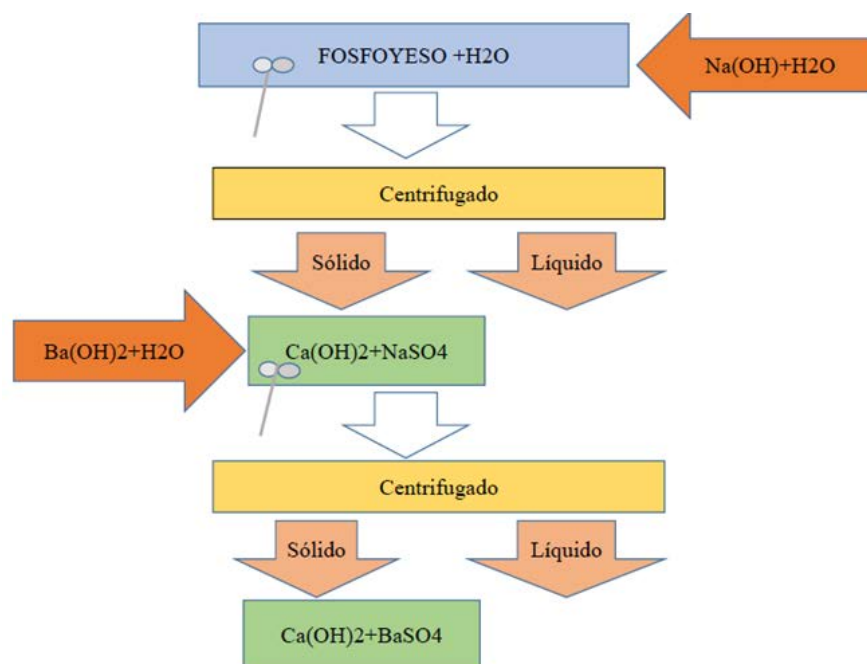


Figura 2.: Esquema del proceso químico para obtener la cal y precipitación de sulfato de sodio

Metodología

Para el análisis químico de las muestras se ha empleado un equipo de FRX marca Panalytical modelo AXIOS con un tubo Rh, que permite el análisis cuantitativo de los elementos químicos mayoritarios y minoritarios.

El estudio de las fases cristalinas y de otros aspectos relacionados con la forma y tamaño de los cristales de la cal, se ha desarrollado mediante XRD con un equipo BRUKER D8-Advance, con radiación Cu-K α , $\lambda_{\alpha 1}$ 0.154 nm, a partir de 10.00° a 70.00°, $\Delta(2\theta) = 0.015^\circ$, y durante un tiempo de 80 s. Este equipo consta de un detector lineal modelo Lynxeye de BRUKER y con montaje con filtro de níquel en el haz incidente para reducir la radiación K β del cobre. El análisis de los resultados se ha utilizado el software X'Pert HighScore y la identificación de las fases se ha realizado por comparación directa de los difractogramas obtenidos con las fichas estándar correspondientes, disponibles en la base de datos de la JCPDS-ICDD (Joint Committee on Powder Diffraction Standards - International Centre for Diffraction Data). Mediante DRX además de identificar los distintos compuestos cristalinos presentes en la muestra a través de la interpretación del espectro de difracciones producidas, el análisis de la anchura de los picos a mitad de altura nos ofrece información sobre el grado de cristalinidad de las fases cristalinas, aunque además de las diferencias de cristalinidad, influyen otros factores como la forma y tamaño de distintas fases minerales, orientación, manipulación previa de las muestras y también se puede establecer cuáles son los planos cristalográficos desarrollados de forma preferente en las distintas sustancias cristalinas.

La morfología de las muestras se ha caracterizado por microscopía electrónica de barrido con cañón de emisión de campo (SEM-FEG), con un microscopio Hitachi S5200, usando una aceleración de voltaje de 5 kV.

Finalmente, la granulometría por difracción láser mediante un equipo Mastersizer Malvern ha permitido conocer el tamaño de partícula y la distribución granulométrica. Este aparato utiliza una metodología de difracción y dispersión de luz láser. Este fenómeno se produce cuando un haz de luz atraviesa una suspensión de partículas e incide con ellas, produciendo un patrón de dispersión susceptible de ser analizado cuantitativamente. Se ha seguido el siguiente protocolo basado en el de Rosell [2003]:

- a) Todas las muestras se han realizado mediante el análisis vía húmeda.
- b) Una pequeña alícuota de muestra se coloca en vaso de precipitado donde se dispersa en una pequeña cantidad de agua destilada para homogeneizar la muestra.
- c) Seguidamente se coloca en un baño de ultrasonido a intensidad máxima para evitar la aglomeración de partículas. El tiempo de ultrasonido ha sido en nuestro caso de 5, 10 y 15 min en tres experimentos distintos.
- d) Se toma pipeteando una cierta cantidad de muestra ya homogeneizada y se dispersa con un agitador del Mastersizer a una velocidad de 2500 rpm en una cubeta con 100 ml de agua destilada o en otros casos el dispersante considerado.
- e) Una vez estabilizado el sistema se procede a su lectura mediante el software del equipo y se procede a gravar los resultados dos veces o varias veces consecutivas, utilizando como resultado final de la medición el promedio de todas las medidas.

Los parámetros de ajuste del Mastersizer son: a) Dispersante agua con índice de refracción $RI=1.33$, dispersante Propan-2-ol con $RI=1.39$; b) Índice de reflexión: 1.5; c) Índice de absorción: 0.01 d) Tiempos de ultrasonido 5, 10 y 15 minutos y e) Los modelos teóricos en los que se basa son los definidos por Fraunhofer y Mie considerándose que el primero de ellos se ajusta más a modelos teóricos de confirmación de partículas esféricas y el segundo, a partículas alargadas.

Resultados

Análisis químico mediante FRX

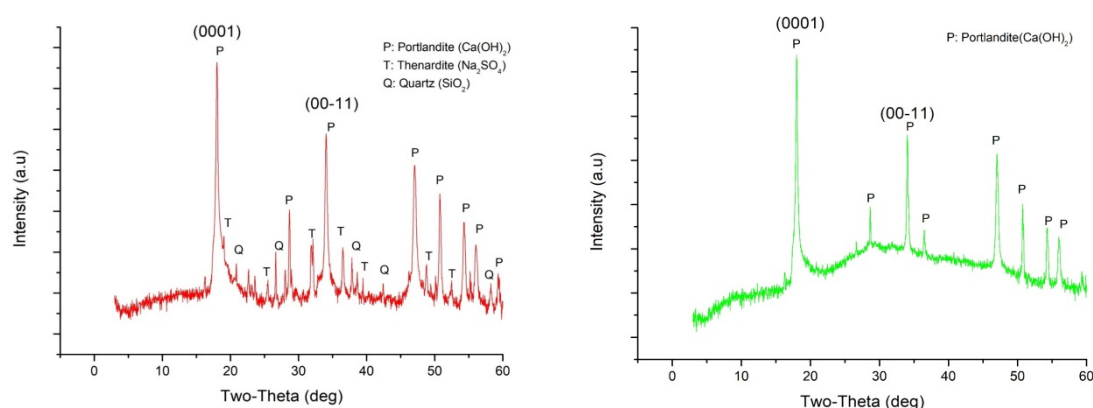
Los resultados obtenidos para el análisis químico de las diferentes muestras se indican en la Tabla 2. En la composición de la cal en pasta C_S obtenida tras la reacción química se puede apreciar la presencia mayoritaria de CaO, atribuible al hidróxido de calcio y la de Na₂O y SO₃ asignable al sulfato de sodio, lo que llevaría a una composición aproximada en torno a un 65% de portlandita y un 30% de sulfato de sodio, con la presencia de impurezas de sílice atribuibles al cuarzo (fig. 3) y de fosfatos (1,02%). En el caso de la muestra de cal en pasta tras varios lavados con agua, se aprecia la disminución del contenido de SO₃ y Na₂O debido a la elevada solubilidad de la thenardita (162 g/l a 20°C) y la baja solubilidad de la portlandita (1.73 g/l a 20°C), lo que llevaría a una composición aproximada de un 88% de hidróxido de calcio y un 3% de sulfato de sodio.

Tabla 2. Análisis químico elemental de las muestras C_S y C_W

Elementos (%)	C_S	C_W
SiO ₂	4,09	1,1
Al ₂ O ₃	0,12	0,26
Fe ₂ O ₃	ND	0,05
MnO	ND	ND
MgO	ND	ND
CaO	49,41	66,8
Na ₂ O	12,43	1,1
K ₂ O	ND	0,02
TiO ₂	ND	0,03
P ₂ O ₅	1,02	1,1
SO ₃	13,56	2,2
Cl	ND	0,05
F	ND	0,74
SrO	ND	0,15
BaO	ND	ND
PC	19,40	26,30

Análisis mineralógico mediante DRX

Los difractogramas y las fases identificadas en C_S (cal en pasta seca), C_P (cal en pasta) y B_S se muestran en las figuras 3, 4 y 5 respectivamente.



Figuras 3 (izda.) y 4 (dcha). Difractogramas y fases cristalinas en las muestras C_S y C_P

Respecto a C_S se puede apreciar la presencia mayoritaria de portlandita y minoritaria de thenardita y cuarzo, resultados acordes con los del análisis químico y con los productos esperables por la reacción química (1). En el caso de C_W, sólo se ha identificado la presencia de portlandita, al haberse eliminado la mayor parte de thenardita por solubilización en agua, quedando su contenido por debajo del límite de detección de la técnica, resultados concordantes con los del análisis químico. Finalmente, para la muestra B_S se aprecia la formación de barita, compuesto insoluble que precipita y se incorpora a la portlandita tras la reacción química (2).

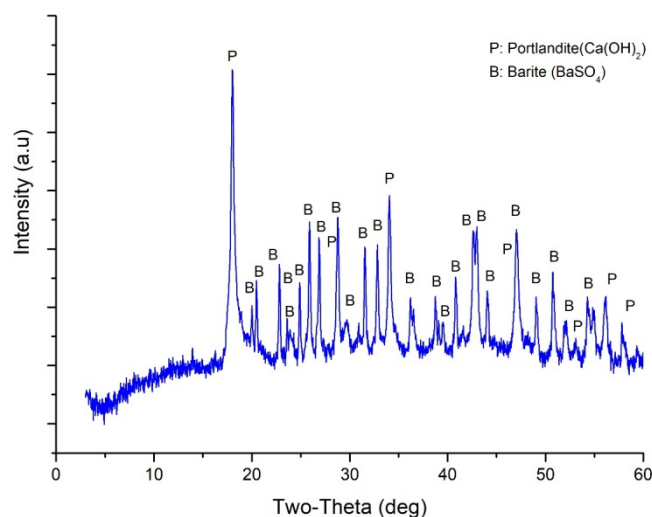


Figura 5. Difractograma y fases cristalinas en la muestra B_S

En el caso de la portlandita los planos más destacados de su estructura cristalina la son los de notación (0001) y (10 $\bar{1}$ 1), siendo comúnmente de mayor intensidad el segundo respecto del primero. Rodríguez-Navarro et al. [1998] establecieron el parámetro $A_{(0001)}$ como indicador de la abundancia de cristales hexagonales tabulares, calculándose según la siguiente fórmula:

$$A_{(0001)} = \frac{I(0001)}{I(10\bar{1}1)}$$

Siendo,

$I(0001)$ intensidad (área integrada de cada pico) de la reflexión a $2\theta = 18^\circ$

$I(10\bar{1}1)$ intensidad (área integrada de cada pico) de la reflexión a $2\theta = 34^\circ$.

Varios autores han indicado que el parámetro $A_{(0001)}$ daba indirectamente un grado de la evolución o envejecimiento de la cal en pasta [Rodríguez-Navarro et al., 1998; Mascolo et al., 2010 y Margalha et al., 2013], de tal forma que mientras más alto es el valor de A, hay más cristales de portlandita con forma de plaquetas, ya que al envejecer los cristales originalmente prismáticos, se separan en placas hexagonales más finas, dicha separación ocurre a lo largo de los planos (0001), que son los planos de exfoliación de dicho mineral.

En nuestro caso para el cálculo del parámetro A se ha realizado la media sobre distintas muestras, tanto en seca como en pasta (Fig. 3 y 4), destacando que los procesos de manipulación y secado no han influido en los resultados obtenidos, obteniéndose un valor medio de $A=3.9$. Como todos los resultados obtenidos arrojan valores mayores que 2 [Rodríguez-Navarro, 1998; Rattazi, 2007] se podría indicar que el método de síntesis seguido favorece el desarrollo de plaquetas hexagonales con preponderancia de los planos (0001) frente a los (10 $\bar{1}$ 1), y que por consiguiente estamos ante la estructura de una cal añeja o envejecida. Sin embargo estudios más recientes [Rosell, 2013] ponen en duda la idoneidad de este parámetro para medir el envejecimiento de una cal.

Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías obtenidas mediante SEM-FEG muestran la abundancia de cristales hexagonales de portlandita muy regulares y bien ordenados de morfología tabular con tamaños en el entorno de $1\ \mu\text{m}$ (Fig. 8A, B y C), apreciándose indicios de laminación en la dirección paralela a (0001) (Fig. 8B). Además se observan plaquetas submicrométricas (Fig. 8C y D) y nanopartículas cristalinas de portlandita (Fig. 8E y F). Las morfologías identificadas guardan similitud con las observadas en las cales en pasta envejecidas [Rodríguez-Navarro et al., 1998; Mascolo et al., 2010; Margalha et al., 2013 y Rosell, 2013], sin embargo, no se aprecian las alteraciones por disolución de aristas y esquinas o fragmentación de cristales descritas por Rosell [2013] producidas durante la evolución de las cales añejas, probablemente por no haber sufrido el proceso de envejecimiento.

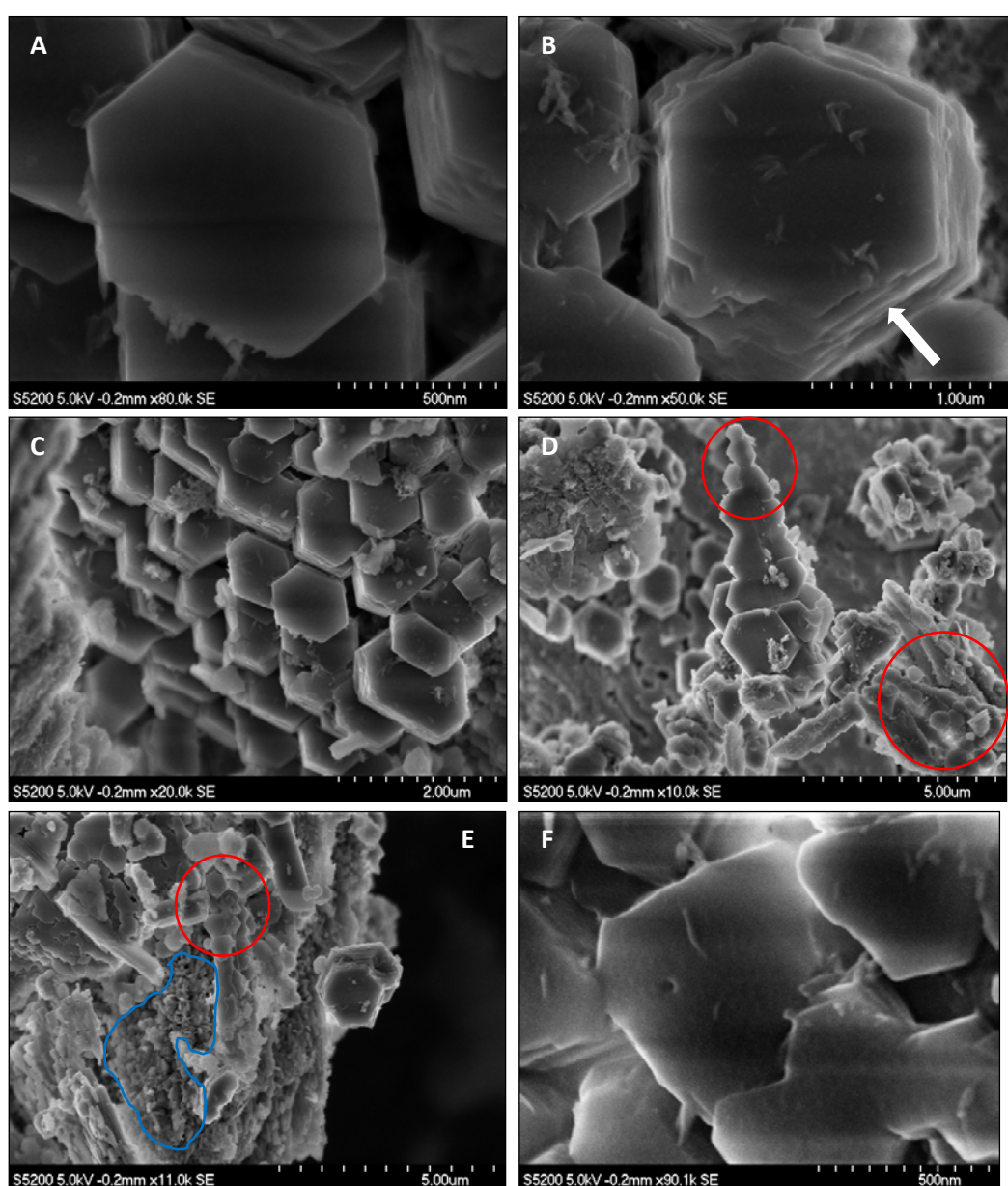


Figura 6. Micrografías de cristales hexagonales de portlandita con hábitos tabulares

Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico con agua y propan-2-ol como dispersante, y con diferentes tiempos de ultrasonidos (0, 5, 10 y 15 min) se muestran en la Fig. 7 y Tabla 3.

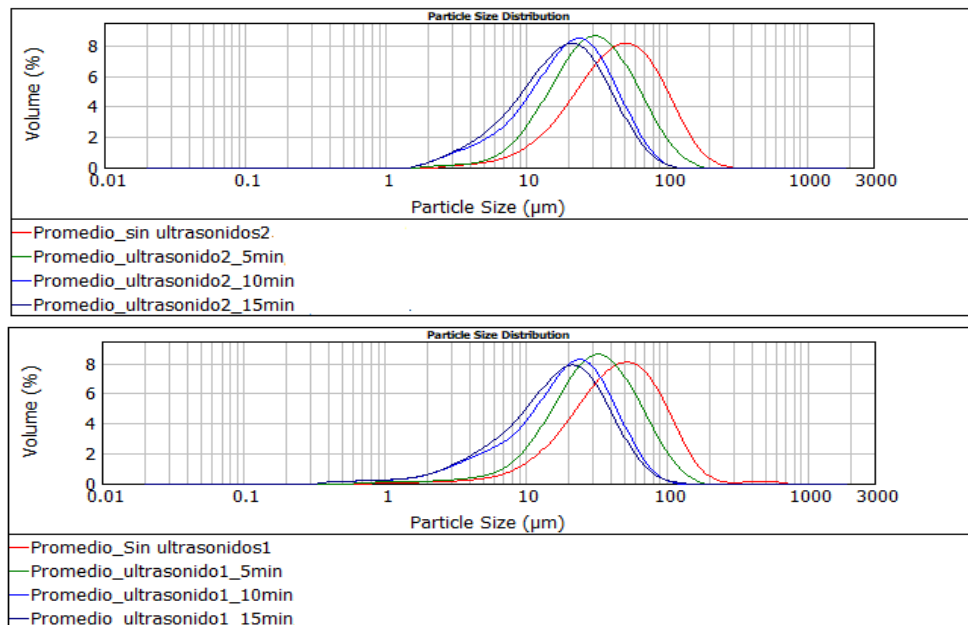


Figura 7. Distribución del tamaño de partículas de la cal con H₂O (sup.) y propanol (inf.)

Tabla 3. Percentiles y tamaños de partícula de la cal dispersa en agua y propanol

Ultrasonidos	H ₂ O Percentil	Propan-2-ol Percentil
0 min	d(0,9)= 99.725µm d(0,5)= 42.584µm d(0,1)=14.926 µm	d(0,9)=108.674µm d(0,5)=45.534µm d(0,1)=15.147µm
5 min	d(0,9)= 72.091µm d(0,5)= 30.516µm d(0,1)=11.353µm	d(0,9)=73.559µm d(0,5)=31.240µm d(0,1)=11.543µm
10 min	d(0,9)=45.614µm d(0,5)=19.686µm d(0,1)=4.856µm	d(0,9)=46.348µm d(0,5)=19.928µm d(0,1)=4.938µm
15 min	d(0,9)=43.493µm d(0,5)=17.902µm d(0,1)=4.847µm	d(0,9)=43.053µm d(0,5)=17.739µm d(0,1)=4.731µm

Los resultados obtenidos indican que no se han producido cambios significativos en la granulometría de la cal cuando el dispersante es propanol en vez de agua. También se puede observar que los tamaños de partícula medidos son muy superiores a los observados mediante SEM-FEG, lo que es indicativo de la existencia de un importante fenómeno de aglomeración de partículas de cal en fase acuosa, hecho que se confirma con el importante descenso del tamaño

de partícula en todos los cuartiles cuando se realiza la medición sin aplicar ultrasonidos o aplicándolos a intervalos de tiempo crecientes.

Conclusiones

En este trabajo se ha realizado la caracterización de una cal en pasta obtenida mediante un novedoso proceso que parte de la reacción de un residuo industrial denominado fosfoyeso con sosa cáustica. Las principales características de la cal en pasta obtenida son:

- Desde el punto de vista químico y mineralógico, la cal en pasta tiene una importante presencia de sulfato de sodio (tenardita) formado como subproducto de la reacción, compuesto que podría ser perjudicial para su aplicación constructiva. Sin embargo, los ensayos de lavado con agua y posterior tratamiento con hidróxido de bario, indican que es posible disminuir su concentración y transformar la cantidad restante en un precipitado de sulfato de bario inerte.
- Mediante DRX se ha calculado el parámetro $A_{(0001)}$ que ha tenido un valor medio de 3.9, indicativo de la preponderancia de los planos (0001) frente a los (10 $\bar{1}$ 1) en los cristales hexagonales de la cal, y que podría ser atribuible a la morfología de las cales en pasta envejecidas.
- El estudio de la textura realizado por SEM-FEG muestra la abundancia de cristales hexagonales de portlandita muy regulares y bien ordenados de morfología tabular con tamaños micrométricos, además se observan plaquetas submicrométricas y nanopartículas cristalinas de portlandita. Las morfologías identificadas guardan similitud con las observadas en las cales en pasta envejecidas.
- Finalmente, el análisis granulométrico muestra la existencia de partículas en el orden de las decenas de micras, que no se corresponden con las observaciones realizadas mediante SEM, y que tienen su justificación en la existencia de un fenómeno de aglomeración. La aplicación de ultrasonidos a las muestras a intervalos de tiempo crecientes han generado una dismiución progresiva de los tamaños de partícula, lo que demostraría la existencia de el citado fenómeno.

Bibliografía

Bolívar, J.P.; Martín, J.E.; García-Tenorio, R.; Pérez-Moreno, J.P.; Mas, J.L. (2009) *Behaviour and fluxes of natural radionuclides in the production process of a phosphoric acid plant*, Appl. Radiat. Isot., 67, 345-356.

Camuffo, D.; Bertolin, C.; Amore, C.; Bergonzini, A.; Brimblecombe, P.(2010) *Thenardite-Mirabilite cycles in historical buildings*, 9th Indoor Air Quality meeting Chalon Indoor Air Quality meeting, 21th-23th April 2010, Chalon-sur-Saone, France

Cárdenas-Escudero, C.; Morales-Flórez, V.; Pérez-López, R.; Santos, A.; Esquivias, L. (2011). *Procedure to Use Phosphogypsum Industrial Waste for Mineral CO₂ Sequestration*. Journal of Hazardous Materials, 196, 431-435.

Chang, Wen F. (1990). *Engineering Properties and Construction Applications of Phosphogypsum*. University of Miami Press.

Contreras Llanes, M.; Pérez López, R.; Gázquez González, M.J.; Morales Flórez, V.; Santos Sánchez, A.; Esquivias, L.; Bolívar J.P. (2015). *Fractionation and fluxes of metals and radionuclides during the recycling process of phosphogypsum wastes applied to mineral CO₂ sequestration*, Waste Management, 45, 412-419.

Haridasan, P.P.; Paul, A.C.; Desai, M.V.M. (2001) *Radionucleidos naturales en el medio acuático de una zona de eliminación de fosfoyesos*, J. Environ. Radioactivo, 53, 155 -165.

Hansen, E.; Doehne, E.; Fidler, J.; Larson, J.; Martin, B.; Matteini, M.; Rodríguez-Navarro, C.; Sebastian Pardo, E.; Price, C.; Tagle, A.; Teutonico, J.M.; Weiss, N. (2003) *A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials*, Reviews in Conservation, nº4, 13-25.

Margalha, M. G.; Silva, A. S.; Do Rosário Veiga, M.; De Brito, J.; Ball, R. J.; Allen, G. C. (2013). *Microstructural changes of lime putty during aging*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (10), 1524-1532.

Mascolo, G.; Mascolo, M. C.; Vitale, A.; Marino, O. (2010) *Microstructure evolution of lime putty upon ageing*, J. Cryst. Growth, 312(16), 2363–2368.

Pérez-López, R.; Nieto, J.M.; López-Coto, I.; Aguado, J.L.; Bolívar, J.P.; Santisteban, M. (2010) *Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): from phosphate rock ore to the environment*, Appl. Geochem., 25, 705-715

Periáñez, R.; Martínez-Aguirre, A.; García-León M. (1996) *U-and Th-isotopes in an estuarine system in Southwest Spain: tidal and seasonal variations*, Appl. Radiat. Isotopes, 47, 1121–1125.

Rodríguez-Navarro, C.; Doehne, E.; Sebastian, E. (2000) *How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials*, Cement and Concrete Research, 30, 10, 1527-1534.

Rodríguez-Navarro, C.; Hansen, E.; Ginell, W.S. (1998) *Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Aging of Lime Putty*, J. Am. Ceram. Soc., 81, 3032–34.

Romero Hermida, M.I.; Morales Flórez, V.; Santos, A.; Villena, L.A.; Esquivias Fedriani, L.M. (2014) *Technological Proposals for Recycling Industrial Wastes for Environmental Applications*, Minerals, 4, 746-757.

Rattazzi, A. (2007). *Conosci il Grassello di Calce? Origine, produzione, impiego del grassello di calce in architettura, nell'arte e nel restauro*, Monofalcone, Edicom, Italia.

Rosell I Amigó, J.R. (2013) *Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y formas de las partículas y su viscosidad*, Tesis Doctoral, UPC.

Tayibi, H.; Gascó, C.; Navarro, N.; López-Delgado, A.; Alguacil, F.J.; López Gómez, F.A. (2009) *The radiological impact and restrictions on phosphogypsum waste applications*, 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy Madrid, 12-13 November 2009. Editors: F. A. López, F. Puertas, F. J. Alguacil and A. Guerrero: 71-74

Hormigones de cal: nuevos “viejos” materiales

Joan Ramon Rosell, Montserrat Bosch

*Laboratori de materials, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España.
joan.ramon.rosell@upc.edu*

Resumen

El objetivo de la presentación es reivindicar el hormigón de cal como un material más de los que tenemos a nuestro alcance, que entronca perfectamente con la tradición constructiva mediterránea, y da respuesta a las exigencias de compatibilidad en obras de restauración, así como las actuales exigencias de sostenibilidad.

Se hace una lectura con una cierta perspectiva histórica para acabar repasando algunas obras cercanas al autor. En algunas de ellas se ha trabajado a nivel laboratorio para definir y controlar el material. De todo ello se deducen unas recomendaciones generales que finalmente se exponen.

Palabras clave: Restauración; Patrimonio; Hormigón; Cal

Introducción

La cal es un material tradicional (Fig. 1).

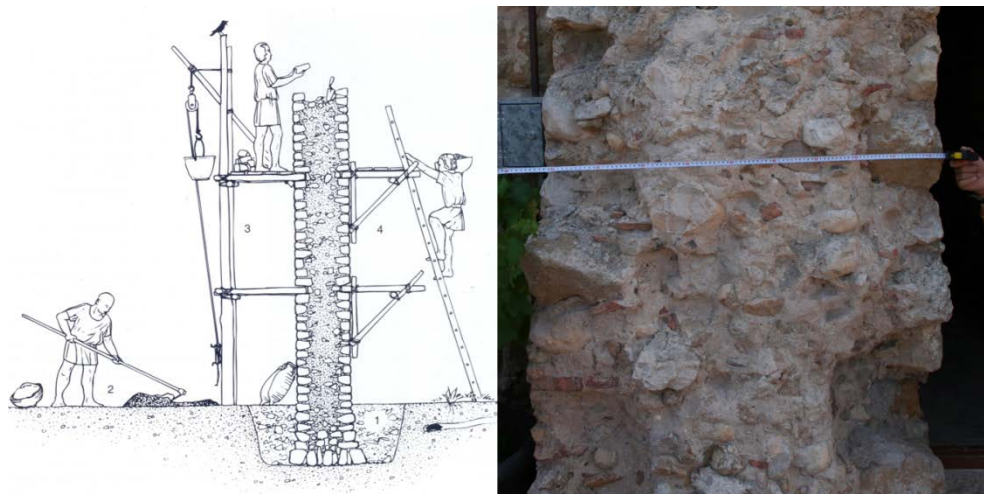


Figura 1. El hormigón de cal es un viejo material de construcción. Imagen de la izquierda, ilustración explicativa de la construcción de un muro romano [1]. Imagen de la derecha, contrafuerte roto de una masia en l'Empordà (Girona). Fotografia JRRA.

La argamasa en base de cal y otros materiales se ha utilizado con excelentes resultados desde "siempre" en nuestra cultura y geografía. Y también se puede usar en la construcción actual, con excelentes resultados, teniendo en cuenta diversas consideraciones y precauciones. Reivindicamos por tanto la cal ante la hegemónica imposición del cemento, que también es un excelente material, pero que en el mundo de la restauración nos conlleva algunos problemas vinculados a la aparición de sales, incompatibilidades entre los módulos de deformación de las estructuras tradicionales y las de hormigón de cemento portland (CP), formación de compuestos expansivos, etc.

De la cal al cemento: conceptos de puzolanidad e hidrulicidad

Tradicionalmente se ha trabajado con cal aéreas, obtenidas a partir de la cocción de piedras muy puras de carbonato cálcico. El saber popular y la bibliografía histórica [2] ya hacen referencia a la bondad de estas cal y también nos avisan de que cuando queremos obtener productos más impermeables o más resistentes necesario mezclar esta cal aérea con adiciones tipo puzolanas naturales o chamota, que no es más que cerámica cocida a baja temperatura, hecha polvo (en catalán picadís, en italiano cocchiopesto) (Fig. 2).

Si analizamos este saber popular desde la química, vemos que el objetivo es conseguir un silicato cálcico o un aluminato cálcico, y por tanto, añadir a la cal, sílice (SiO_2) o alúmina (Al_2O_3) reactivas, que es lo que aportan todos estos materiales de tipo puzolánico. A esta capacidad de reaccionar con la cal (y otros alcalinos) en presencia de agua la llamamos puzolanidad.



Figura 2. Detalle de una junta de mortero de cal con chamota correspondiente a una fábrica de ladrillo de la Alhambra de Granada. Fotografía JRRR.

Si se fabrica la cal a partir de la cocción de piedras menos puras, con mayores contenidos de arcillas, margas, etc, se obtienen cales en las que ya hay una parte en la que los silicatos cálcicos (y los aluminatos cálcicos) se forman en la propia cocción. Por tanto, en esta parte, sólo será necesaria la aportación de agua para formar compuestos resistentes del tipo silicatos cálcicos hidratados (tobermoritas, ..). A la capacidad de formar esta reacción de hidratación, la llamamos

hidraulicidad. El resto del material, aquel que no contiene compuestos provenientes de las arcillas, reaccionará con el CO_2 en la conocida reacción de carbonatación (aérea).

Es en base a la proporción entre estos dos tipos de materiales (los aéreos y los hidráulicos) que podemos identificar o diferenciar las diferentes cales y cementos: la cal, la cal hidráulica, el cemento natural o los cementos portland no son materiales tan diferentes ya que todos ellos tienen una base común: la cal o el calcio. En la Fig. 3 podemos ver en esquema esta clasificación.

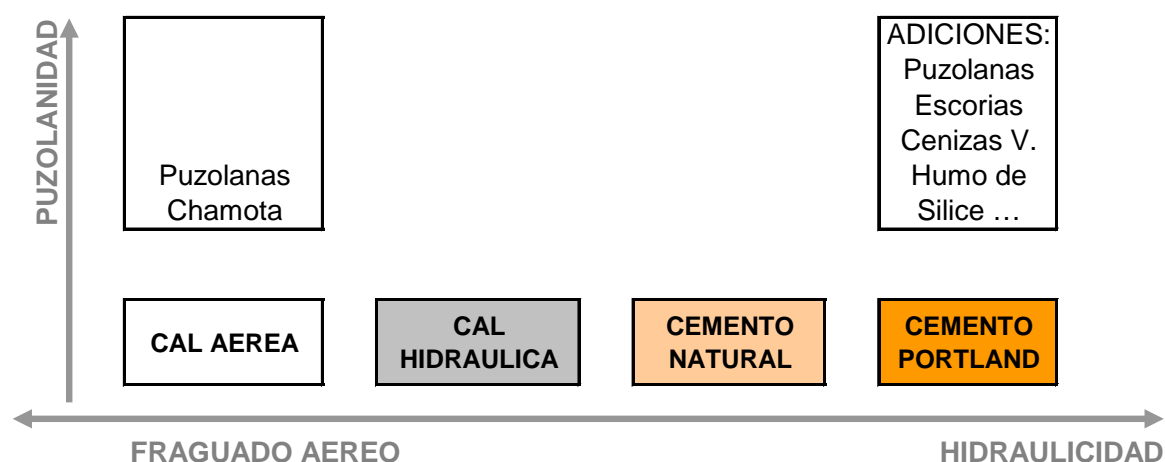


Figura 3. Esquema descriptivo de los diferentes conglomerantes en base cal [3].

Horizontalmente encontramos la secuencia de los diferentes conglomerados en función de su contenido en arcillas. La cal aérea (sin arcillas) es un material que endurece con aire (CO_2) y a medida que vamos hacia la derecha vamos identificando materiales más hidráulicos; la cal hidráulica (una cal con unos componentes aéreos y unos de hidráulicos) el cemento natural (que es una cal llevada al límite y que incluso en algunos momentos se le llamaba cal límite o cemento límite) y finalmente, cuando la química está suficientemente desarrollada, el cemento portland, que es el paso siguiente con contenidos máximos de sílice y alúmina para garantizar la no presencia de cal libre.

En el eje vertical vemos la capacidad de aportar sílices y alúminas con otros materiales: las puzolanas y la chamota en la cal aérea, y ya modernamente, en el cemento, como las escorias siderúrgicas, el humo de sílice, las cenizas volantes, etc.

Los hormigones de cal en la actualidad

Después de años en que el cemento se había impuesto de manera rotunda en el mundo de la construcción, últimamente, y por motivos diversos, observamos como hay un cierto clima de reivindicación del uso de la cal. Las experiencias que presentamos a continuación dan respuestas a proyectos diversos y se suman a esta apuesta por un material tradicional, con muchas virtudes, pero que necesita también de su conocimiento.

DESIGNACIÓN	No CO ₂ Ca	Tipo "impureza"	Fraguado/ endurecimiento
Cal Común, Cal grasa	< 6 %	Sílice, Alúmina, ..	No endurece sumergida
Cal Árida, Cal Magra		Sílice (arena), hierro, magnesio, manganeso	No endurece sumergida
Cal Dolomíticas		Magnesio	No endurece sumergida
Cal Medianamente Hidráulica	8 a 12 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe	Fraguado sumergido: 15 a 20 días
Cal Hidráulica	13 a 17 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe (SiO ₂ preponderante)	Fraguado sumergido: 6 a 8 días
Cal Eminentemente Hidráulica	18 a 20 %	Arcillas, Mg, Mn, Fe (SiO ₂ preponderante)	Fraguado sumergido: 2 a 4 días
Cal límite	20 a 25 %	Arcilla	"con prontitud"
Cemento límite inferior	25 a 27 %	Arcilla	Fraguado sumergido: 15 a 20 minutos
Cemento medio	28 a 36 %	Arcilla	"mucha prontitud"
Cemento límite superior	37 a 65 %	Arcilla	

Figura 4. Transcripción en forma de tabla de la explicación de como eran los diferentes conglomerantes el 1859, procedente de [4]. Como se puede apreciar, la clasificación se ordena de manera creciente por el contenido de arcilla en la materia prima.

Efectivamente cualquier profesional tiene, hoy en día, unos conocimientos extensos sobre el hormigón de CP (o si no, sabe dónde ir a buscar la información). Hay una extensa bibliografía, normativa, reglamentos, una potente industria de los aditivos, tecnología suficiente como para hacer hormigones de características especiales, etc. Quizá fuera interesante plantearnos con los hormigones de cal la misma exigencia metodológica para obtener los mismos buenos resultados.

El hormigón es un material conformable, resistente, volumétrico y en el que podemos incorporar armaduras allí donde corresponda para que absorban las tensiones justamente allí donde convenga. Efectivamente el hormigón es un excelente material de construcción.

Si utilizamos hormigones de cal en vez de hormigones de CP, evitamos además algunos problemas: los derivados de la excesiva rigidez que proporciona el cemento; la aparición de sales; o los problemas que ocasiona en algunos morteros la impermeabilidad. Pero no podemos sustituir de manera automática el cemento por la cal dado que entre ambos materiales hay aspectos que hay que controlar.

El primero tiene que ver con el agua de amasado. Si queremos conseguir resistencias relevantes con hormigones de cal tenemos que conseguir reducir el agua de amasado. Es bien sabido que la cal es un producto muy fino, de mucha superficie específica, y que exige mucha agua para poder conseguir consistencias adecuadas a la hora de trabajarlo. Habitualmente esta trabajabilidad se consigue a base de añadir agua. Pero una alta relación agua/conglomerante penaliza mucho la resistencia y, por tanto, debemos buscar aditivos que nos permitan rebajar esta relación (reductores de agua). Tradicionalmente esta función la hacían determinadas sustancias naturales (clara de huevo, sangre, etc.) y hoy en día ya existen algunos buenos aditivos reductores de agua que actúan correctamente con conglomerantes de cal.

Paralelamente, si reducimos el agua reducimos la retracción, un problema más importante en la cal que en el cemento. Si no queremos fisuras por retracciones podemos establecer diferentes estrategias que tienen que ver con la granulometría, los aditivos que modifican la tensión superficial en la red de poros, y/o adiciones que compensan la pérdida de volumen. Pero una acción sencilla y eficaz es, evidentemente, reducir el agua de amasado, que además conlleva una reducción de la porosidad, una característica interesante de cara a la durabilidad.

Con todo, también deberíamos curar el hormigón de manera adecuada y que no es la misma que usamos para el hormigón de CP. Si con un hormigón de cemento portland hacemos el curado a base de regarlo o impedir que el agua se vaya, en un hormigón de cal hay una parte de reacción hidráulica que necesita agua mientras que hay otra parte de reacción aérea que necesita CO_2 del aire. Si la red porosa está llena de agua, el CO_2 no llega al interior del hormigón. Así, la manera de curar un hormigón de cal es: regarlo a menudo y poco para que se moje y se seque, se moje y seque.

Segunda cuestión, la evolución de la resistencia: en los hormigones de cal se alcanzan las resistencias más lentamente que con los hormigones de cemento. Hay por tanto desencofrar bastantes días más tarde, lo que implica organizar la obra de manera diferente. Y en paralelo, el Módulo de Young, que crece a medida que sube la resistencia, también aumenta más lentamente en un hormigón de cal que en uno de CP (Fig. 5).

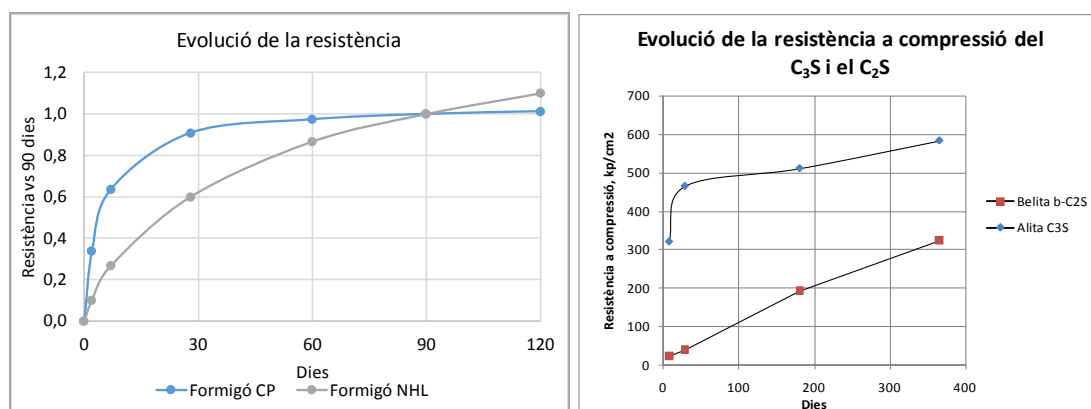


Figura 5. Dos gráficos que muestran la evolución de la resistencia. A la izquierda, si consideramos la resistencia a compresión a los 90 días como el 100%, podemos comparar la pendiente de las curvas como a la velocidad de incrementar la resistencia. A la derecha, las curvas de crecimiento de resistencia y los valores alcanzados por la Alita (componente protagonista de los cementos) y la Belita (componente coprotagonista de las cales hidráulicas).

Tercera cuestión: la reserva alcalina. Conocemos como reserva alcalina el contenido de material presente en la matriz del hormigón, con capacidad de disolverse en agua y de aumentar muy significativamente el pH de esta. En el CP la reserva alcalina es la portlandita, es decir, la cal que se genera en el fraguado del propio cemento.

Podríamos pensar que el hormigón de cal, al ser de cal, tiene por sí solo mucha reserva alcalina, y ciertamente inicialmente es así. Pero con el paso del tiempo y del CO_2 , la cal se carbonata, convirtiéndose en carbonato cálcico, que ya no es soluble y por tanto, ya no modifica el pH del agua que pueda aparecer exteriormente.

Esta reacción de carbonatación avanza del exterior al interior a una velocidad que depende fuertemente de la porosidad del material. El hormigón de cal es necesariamente más poroso que uno de CP dado que lo tenemos que dosificar con mucha más agua que la que consumirá en reacciones de hidratación. Es esta agua la que acabará evaporándose y dejando tras de sí mucha red porosa. En consecuencia, la velocidad de carbonatación del hormigón de cal es tan elevada que consume la reserva alcalina en muy poco tiempo, y no tener suficiente reserva alcalina provoca la rápida desprotección química de la armadura convencional frente a la corrosión. Por lo tanto, si utilizamos las armaduras habituales en hormigones de cal, tendremos problemas importantes de corrosión (Fig. 6).

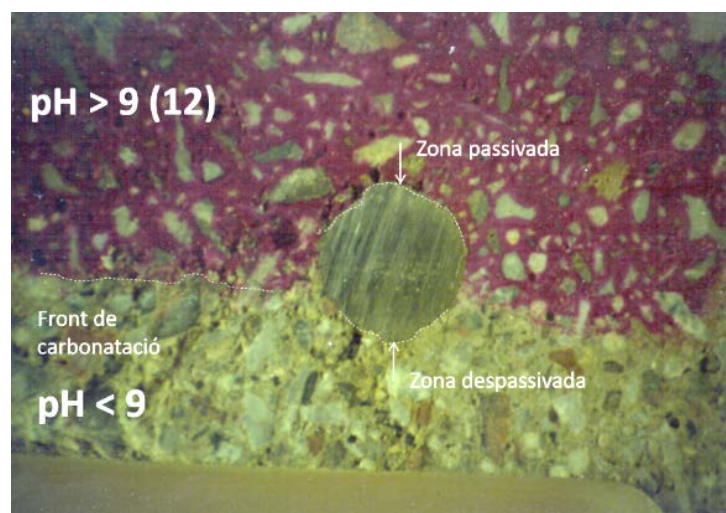


Figura 6. Por medio de la fenolftaleína se observa visualmente el cambio de color de la matriz del hormigón en función de su pH. En la zona de pH elevado, la armadura se encuentra pasivada y no se puede producir corrosión por presencia de humedad. Fotomontaje JR Rosell

Algunas experiencias

Nuestra experiencia en hormigones y morteros de cal comenzó en el laboratorio con estudios centrados en los efectos de aplicar chamota a los hormigones de cal [5] y con conglomerados confeccionados con cal hidráulica versus mezclas de cal y cemento [6].

La primera intervención en obra y de una cierta importancia fue la construcción de una bóveda de cañón¹, de 4,5 m de luz. Se trataba de diseñar un hormigón en masa donde la exigencia de resistencia no era muy elevada. Se optó por hacer un hormigón a partir de un mortero de cal comercializado, corrigiendo su curva granulométrica añadiendo un porcentaje de árido grueso. El producto funcionaba bastante bien pero el coste resultaba muy elevado en tanto que se utilizaba un mortero comercializado para pequeños espesores, de una manera muy masiva (Fig. 7).

A partir de esta experiencia comenzamos a plantearnos los hormigones de cal con armaduras, lo que conllevaba definir los valores de diferentes parámetros. En el caso de los hormigones de cemento portland y armaduras convencionales de acero corrugado estos parámetros son bastante conocidos y están cargados por defecto en las Bases de datos de los programas de

¹ A partir de un proyecto de Oriol Rosselló, arquitecto.

cálculo. Nos referimos al módulo de Young del material, las resistencias características alcanzables, las consideraciones de adherencia entre el hormigón y el elemento de armado para determinar las longitudes de transferencia, las curvas de crecimiento de la resistencia en función del tiempo, los tiempos de espera para desapuntalado y desencofrar, etc.



Figura 7. Dos fotografías de Oriol Rosselló que muestran el proceso de hormigonado por tongadas y los conectores de piedra, de la vóveda.

Iniciamos por tanto una búsqueda encaminada a conocer la adherencia entre el hormigón y las armaduras de acero inoxidable o las armaduras de fibra de vidrio [7]. De los resultados obtenidos se desprende que las barras de fibra de vidrio se adhieren a los hormigones de cal tanto como las de acero corrugado y todo con unos valores equivalentes a los obtenidos con hormigones de CP de similares resistencias. Eso sí, con velocidades de carbonatación mucho más elevadas (Fig. 8).

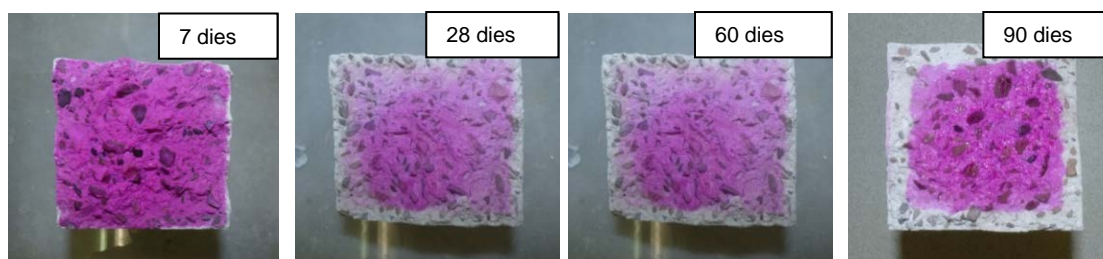


Figura 8. Evolución de la profundidad de carbonatación del hormigón de cal hidráulica en una probeta de 15 x 15 cm. Fotomontaje G. De la Rosa [7]

El estudio se realizó pensando en un proyecto concreto², tratando de dar solución al refuerzo de las almenas que recorrían las fachadas. Se trataba de diseñar un refuerzo de hormigón, en forma de L suficientemente rígida, con conectores con la fábrica, para resolver los problemas de inestabilidad al viento de las propias almenas, al mismo tiempo que también mejoraba el comportamiento estructural general del edificio al dotar a todo el conjunto de un zuncho perimetral de coronamiento de las estructuras de paredes de carga (Fig.9).



Figura 9. Detalles del refuerzo de las almenas y zuncho perimetral de la casa Puig i Cadafalch a Argentona. A la izquierda, conectores y armaduras de fibra de vidrio, a la derecha, elementos ya hormigonados. Foto de los autores.

En este caso, el hormigón se hizo nuevamente a partir de un mortero comercial con la corrección de granulometría, hecha en obra, mediante la aportación de una gravilla; y los armados fueron de malla de fibra de vidrio. Todo ello una solución de coste elevado.

Otro caso fue el del hormigón para el baluarte de la muralla de Barcelona, descubierta bajo el mercado de San Antonio, en el marco del gran proyecto de rehabilitación de dicho edificio.³ En este caso, la geometría del elemento era muy potente, aunque no había ningún compromiso remarcable de exigencia de resistencia. El baluarte se ha realizado hormigonando en dos etapas verticales y utilizando un hormigón ciclópeo de cal para el relleno (Fig. 10).

Lo más destacable de este hormigón con cal hidráulica NHL 5 de El Tigre, es que se ha realizado en central hormigonera, con las especificidades que ello conllevó. Y si bien es cierto que ha proporcionado resistencias reducidas, estas son suficientes para la función que tiene que llevar a cabo. Tampoco se ha utilizado ningún reductor de agua.

² Restauración/rehabilitación de la casa *Puig i Cadafalch* de Argentona (Barcelona) proyecto de la arquitecta Mercè Zazurca.

³ Rehabilitación del mercado de San Antonio de la ciudad de Barcelona, obra de los arquitectos Pere Joan Ravetllat y Carme Ribas.



Figura 10. Proceso de hormigonado del Baluarte de la muralla medieval de Barcelona, bajo el mercado de Sant Antoni.

Cabe decir que también se pueden diseñar "Grouds" (pastas de cal con puzolanas, para inyectar) de altas prestaciones mecánicas. En estos casos hubo que ajustar mucho el tema de la dosificación y los aditivos, llegando a alcanzar valores entre 32 y 43 MPa de compresión, que son resistencias muy elevadas conseguidas con cal [8].

Como última experiencia tenemos la restauración de la Iglesia del Rosellón⁴, donde se propone hacer la reconstrucción del paramento y el arranque del campanario, repitiendo parcialmente la volumetría que tenía el conjunto antes del derrumbe parcial ocurrido en enero de 2016. Esta intervención se quiere hacer con un material diferente al inicial, pero con las garantías de compatibilidad entre materiales y con un aspecto determinado, por lo que se ha pensado en un hormigón de cal.



Figura 11. Iglesia de Roselló después del colapso del campanario y las partes inferiores. Foto *Diari El Punt-Avui*

⁴ Reconstrucción parcial del campanario, el coro y otros elementos de la iglesia de Roselló (Lleida), obra de Miguel Angel Sala, arquitecto.

Este encargo nos ha llegado con tiempo suficiente como para poder desarrollar el hormigón de cal en el laboratorio, a partir de una campaña experimental previa. Esta es una consideración a tener en cuenta: si queremos saber resultados de resistencia de un hormigón a 60 días, hay que prever e iniciar los estudios con suficiente antelación.

El hormigón propuesto ha sido un hormigón en masa, ciclópeo, encofrado a dos caras y con unas puestas que permiten generar unas pequeñas impostas en fachada hechas con ladrillos cerámicos. El hormigón se hace en obra y en muchas amasadas, relativamente pequeñas, dada la necesaria lentitud de la obra.

En esta experiencia detectamos, una vez más, la realidad de las obras: la producción del hormigón de cal, en obra, necesita por parte de los operarios de un conocimiento preciso. A pesar de haber indicado a los operarios como hacer el hormigón, las probetas realizadas del primer hormigón hecho in situ (A3 “in situ” 0 según tabla Tabla 1) dio unas resistencias de 2,3 MPa a 28 días y 3,7 MPa a 60 días preocupantemente por debajo de lo esperado.

Tabla 1. Tabla de resultados (MPa) de resistencias a compresión de los hormigones de cal preparados para la iglesia de Rosselló.

Amasada	Resistencia a compresión (MPa)				
	Edad (días)				
	7	28	60	90	120
A1 (laboratorio)		10,3		14,1	
A3 (laboratorio)		9,2	11,2	14,5	14,5
B1 (laboratorio)			35,4		39,1
B2 (laboratorio)		12,3	15,8		15,0
A3 “in situ” 0 *		2,3	3,7	4,1	4,2
A3 “in situ” 1 **	4,5	10,0	12,6	12,6	
A3 “in situ” 2 **	4,3	9,2	11,2	12,2	
A3 “in situ” 3 **	3,0	9,2	11,8	12,9	
A3 “in situ” 4 **	4,7	9,8	12,5	12,8	

* Error en obra, diferentes aditivo, dosificación aditivo y cantidad de agua

** Dosificación A3 correctamente realizada en obra.

En obra no hay un dosificador mecánico; los operarios, incluso aquellos que tienen mucho oficio, desconocen los hormigones de cal y la propia cal en sí. Hay que transmitir el cuidado necesario para realizar este tipo de materiales y por otra parte ajustar las prescripciones técnicas que vienen de laboratorio a las distintas realidades de las obras. Sólo así se podrán obtener buenos resultados, como los obtenidos finalmente con las muestras A3 “in situ” 1 y 2 (ver tabla Tabla 1).

A modo de conclusión

Los hormigones de cal son perfectamente compatibles con intervenciones estructurales en obras de restauración (y no solo estas).

Las cal hidráulicas nos permiten confeccionar estos materiales sin ninguna aportación de cemento Portland, pero la "cultura" del hormigón (que por defecto siempre consideramos hormigón de cemento portland) no se puede trasladar miméticamente a los hormigones de cal.

Hay que ser especialmente cuidadosos en varios aspectos:

- La utilización de reductores de agua adecuados
- El uso de armaduras no corrosibles (fibras sintéticas, fibras vegetales, aceros galvanizados, etc.)
- Respetar los tiempos de fraguado y de adquisición de resistencia.
- Asumir que hay que trabajar con resistencias "bajas" (hasta 15 MPa) a 90 días.
- Saber trasladar la "manera de hacer" estos hormigones en obra.

Bibliografía

[1] Adam, JP. (1996). "La construcción romana, materiales y técnicas". Editorial de los oficios. Leon.

[2] Vitrubio Polion, M. (1787). "Los diez libros de arquitectura", Traducción de Joseph Ortiz. Madrid Imprenta Real.

[3] Rosell, J.R. (2007). "Morteros de cal para obras de restauración". Conferencia en Construmat Barcelona 2007.

[4] Espinosa, P.C. (1859). "Manual de Construcciones de albañilería". Madrid. Edición facsímil 1991.

[5] Bestue, J.; Corbella, X.; Rosell, J.R. (2010). "Diseño y determinación de propiedades de un hormigón romano". PFG. UPC. Barcelona

[6] Peñaranda, P.; Rosell, J.R. (2012). "Diferencias y similitudes entre morteros de cal hidráulica y morteros mixtos de cal aérea y cemento portland". PFG. UPC. Barcelona.

[7] Rosell, J.R, De la Rosa. G., Ramírez-Casas. J. (2016). "Hormigones de cal: Adherencia a las armaduras". Ponencia al congreso: A cal no espaço ibérico: um futuro com história; V Jornadas FICAL - Fórum Ibérico da Cal. Lisboa.

[8] Puchol, R.; Ramírez-Casas, J.; Rosell, J.R. (2014). "Inyecciones puzolánicas de altas prestaciones". PFG. UPC. Barcelona.

[9] Lucas, P. de; Rosell, J.R.; Pialarissi, S.H. (2017). "Estudio de hormigones de cal hidráulica con fibras de polipropileno". Tesina Màster. UPC. Barcelona.

[10] Bedini, S.; Rosell, J.R. (2017) "Estudio de micro-hormigones de cal con sustitución de árido natural por árido cerámico reciclado". Tesina Màster. UPC. Barcelona.

[11] Rosell, J.R. (2013). "Aportaciones al comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y forma de las partículas". Tesi doctoral. UPC. Barcelona.

Aplicaciones de la cal en la ingeniería civil

Ángel Sampedro Rodríguez

Universidad Alfonso X el Sabio (UAX). España. sampedro@uax.es

Resumen

La presente ponencia describe y analiza las principales aplicaciones de las cales, vivas o hidratadas, en la construcción de infraestructuras de ingeniería civil.

Por un lado, se muestra el “estado del arte” de las técnicas de estabilización de suelos con cal, exponiendo las últimas experiencias y aplicaciones en España.

Los tratamientos más novedosos consisten en el secado e, incluso, descongelación de suelos mediante cal viva; el empleo de materiales estabilizados en zonas especiales para la protección de la plataforma; estabilizaciones mixtas cal – cemento; secado y estabilización de lodos que permiten su trabajabilidad y reutilización en rellenos; tratamiento de residuos para su empleo en la construcción de infraestructuras; tratamientos de mejora del terreno, para poder construir infraestructuras sobre terrenos blandos; y descontaminación de suelos.

Por otro lado, la cal hidratada constituye un polvo mineral o filler que reduce el riesgo de deformaciones plásticas, mejora la resistencia a la desvuelta del árido por la acción del agua y limita la rigidización que acompaña a los fenómenos de envejecimiento en las mezclas bituminosas o asfálticas, muy empleadas en firmes de carreteras y, ahora, de forma experimental, en plataformas ferroviarias.

Palabras clave: Cal; Tratamiento; Estabilización; Residuos; Mezclas bituminosas.

Introducción

La presente ponencia analiza y expone las últimas experiencias y aplicaciones de las cales en las obras de ingeniería civil en España, basadas en muchas ocasiones, en la experiencia obtenida en otros países.

Las principales aplicaciones de las cales, vivas o hidratadas, en la construcción de carreteras, son en tratamientos y/o estabilizaciones de suelos, por un lado; y, por otro, como polvo mineral de aportación en mezclas bituminosas o asfálticas.

La aplicación más desarrollada en nuestro país es la estabilización de suelos que cuando son arcillosos, se clasifican como marginales o especiales y su reutilización pasa por la corrección de sus problemas geotécnicos mediante su adecuado tratamiento con cal.

Además de los suelos arcillosos, para los cuales están desarrolladas la mayoría de las especificaciones técnicas, son susceptibles de tratar con cal todos aquellos que contienen minerales puzolánicos, aunque no sean plásticos.

El tratamiento y estabilización con cal de cualquiera de estos suelos es una solución muy interesante desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental. Esta técnica se viene aplicando de forma sistemática en España desde hace varias décadas.

Los efectos de mejora conseguidos y sus ventajas han hecho que su aplicación se haya extendido a una gran variedad de infraestructuras:

- Tratamientos de mejora y estabilización en terraplenes y explanadas en carreteras.
- Tratamientos y mejora de suelos en plataformas ferroviarias, especialmente de alta velocidad.
- Estabilización y reparación de caminos y vías de servicio.
- Estabilización de explanaciones aeroportuarias (pistas de vuelo).
- Estabilización de terrenos para las explanaciones en grandes obras de urbanización.
- Estabilización de zonas de vertederos para construir sobre ellas.
- Etc.



Figura 1: Secado de lodos mediante cal viva.

Los tratamientos de suelos con cal más novedosos que se están aplicando en España actualmente son:

- Secado e, incluso, descongelación, de cualquier tipo de suelo con cal viva en condiciones climatológicas adversas, permitiendo seguir con los trabajos y concluir las obras en plazo.
- Tratamiento de todo el terraplén, construido a base de capas o tongadas de suelos arcillosos estabilizadas con cal.
- Tratamientos de zonas especiales para la protección de la infraestructura.

- Estabilizaciones mixtas cal – cemento en las que se optimiza el empleo de ambos tipos de conglomerantes. Ante materiales con leves plasticidades y/o excesivamente húmedos, su tratamiento previo con pequeños porcentajes de cal permite un mejor rendimiento de su posterior estabilización con cemento.
- Secado y estabilización de lodos que permiten su trabajabilidad y reutilización en los rellenos necesarios para obras de infraestructura.
- Tratamiento de residuos para su empleo en la construcción de infraestructuras.
- Tratamientos de mejora del terreno, para poder construir infraestructuras sobre terrenos blandos.
- Descontaminación de suelos, permitiendo, incluso, su reutilización en la construcción de los rellenos necesarios.

Por otro lado, la cal hidratada o hidrato de cal se ha utilizado durante décadas como polvo mineral de las mezclas bituminosas. Aún hoy sigue utilizándose en Estados Unidos y otros países europeos. Sin embargo, en nuestro país su uso ha ido desapareciendo y a la vez se han olvidado sus beneficiosos efectos sobre la mezcla bituminosa.

Tratamiento de lodos

Dentro de los tratamientos con cal novedosos, puede citarse un caso especial de reutilización de residuos expansivos. En la última ampliación del Aeropuerto de Málaga se han reutilizado más de 300.000 metros cúbicos de los lodos procedentes de la excavación de muros pantalla para la construcción de la Nueva Terminal e instalaciones anexas.

Estos lodos, además de difíciles de manipular, presentan problemas de baja capacidad de soporte y son muy expansivos. En este caso, se ha necesitado la aplicación de un 5 por ciento de cal viva para conseguir su secado y estabilización.

Tabla 1: Efectos de mejora de la expansividad de los lodos (Fuente: ROP)

Dosificación de cal (%)	Hinchamiento libre (%)
0	7,50
1	2,25
2	1,80
3	1,70
4	0,20

En la siguiente fotografía puede apreciarse la ejecución de su estabilización. Este mismo tratamiento se ha aplicado para la manipulación y posterior reutilización de los lodos procedentes de la excavación mediante tuneladoras en las obras del Metro de Madrid y Barcelona.

Los efectos ya conocidos del óxido de calcio sobre estos lodos facilita su manipulación y transporte y permite, además, su reutilización en la construcción de infraestructuras civiles, evitando su llevada a vertedero, como se venía haciendo hasta ahora.



Figura 2: Estabilización de lodos con cal viva. (Fuente: ROP)

Estabilización de terraplenes en alta velocidad

Durante los últimos años, en España, los tratamientos de suelos con cal se han empezado a aplicar de forma habitual en líneas de alta velocidad ferroviaria, empleándose estas técnicas en la construcción de las plataformas de las líneas de alta velocidad que atraviesan Andalucía y Castilla y León.

Incluso, en el Subtramo: Nudo de Venta de Baños-Conexión Valladolid-Palencia-León ha sido necesario realizar un estudio especial de la estabilización con cal de suelos de carácter marginal de la traza, facies Tierra de Campos, para poderlos reutilizar en la construcción de rellenos, y en particular en rellenos inundables, correspondientes al estribo de acceso al viaducto del Pisuerga (la alternativa era recurrir a pedraplén, que debía proceder de canteras muy alejadas de la traza).

A tal efecto, se diseñó una sección especial, recogida en el esquema de la figura 1, tratando con cal el relleno hasta 50 cm por encima de la cota de avenida de 500 años, así como la zona del cimiento y saneo. La sección se zonificó, disponiendo el material mas “estabilizado” en cimiento y parte mojada de espaldones, y completándola con un sobreecho de 3 metros, que ejerza de protección frente a la acción erosiva (así como un tacón para evitar la socavación).

El trazado de la LAV discurre en su mayor parte sobre los distintos niveles de terrazas cuaternarias y sobre el aluvial actual del río Pisuerga; estos materiales se disponen discordantes sobre el sustrato terciario, constituido por las Facies Dueñas y Tierra de Campos, formadas por materiales arcillo-margosos.

Debido a que el volumen procedente del movimiento de tierras de la obra no cubre las necesidades para la construcción de los rellenos es necesaria la búsqueda de zonas de préstamo o la reutilización de los suelos marginales procedentes de las excavaciones. Por criterios técnicos, económicos y, por supuesto, medioambientales, se ha optado por la última opción.

Tras una fase de estudios, se concluyó que los suelos de Tierra de Campos, tratados adecuadamente con las proporciones oportunas de cal, permiten obtener un material insensible a los cambios de humedad, estable baja la acción del agua, tanto saturable como sumergible, y en consecuencia apto para su empleo en las zonas clasificadas como “inundables” en los rellenos.

Por lo tanto, dada la potencial disponibilidad próxima de volúmenes suficientes de estos materiales de la formación de Tierra de Campos, se estimó que su empleo, con el adecuado tratamiento con cal, en este relleno inundable aquí analizado, era una alternativa completamente válida desde el punto de vista técnico, a la vez que una oportunidad desde la perspectiva económica y medioambiental.

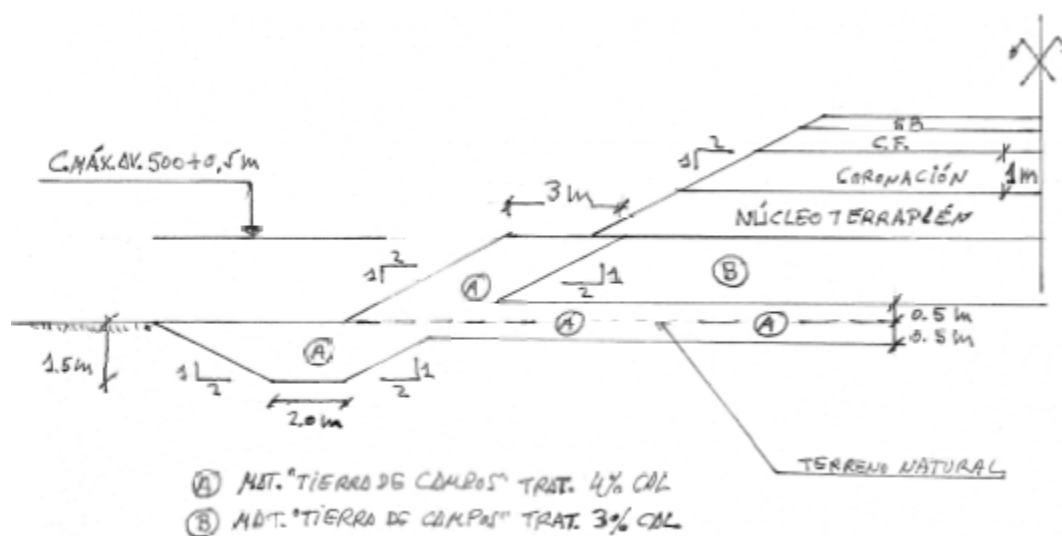


Figura 3: Diseño de contraterraplenes en zona inundable.

Estabilizaciones mixtas (cal + cemento)

La estabilización mixta (cal + cemento) es una opción muy interesante en la que primero, mediante un pequeño porcentaje de cal se logra mejorar la ligera plasticidad que puede presentar un material dejándolo en óptimas condiciones para, a continuación, tratarlo mejor con cemento.

Aplicando este tipo de estabilización los porcentajes requeridos de conglomerante son menores, lo cual implica numerosas ventajas técnicas y económicas.

También se puede recurrir a un tratamiento mixto en el caso de ejecutar capas tratadas con cemento en condiciones climatológicas adversas.

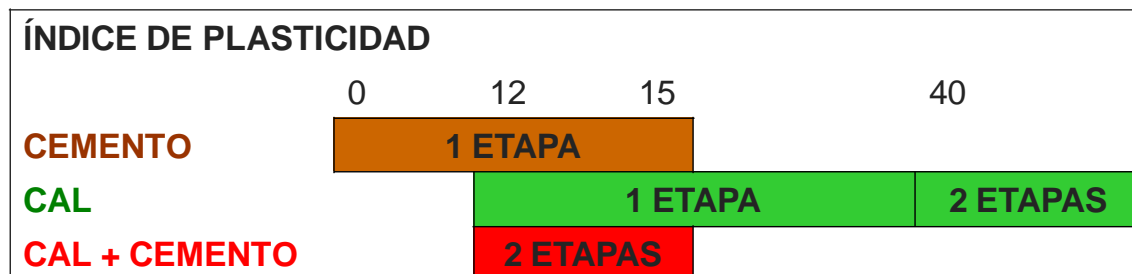


Figura 4: Criterios para la elección del conglomerante (cal y/o cemento).

En el caso de suelos con humedades excesivas, puede secarse previamente la capa mediante la aplicación de un pequeño porcentaje de cal viva que, además de reducir rápidamente la humedad, eleva la temperatura del material, lo cual favorece las posteriores reacciones de hidratación del cemento. Esto puede ser muy útil en la ejecución de obras durante los meses de invierno.

Hay numerosos ejemplos de estos tipos de realizaciones, con excelentes resultados, permitiendo terminar las obras en las que se ha aplicado dentro de los plazos previstos.

Así, por ejemplo, para la construcción de la capa de base de los firmes de las nuevas Pistas de Vuelo del Aeropuerto de Barajas (Madrid) se planteó sustituir la capa de zahorras artificiales prevista en un principio por una capa de suelocemento que permitiera reducir los espesores previstos y, por tanto, el movimiento de tierras necesario.

Parte de los suelos a emplear presentaban ligeras plasticidades que hacían que en los ensayos previos de dosificación exigieran porcentajes de cemento superiores sin aumento de la resistencia. A ello se añadió otro problema: con un plazo prefijado para la terminación de las obras y puesta en funcionamiento de las pistas, comenzó un otoño muy lluvioso y frío.

La única forma de poder comenzar y terminar en plazo los trabajos de la base de los firmes fue la de realizar una estabilización mixta: primero, se secaban los suelos y se corregía su plasticidad con un pequeño porcentaje de cal viva, en torno al 1 %. Este tratamiento se realizaba in situ, por vía seca.

Y a continuación, pasado un período de una hora, para que toda la cal pudiese actuar sobre todo el espesor de capa, se pasaba a estabilizar la capa con cemento, in situ, por vía húmeda.

Otro ejemplo de este tipo de estabilización mixta es el que se está ejecutando en la actualidad para la formación de la explanada en las obras de la Ronda de Sabadell (Barcelona).

Para obtener un S-EST3, estabilizado con cemento, se ha recurrido a un tratamiento previo con cal que ha permitido, de esta manera, reutilizar los suelos de la traza, que son ligeramente plásticos, y, con un posterior tratamiento con el 3 por ciento de cemento, porcentaje mínimo marcado por la normativa, se lograron resistencias superiores a las exigidas para este material.



Figura 5: Tratamiento con cal en estabilización mixta.

La cal como aditivo en mezclas bituminosas

La cal hidratada o hidrato de cal se ha utilizado durante décadas como polvo mineral de las mezclas bituminosas. Sin embargo, en nuestro país su uso ha ido desapareciendo y a la vez se han olvidado sus beneficiosos efectos sobre la mezcla bituminosa.

Un elemento que ha favorecido la caída en desuso del hidrato de cal en mezclas bituminosas ha sido la mejora de los ligantes bituminos. Así, propiedades como la resistencia a las deformaciones plásticas o la mejora de la adhesividad pasiva árido-ligante, que tradicionalmente se han atribuido a la incorporación del hidrato de cal, habrían mejorado en las últimas décadas gracias al empleo de ligantes modificados con polímeros. Y lo mismo podría decirse del problema del envejecimiento de mezclas bituminosas. No obstante, nuestras carreteras siguen teniendo problemas de deformaciones plásticas y de envejecimiento prematuro de sus capas bituminosas.

Recientes trabajos parecen poner de manifiesto que no todos los betunes modificados mejoran la durabilidad de las mezclas bituminosas.

Cada día parece más urgente incorporar en los criterios de proyecto de mezclas bituminosas ensayos de envejecimiento, de modo que las mezclas que se pongan en obra no sólo tengan un buen comportamiento inicial –medido a través de la ley de fatiga de la mezcla bituminosa virgen, sin envejecer-, sino también unas buenas características de durabilidad para que las propiedades iniciales de la mezcla se prolonguen en el tiempo.

Por ello la utilización de la cal hidratada como aditivo en la mezcla bituminosa, junto a otros polvos minerales de aportación o bien sustituyendo a aquéllos, puede ser una opción interesante.

Estos beneficios se deben, según los casos, a los siguientes mecanismos:

- Resistencia a las deformaciones plásticas: El valor elevado de la superficie específica del hidrato de cal y su baja densidad aparente hacen que el betún adquiera más viscosidad que si se emplean en la misma proporción ponderal otros polvos minerales. Para conseguirlo es suficiente añadir la cal a la mezcla bituminosa, sin que sea preciso el pretratamiento de los áridos.
- Resistencia a la desenvuelta por la acción del agua: El hidrato de cal hace que la superficie de los áridos ácidos (silíceos) se transforme en básica, generando así mayor afinidad por los radicales ligeramente ácidos que existen en el betún y favoreciendo la adhesividad árido-ligante. El hidrato se puede aplicar por vía seca, como un polvo mineral en el mezclador, pero es preferible el pretratamiento de los áridos mediante lechada agua/cal.
- Resistencia al envejecimiento: El hidrato de cal capta diversas sustancias catalizadoras de la oxidación que están naturalmente presentes en el betún. Además capta moléculas polares que se generan durante el envejecimiento y que de estar libres contribuirían al endurecimiento y rigidización del betún. Los tratamientos con hidrato de cal en los estudios que se han expuesto tienen unas condiciones difíciles de reproducir en obra por lo que resulta preciso un esfuerzo investigador para determinar si con las condiciones de obra se consiguen los mismos resultados.

En España los beneficios más interesantes serían los relativos a las deformaciones plásticas y al envejecimiento. Ya se ha dado el primer paso con la normalización de la cal hidratada a emplear en mezclas bituminosas (norma UNE 80503). Ahora es necesario que se estudien en proyectos españoles las ventajas de esta técnica, que con un coste bajo puede ser una opción interesante para mejorar las características de las mezclas bituminosas.

Nuevas aplicaciones

Por último, cabe citar que actualmente se están introduciendo otras aplicaciones de las cales en el campo de la pavimentación asfáltica, en base a desarrollos vigentes en otros países europeos.

Estas aplicaciones se basan en el efecto mejorador de una suspensión de cal hidratada en ciertas técnicas de las llamadas tecnologías en frío, donde se emplean las emulsiones bituminosas como ligante.

Mediante el empleo de esta lechada se logra mejorar la problemática de la falta de cohesión de estos tratamientos en frío en los primeros momentos de la aplicación, por retrasos en la maduración de la mezcla asfáltica construida.

Muchos han sido los estudios que se han realizado para intentar reducir el tiempo para que los tratamientos o las mezclas bituminosas, fabricadas empleando una emulsión bituminosa, adquieran una cohesión aceptable en los primeros momentos de la aplicación. Se han empleado diferentes aditivos pero sin solucionar el problema definitivamente. Dichos aditivos son añadidos en la mezcla asfáltica, ya sea por vía seca, en el árido, o húmeda, en la emulsión o en el agua de pre-envuelta a la hora de fabricar las mezclas.

Frente a ello, la lechada de cal hidratada produce una mejora de la adhesividad y, como consecuencia, de la cohesión de las mezclas, siendo aplicable de forma particular al caso de dos técnicas en frío: los llamados tratamientos superficiales o riegos, y la grava-emulsión, empleada para bases de firmes de carretera.

Conclusiones

De todo lo analizado puede concluirse, por un lado, que la estabilización de suelos con cal es una técnica que ha experimentado un gran desarrollo en España, especialmente en los últimos quince años.

El avance más reciente puede considerarse la aplicación de estas estabilizaciones, de forma sistemática, en la construcción de rellenos en las líneas de alta velocidad ferroviaria.

El más novedoso, el tratamiento con cal de lodos, un material cuya manejabilidad y reutilización se hacen imposibles de no ser por existir estas técnicas.

Y, por último, puede concluirse que el empleo de cal hidratada en las mezclas bituminosas, en porcentajes alrededor del 1,0% del peso de los áridos, ejerce una beneficiosa influencia sobre la resistencia a las deformaciones plásticas, el efecto del agua sobre la adhesividad árido-ligante y la resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en que se incorpora.

Bibliografía

- ANCADE, ANTER e IECA. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, 2008.
- ANTER. Guía de Soluciones para obras de estabilización de suelos, ejecución de suelocemento in situ y reciclado de firmes. Madrid, 2010.
- INTEVÍA. Estabilizaciones con cal en carreteras y ferrocarriles. Madrid 2011.
- Leuseur, D. et al. Empleo de lechadas de cal en tratamientos en frío con emulsiones bituminosas. Madrid, 2018.
- Sampedro, A., Gallego, J. De cal y carreteras... Revista CARRETERAS. Núm. 135. Sep-Oct. Madrid, 2004.
- Sampedro, A. Estabilización de suelos en Alta Velocidad Ferroviaria. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Civil – Transportes. Madrid, 2006.



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Características de los morteros de cal

Comportamiento de fábricas de piedra tomada con mortero de cal

Domingo Pellicer Daviña, Germán Ramos Ruiz

Escuela de Arquitectura, Universidad de Navarra, España, dpellicer@unav.es, gramrui@unav.es

Resumen

El adecuado comportamiento estructural de una fábrica de piedra depende tanto de su diseño como de su ejecución. La regularidad de las piezas, su forma y formato, su colocación, el tamaño de la junta, la regularidad de las cargas, etc. son aspectos que influirán más adelante en que su comportamiento sea el adecuado.

Este estudio relaciona las investigaciones realizadas por Freyssinet sobre la plastificación de la garganta en las articulaciones de pilares de hormigón armado con el comportamiento del mortero de cal cuando está confinado energéticamente en las juntas horizontales de las fábricas. Los ensayos realizados muestran como el tamaño de la junta influye en su resistencia a compresión, como era de esperar, sin embargo, se observa que a pesar de la mayor lentitud en el fraguado y endurecimiento de los morteros de cal, si el sistema estructural está bien diseñado y ejecutado, no existe una disminución significativa de su capacidad resistente a pesar de la plasticidad del mortero.

Palabras clave: Fábricas de piedra; Mortero de cal; Tamaño de la junta; Rehabilitación; Diseño de fábricas

Introducción

Es conocido el hecho de que una fábrica de piedra se comporta mejor cuanto mayor es la regularidad de los elementos que la conforman y de las juntas entre hiladas. Es más fiable una fábrica de sillares, que una de sillarejos, que una de carreteles o de perpiaños, que una de mampostería ordinaria, por establecer una gradación genérica.

Pero también una acertada distribución de las cargas resulta definitoria de su buen comportamiento. Por lo general, cuando la fábrica consiste en un muro activo, se procura repartir la carga gravitatoria de modo uniforme; y cuando es preciso aplicarle cargas puntuales se tiende a minimizar la importancia de éstas frente a las características resistentes del muro o se refuerza el punto de aplicación, por ejemplo, mediante contrafuertes.

Cuando la fábrica es más compleja, - como es el caso de los arcos, las bóvedas o las cúpulas, - la carga deja de ser vertical y lo hace de modo variable; en tal caso, la práctica aúna la simplicidad de diseño de las piezas iguales que la constituyen, las dovelas, con la evidencia de que las descargas no se producen siguiendo exactamente el trazado geométrico del elemento, que es un arco de circunferencia, sino que se acomodan a una suerte de parábola, - la catenaria invertida, - de modo que resulta preciso corregirlas, cargando los riñones de los elementos, macizando las enjutas o contrarrestando los esfuerzos horizontales en las impostas, por citar algunos ejemplos,

para conseguir que en cualquier caso la desviación entre la directriz de cada elemento y la resultante de carga se mantenga dentro del tercio central de inercia, para que cada pieza resulte solicitada únicamente a compresión.

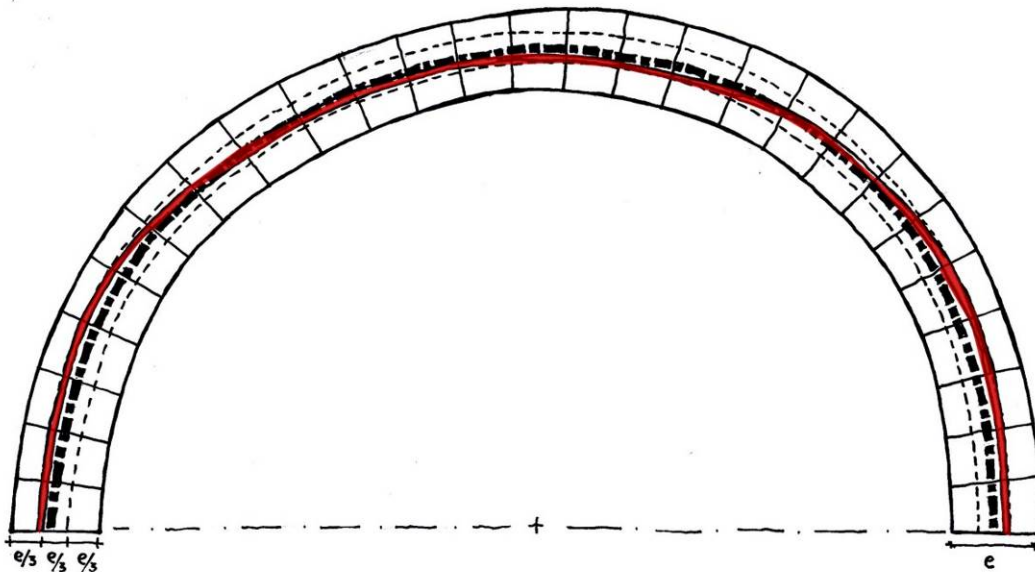


Figura 1: Dovelas de un arco de medio punto en el que se marca en rojo el trazado de la catenaria

Obviamente el diseño de la dovela se ha hecho de modo que las juntas entre ellas sean radiales, esto es, formando planos perpendiculares a la directriz circunferencial en cada punto; y de un espesor sensiblemente regular entre intradós y extradós.

Como la exigencia formal es mucho mayor en este tipo de fábricas que en las que conforman simples muros de carga, además es frecuente que las juntas con que se resuelven, sean más delgadas.

Es de sobra conocido el pernicioso efecto que sobre muchos tipos de piedra ejerce el mortero de cemento, por lo que ya no se discute la necesidad de emplear mortero de cal cuando se trate de rehabilitaciones o restauraciones, si se pretende preservar la fábrica en condiciones razonables de durabilidad; aunque, por otra parte, el mortero de cal presenta frente al de cemento el inconveniente de un proceso más lento de endurecimiento.

El factor plazo no resultaba un inconveniente en otros tiempos, cuando el grado de industrialización de la construcción era muy bajo, así como el grado de mecanización de operaciones. Así, alargándose de modo inevitable el período de entrada en carga de las fábricas, dicho factor pasaba desapercibido.

En cambio, en la actualidad ese aspecto suele resultar determinante; así que, con un mayor grado de industrialización, - fabricación mecánica en serie de conformados y prácticamente al momento, de conglomerantes, - y contando con más y mejores medios auxiliares, realmente sería posible acortar los plazos de entrada en carga.

Pero es entonces cuando supuestamente aparece el inconveniente de la lentitud de endurecimiento.

Sin embargo, una aplicación de los estudios llevados a cabo por Freyssinet sobre la plastificación de la garganta de la articulación para pilares de hormigón armado que lleva su nombre, nos permite admitir que un material como el mortero de cal, enérgicamente confinado, puede comportarse del modo que es de esperar en una junta horizontal con una relativa independencia del tiempo que haya transcurrido desde su fabricación.

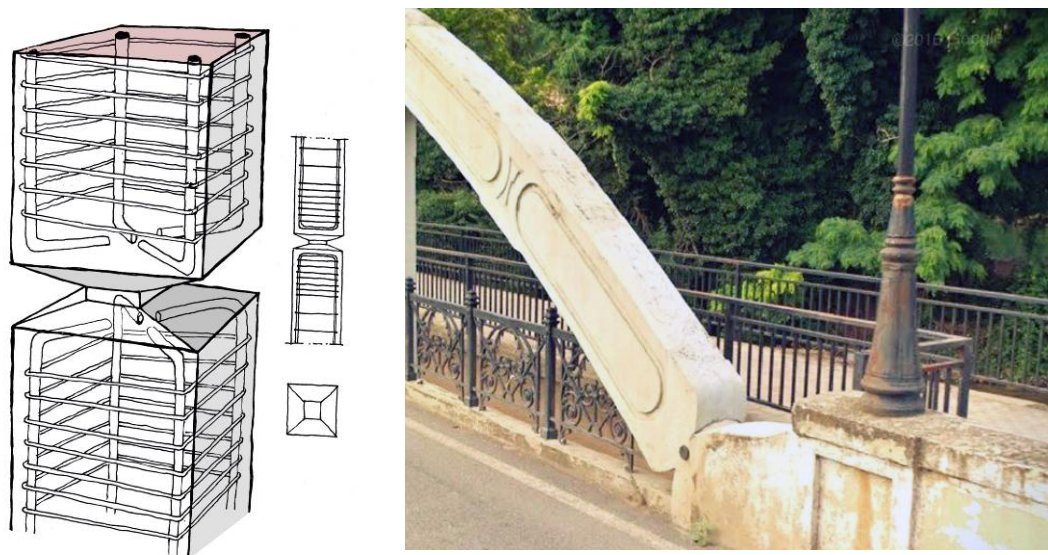


Figura 2: Articulación de Freyssinet. A la izquierda, esquema de armado en la zona de influencia. A la derecha, ejemplo de aplicación en la entrega de una armadura de puente.

La propuesta de Freyssinet consiste en crear una articulación en el propio cuerpo de un pilar de sección cuadrada, dejando en él una garganta también de planta cuadrada y muy escasa altura, obtenida mediante una disminución regular del pilar por encima y debajo de aquélla, mediante sendos troncos de pirámide, en los que el armado transversal es muy importante.

La carga del pilar se concentra en la garganta hipercomprimiéndola, de modo que es solicitada bajo una carga cinco o seis veces superior a la admisible por el hormigón, plastificándolo; pero el rozamiento en ambos planos de contacto con el material de la garganta es tan importante que se ve impedida su deformación transversal y por lo tanto, su rotura.

Sin embargo, como se trata de una articulación que, por definición, tiene permitido el giro, si éste llegase a producirse en una determinada proporción suficiente para originar cierto grado de descompresión en alguno de los lados, ello bastaría para expulsar violentamente el material, con el resultado de inmediato colapso: Por ello, la articulación de Freyssinet debe tener muy limitada su capacidad de giro.

El principio que se toma del citado mecanismo es el de que cuanto más fina sea una junta, la capacidad mecánica del material que la ocupa, resulta menos relevante, con tal de que se le haga trabajar bajo una tensión uniforme; de que se trate de un material elastoplástico; y ello con independencia de que haya alcanzado el estado plástico. Lo que resultará determinante es su

deformación en los primeros estadios de carga que, en el caso de las fábricas de piedra se limitan prácticamente al aumento de su peso propio.

La consecuencia inmediata es que, en la rehabilitación o restauración de fábricas de piedra, los plazos de entrada en carga carecen de importancia, con tal de que se disponga rejuntado fino y dicha carga solicite al material de junta de modo homogéneo.

Ello no hace más que confirmar los criterios de buena práctica propios de la fábrica de sillería en que se pretende acercar todo lo posible el comportamiento mecánico de la fábrica al de la piedra que la constituye, pasando a ser el material de rejuntado una especie de almohadilla de regularización de la planeidad respectiva de lechos y contralechos; y sólo en un segundo término, un material de agarre.

Ensayos

Para ilustrar esta hipótesis hemos llevado a cabo unos sencillos ensayos de compresión sobre unas muestras constituidas por sillarejos de granito, de caliza y de arenisca, todos ellos de 24 cm x 11,5 cm x 11,5 cm, variando el espesor del rejuntado de mortero de cal.

Han sido fabricadas un total de seis probetas formadas por dos sillarejos y una junta horizontal entre ellos.

Dos de ellas han sido hechas con piezas de granito; otras dos, con piezas de arenisca y otras dos, empleando piedra caliza.

Para cada material se ha dispuesto en una de las probetas una junta de 10 mm de espesor y en otra, una junta de 20mm.

El rejuntado se ha hecho con un mortero de cal fabricado con una proporción arena-cal de 1:1. Se han fabricado todas el mismo día y se han ensayado también el mismo día, tras haber dejado transcurrir un plazo de 36 días. También se fabricaron tres probetas del mismo mortero, de 4 x 4 x 16 cm, que se ensayaron a flexotracción y compresión el mismo día que las probetas de fábrica.

A los efectos que nos interesan la media de resistencia a compresión del mortero de cal a esa edad fue de 11,2 kg/cm² (1,1 kN/cm²)



Figura 3: Juegos de probetas de fábrica preparados para el ensayo con Arenisca. Puede apreciarse, a la derecha, el rejunto grueso, a la izquierda, el más fino



Figura 4: Juegos de probetas de fábrica preparados para el ensayo con Caliza. Puede apreciarse, a la derecha, el rejunto grueso, a la izquierda, el más fino



Figura 5: Juegos de probetas de fábrica preparados para el ensayo con Granito. Puede apreciarse, a la derecha, el rejunto grueso, a la izquierda, el más fino

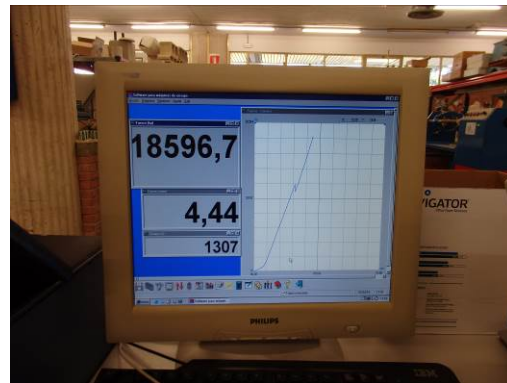


Figura 6: Rotura de la probeta con piezas de arenisca con junta fina. En la gráfica puede observarse en punto de rotura con un escalón de cedencia. El mortero de los bordes se ha desprendido

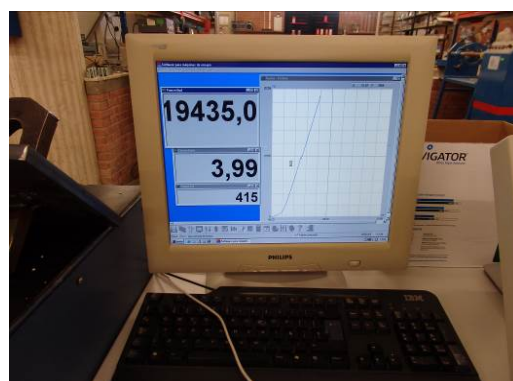


Figura 7: Como en el caso anterior la rotura de la probeta con piezas de caliza con junta fina se produce en el centro de la superior. También en la gráfica se aprecia el punto de rotura con un pequeño escalón de cedencia



Figura 8: En el caso de la fábrica de granito, la probeta de junta gruesa ha roto como las precedentes, por fractura vertical de la pieza superior, con gran desprendimiento de mortero de los bordes. Hubo de suspenderse el ensayo de la muestra de junta fina, pues se alcanzó el tope de carga de la prensa. No llegó a haber pérdida de mortero en bordes

Resultados

Los resultados de los ensayos a compresión se resumen en la Tabla 1:

Tabla 1: Resultado de los ensayos con los ditintos tipos de fábricas

Fábricas	Carga de Rotura (kp)	Resistencia (kp/cm ²)	Acortam. (mm)	Observaciones
Arenisca 01 (J. gruesa)	17.605,3	63,78	5,02	Rotura por aplastamiento, con grietas verticales en un extremo
Arenisca 02 (Junta fina)	18.596,7	67,38	4,44	Rotura por grieta vertical en el centro A los 44 kp/cm ² , escalón de cedencia en la gráfica al aparecer la primera grieta
Caliza 01 (J. gruesa)	18.180,1	65,87	3,58	Rotura por grieta vertical en el centro No hay escalón de cedencia en la gráfica
Caliza 02 (Junta fina)	19.435,0	70,42	3,99	Rotura por grieta vertical en el centro A los 36,2 kp/cm ² , escalón de cedencia en la gráfica al aparecer la única grieta
Granito 01 (J. gruesa)	18.755,2	67,95	4,55	Rotura por grieta vertical en el centro No hay escalón de cedencia en la gráfica
Granito 02 (Junta fina)	19.800,0	71,74	3,32	Se detiene el ensayo antes de alcanzar el límite de la prensa. NO ROMPE

Análisis de los resultados y conclusiones

La primera observación se refiere a la resistencia de la fábrica en relación con el espesor: como era de suponer, aumenta cuando disminuye el espesor de la junta; pero el aumento no guarda relación con la resistencia de la piedra, quedando en la incertidumbre el valor de la de granito, limitado por la capacidad de la prensa.

En segundo lugar, la aparición de un escalón de cedencia en las fábricas de arenisca y de caliza junto a la observación de que el mortero se va desprendiendo en los bordes a medida que aumenta la presión, parece indicar que el gran espesor de la junta no impide que se produzca el ensanchamiento por tracción transversal y consiguiente colapso del mortero, responsable de la brusca,- aunque corta,- caída de la gráfica. Ello no ocurre en el granito, que sólo se parte cuando se agota el conjunto.

En tercer lugar, la rotura por aplastamiento y sin escalón de cedencia de la fábrica de arenisca con junta gruesa, denota el tipo de piedra más débil de los tres que se ha manejado.

Y finalmente cabe observar la mayor deformabilidad de cualquiera de las fábricas de junta gruesa frente a las de junta fina. Ello, junto al hecho de que un buen rejuntado de sillares no suele superar los 5 mm de espesor; y al de que las cargas habituales en una fábrica nunca son tan elevadas como las que se emplean en los ensayos, permite aventurar que en efecto, la mayor lentitud de fraguado y endurecimiento de los morteros de cal resulta irrelevante a efectos prácticos, siempre que el sistema estructural esté bien diseñado y se esté produciendo un reparto homogéneo de las cargas.

A avaliação do comportamento hídrico de argamassas com base em cal: O efeito dos agregados na capacidade de proteção

Ana Rita Santos⁽¹⁾, Maria do Rosário Veiga⁽²⁾, António Santos Silva⁽³⁾, Jorge de Brito⁽⁴⁾

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, arsantos@lnec.pt

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, rveiga@lnec.pt

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, ssilva@lnec.pt

(4) CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, jb@civil.ist.utl.pt

Resumo

As intervenções de reabilitação em revestimentos exteriores de edifícios antigos, em geral com alteração de materiais e de processos construtivos originais, nem sempre têm contribuído para melhorar o seu estado de conservação, sendo mesmo frequentemente responsáveis pela aceleração de diversos mecanismos de degradação.

De facto, a maioria dos mecanismos de degradação envolve a presença de água e o movimento desta no interior das alvenarias. Portanto, as argamassas de reparação, nomeadamente para edifícios antigos, devem dificultar a penetração da água até ao suporte (absorção relativamente lenta), mas principalmente devem favorecer a evaporação da água que se introduziu na parede, quer através da própria argamassa, quer por capilaridade ascendente através das fundações, ou ainda através de coberturas e remates.

Com efeito, estas características estão fundamentalmente relacionadas com a estrutura porosa que comanda a capacidade para transportar, reter e expulsar a água por evaporação, influenciando também, em consequência, o comportamento aos sais e ao gelo. A microestrutura é, por sua vez, condicionada por diversos aspetos, entre os quais se destacam as características dos agregados utilizados na composição das argamassas.

Na presente comunicação são estudadas três composições de argamassa com base em cal aérea, discutindo-se a influência da mineralogia de três tipos de agregados no seu comportamento hídrico, através de indicadores de absorção e de secagem, e relacionando-o com a sua estrutura porosa.

Palavras-chave: Agregado; Cal aérea; Coeficiente de capilaridade; Índice de secagem, Durabilidade.

Introdução

Para se garantir um adequado comportamento dos revestimentos de edifícios contra os agentes de degradação, nomeadamente a água, é necessário quantificar e avaliar as características que o satisfaçam. Assim, é fundamental estudar as características que envolvem processos de transporte de água [Veiga, 2017; Veiga et al., 2013; Veiga, 2012; Magalhães e Veiga, 2008].

O parâmetro que influencia de forma mais significativa o desempenho das argamassas é a sua estrutura porosa [RILEM, 2012], que por sua vez é condicionada por diversos aspetos, entre os quais se destacam as características dos agregados utilizados na composição das argamassas. A natureza do agregado tem influência na ligação com o ligante; com efeito, se os agregados apresentarem uma afinidade química com o ligante (como é o caso do agregado calcário com as argamassas de cal aérea), isso conduz a uma ligação forte e coesa, que promove a compacidade da argamassa, tornando-a assim menos porosa, principalmente nas zonas de interface e, por consequência, a argamassa terá tendência a absorver menor quantidade de água; contudo, a sua secagem será mais demorada. A natureza mineralógica dos agregados e a existência de minerais secundários podem afetar diretamente as taxas de absorção e secagem. A forma e a granulometria dos agregados podem conduzir a rearranjos entre as partículas que originem uma melhor disposição e preenchimento do espaço, resultando assim em argamassas mais coesas e com poros mais pequenos [Santos et al., 2017; Fragata e Veiga, 2010; Pavía e Toomey, 2008; Stefanidou e Papayianni, 2005; Von Konow, 2003].

Um aumento de porosidade pode afetar de forma significativa as resistências mecânicas das argamassas, levando a um decréscimo desses valores. No entanto, do ponto de vista da otimização das características de absorção e secagem das argamassas, um aumento de porosidade pode incrementar a resistência ao gelo/degelo [Santos et al., 2018]. Assim, em função do tipo de desempenho a exigir às argamassas, o qual deve estar relacionado com as funções a que estas se destinam no edifício, é necessário estabelecer um equilíbrio entre as diferentes características.

No que se refere à normalização em vigor, é possível quantificar o valor de absorção de água por capilaridade e de absorção máxima através da norma europeia EN 1015-18 [CEN, 2002]. No entanto, o procedimento necessita de ser adaptado para a avaliação em argamassas de cal aérea, uma vez que estas, devido à elevada presença de poros capilares grandes, apresentam uma elevada velocidade de absorção de água nos instantes iniciais e os semiprovetes alcançam a saturação muito rapidamente, não permitindo, conforme disposto na norma, determinar o coeficiente de absorção capilar entre 10 e 90 minutos. Pode-se assim recorrer ao procedimento da norma europeia EN 15801 [CEN, 2009]. Por outro lado, é também possível determinar parâmetros de secagem: o índice de secagem (ID), que representa a resistência de um material à evaporação de água [Flores-Colen et al., 2016; Brito et al., 2011] e, de acordo com a norma europeia EN 16322 [CEN, 2013], as taxas de secagem correspondentes à primeira (D_1) e segunda (D_2) fases de secagem, que traduzem a velocidade de transporte, respetivamente, da água líquida até à superfície, e sob a forma mista líquida e de vapor, no interior das argamassas [Damas et al., 2018].

Pretende-se assim, com este trabalho, avaliar a influência da mineralogia de três tipos de agregados no comportamento hídrico de argamassas de cal aérea, através de indicadores de absorção de água por capilaridade e de secagem, relacionando estes com a sua estrutura porosa, aos 28, 90 e 360 dias, de forma a compreender o seu comportamento e, assim, melhorar o desempenho destas argamassas.

Materiais e métodos

Materiais e preparação das argamassas

As argamassas foram formuladas utilizando cal aérea hidratada em pó CL90-S, com as características definidas na norma NP EN 459-1 [IPQ, 2015] e três areias naturais de mineralogias distintas: uma siliciosa natural lavada (AI); uma calcária britada (C), uma granítica britada (G).

A areia AI (1490 kg/m^3) é muito rica em SiO_2 (92,5 %) e apresenta grãos sub-rolados, pouco esféricos, com superfície lisa. A areia C (1460 kg/m^3), que apresenta grãos angulares com baixa esfericidade e superfícies laminares e lisas, é maioritariamente constituída por CaCO_3 (96,1 %). A areia G (1430 kg/m^3) apresenta como principais compostos cristalinos, quartzo, feldspatos, mica e clorite e apresenta grãos de superfície rugosa, pouco esféricos.

De modo a minimizar a variável da distribuição granulométrica, as areias em análise foram calibradas conforme a composição granulométrica da areia de referência CEN, definida na norma NP EN 196-1 [IPQ, 2017] (Figura 1).

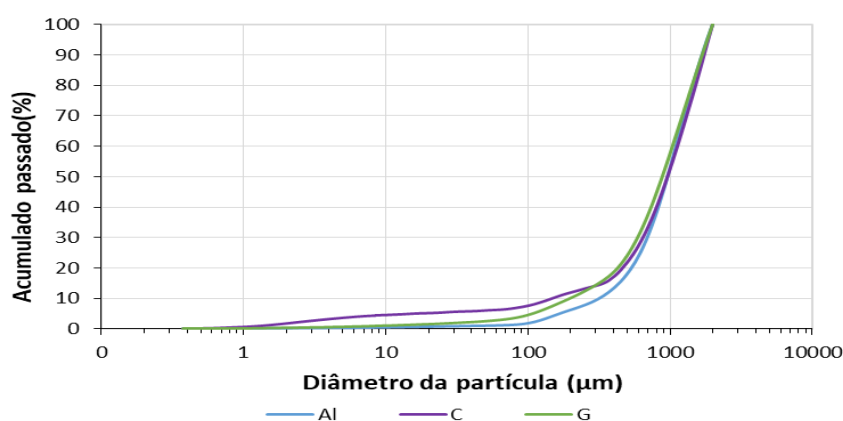


Figura 1: Curvas da distribuição granulométrica das areias em estudo.

Foi utilizada uma relação volumétrica ligante/agregado (b/a) de 1:2,5 na preparação das argamassas e a relação água/ligante (w/b) foi ajustada para garantir uma trabalhabilidade adequada, para argamassas de revestimento de cal, tendo sido fixado um espalhamento de $150 \pm 5 \text{ mm}$, medido na mesa de espalhamento de acordo com a norma EN 1015-3 [CEN, 1999] (Quadro 1). Todas as argamassas foram preparadas de acordo com EN 1015-2 [CEN, 1998], moldadas em moldes prismáticos normalizados, e sujeitas às condições de cura de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ de temperatura e 65 % de humidade relativa, desde a moldagem até às datas de ensaio.

Quadro 1: Propriedades das argamassas em estado fresco

Areia	Argamassa	b/a	w/b	Espalhamento (mm)	Massa volúmica aparente (kg/m^3)
AI	Ca AI CP	1:2,5	2,4	149	1950
C	Ca C CP		2,2	149	2030
G	Ca G CP		2,4	149	1950

Metodologia

Tendo em conta os objetivos estabelecidos, foi adotada uma metodologia que envolveu a análise da microestrutura e avaliação do comportamento hídrico das argamassas. Os ensaios foram realizados sobre as argamassas no estado endurecido às idades de 28, 90 e 360 dias.

Para avaliar as alterações na estrutura porosa, foi utilizada a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), recorrendo a um porosímetro de mercúrio *Micromeritics AutoPore IV 9500*, com uma pressão entre 0,0015 e 207 MPa, permitindo a avaliação da distribuição de tamanho de poro numa gama compreendida entre 0,007 e 600 μm . O equipamento regista automaticamente a pressão, o diâmetro do poro e o volume de intrusão. Foi ainda realizado o ensaio de avaliação da porosidade aberta das argamassas, com base na norma europeia EN 1936 [IPQ, 2008], através do método da pesagem hidrostática, após imersão em vácuo.

O ensaio de absorção capilar foi realizado com base na norma europeia EN 15801 [CEN, 2009] que consiste em imergir em água, com uma altura aproximada de 10 mm, a base de provetes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm³ e realizando pesagens periódicas de massa até se atingir a saturação dos provetes (variação de massa inferior a 1 % em 24 horas). Considera-se que o valor máximo de água absorvida por capilaridade por unidade de área é traduzido pelo valor assintótico (Abs.) e o declive do troço inicial do gráfico define o coeficiente de capilaridade (C), que traduz a velocidade com que ocorre a absorção capilar nos instantes iniciais.

A cinética de secagem das argamassas testadas foi avaliada segundo a norma europeia EN 16322 [CEN, 2013], imediatamente após o ensaio de capilaridade, consistindo em registar periodicamente a variação de massa até à sua estabilização. A partir das curvas de secagem, que traduzem a variação no tempo do teor em água, determinou-se o índice de secagem (ID), utilizando, como método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio, e as taxas de secagens correspondentes à primeira (D_1 , em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$) e segunda (D_2 , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$) fases de secagem.

Resultados e discussão

Distribuição porosimétrica

A Figura 2 apresenta a variação da área total de poros e o diâmetro médio de poro das argamassas em estudo, obtidos por MIP, ao longo do tempo de carbonatação. Como seria de esperar, devido aos fenómenos de carbonatação, a área total tende a diminuir com a idade dos provetes, sendo que a variação mais significativa é registada de 28 para 90 dias (aproximadamente 47 % para todas as argamassas). A área total de poros é muito idêntica para as argamassas de cal com areia siliciosa e areia calcária, enquanto as argamassas com areia granítica apresentam uma menor área. O diâmetro médio de poro apresenta uma tendência inversa à da área total de poros, uma vez que é verificado um incremento do seu diâmetro com o tempo de cura para todas as argamassas. O diâmetro médio superior é observado nas argamassas com areia granítica, enquanto as argamassas com areia siliciosa e calcária mostram idênticas tendências.

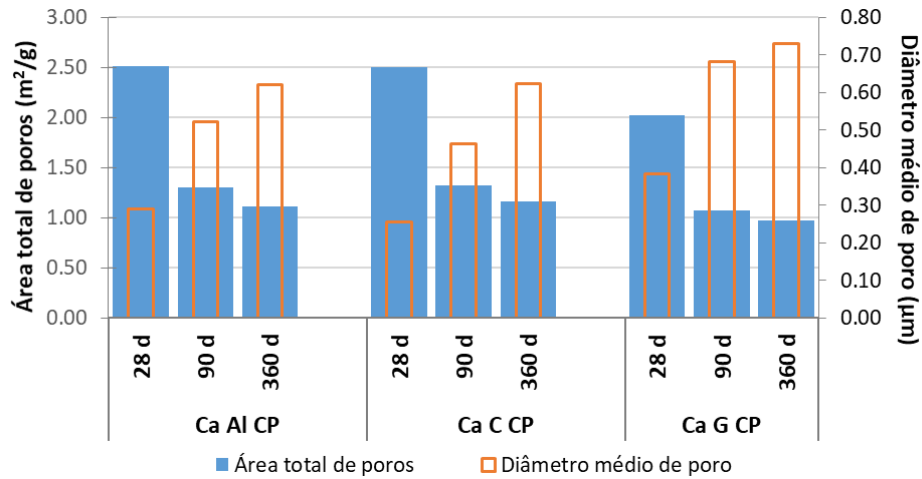
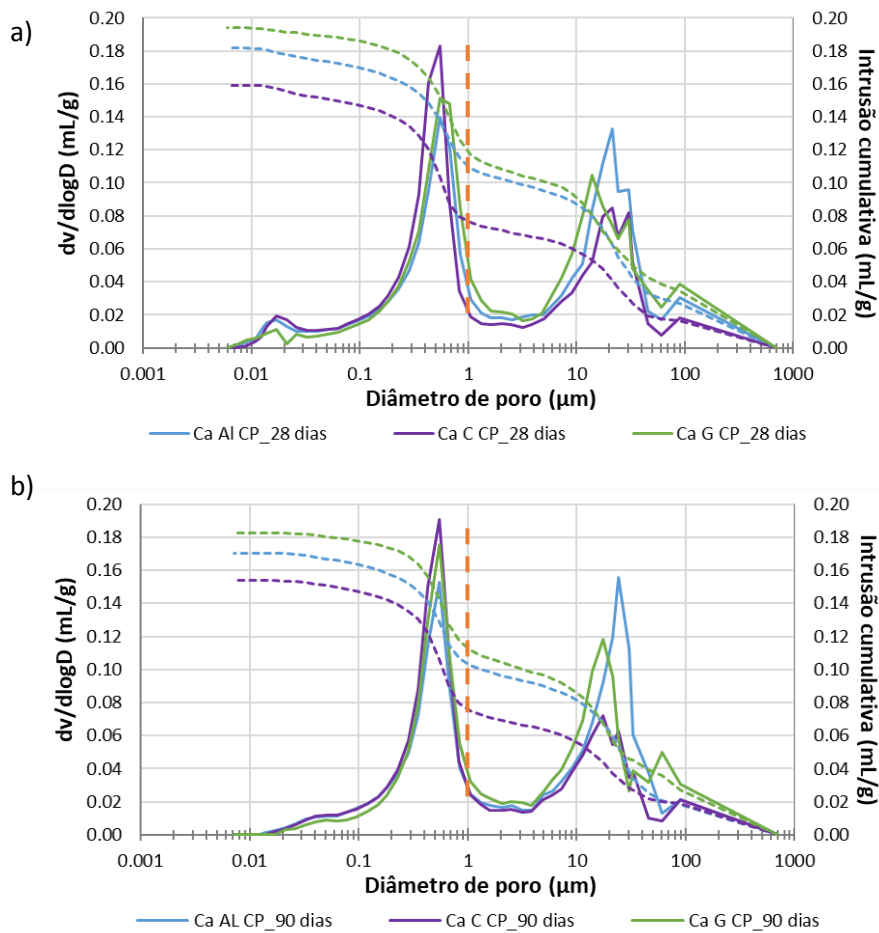


Figura 2: Evolução da área total de poros e do diâmetro médio de poros aos 28, 90 e 360 dias nas argamassas de cal área e areia siliciosa (Ca AI CP), calcária (Ca C CP) e granítica (Ca G CP).

A Figura 3 apresenta as curvas de distribuição porosimétrica aos 28, 90 e 360 dias.



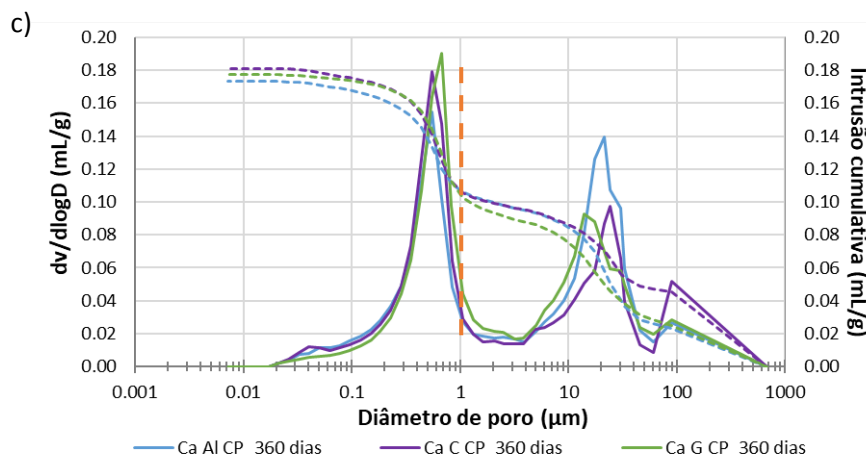


Figura 3: Curvas de distribuição porosimétrica aos: a) 28 dias; b) 90 dias; c) 360 dias.

Em geral, para cada tipo de argamassa, as curvas de distribuição porosimétrica exibem comportamentos semelhantes ao longo do tempo de cura. Todas apresentam uma distribuição bimodal, composta por um pico principal, que corresponde aproximadamente a diâmetros de poros entre 0,1 e 1,0 μm , considerado típico das argamassas de cal aérea [Lawrence et al., 2007] e por um pico, menos expressivo, entre 5,0 e 60 μm , em que o diâmetro e a sua intensidade variam consoante o tipo de areia utilizado na argamassa.

Durante o processo de carbonatação, o diâmetro de poro do pico principal (entre 0,1 e 1,0 μm) mantém-se constante para as argamassas Ca Al CP e Ca C CP (0,55 μm), enquanto nas argamassas Ca G CP incrementa de 90 para 360 dias (0,55 para 0,68 μm). Este pico principal é identificado como tamanho de poro crítico e reflete a maior ou menor capacidade de percolação [Pipilikaki e Beazi-Katsioti, 2009].

Na gama principal dos poros capilares (0,1 a 1 μm), a argamassa com areia siliciosa é a que apresenta um menor volume de poros, ao contrário da argamassa com areia calcária que, em geral, apresenta um maior volume de intrusão. Lawrence et al. (2007) atribuem o incremento desta gama de porosidade à aglomeração de cristais amorfos ou semiamorfos de carbonato de cálcio. O volume tende a incrementar de 28 para 90 dias, mas apenas a argamassa Ca G CP apresenta um incremento de 90 para 360 dias, o que indicia velocidades de carbonatação desta argamassa mais lentas.

Na Figura 3a é possível observar um pequeno volume de poros com dimensões < 0,02 μm , que tende a diminuir ao longo do processo de carbonatação.

Na gama dos macroporos (5,0 μm a 60 μm), verificou-se que a argamassa Ca Al CP apresenta um maior volume de poros e, em geral, poros com maior diâmetro. A argamassa Ca C CP apresenta, para todas as idades, um menor volume e uma gama mais restrita de diâmetros. O decréscimo de volume da argamassa Ca C CP poderá estar associado à alta coesão existente entre os agregados calcários e a matriz de cal, que reduz a porosidade na zona de interface agregado/pasta (ITZ) (Figura 4). Nestas duas argamassas, à semelhança do comportamento detetado nos poros capilares, o volume de poros incrementa até aos 90 dias e depois regista um ligeiro decréscimo. A argamassa Ca G CP verifica volumes totais intermédios, que incrementam

ao longo do processo de carbonatação, sendo esta argamassa a que apresenta uma gama de diâmetros mais amplificada neste intervalo.

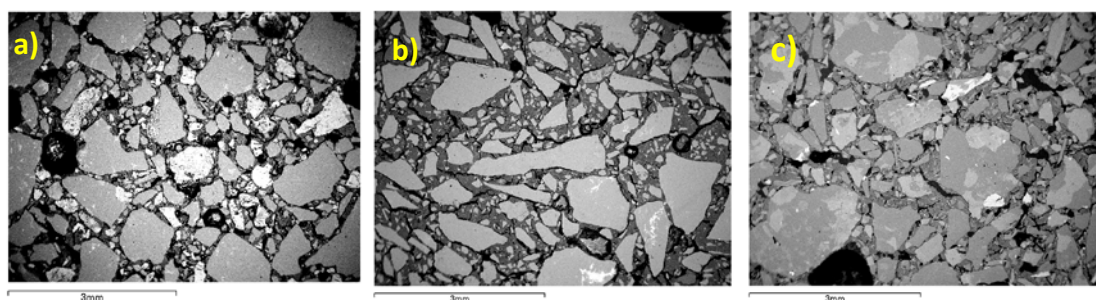


Figura 4: Imagens ao microscópio eletrónico de varrimento da estrutura das argamassas aos 360 dias: a) Ca Al CP; b) Ca C CP; c) Ca G CP.

Absorção capilar e cinética de secagem

O Quadro 2 apresenta os valores médios do coeficiente de capilaridade (C) obtido como o declive do gráfico de absorção de água (Figura 5), da absorção de água às 24 horas (Abs._{24h}), do índice de secagem (ID), a primeira e a segunda taxas de secagem (D_1 e D_2) obtidas como os declives do gráfico de secagem; e ainda a porosidade aberta (P_o) determinada aos 28, 90 e 360 dias. A Figura 6 representa as curvas de absorção e secagem de água das argamassas em estudo.

Quadro 2: Valores médios do coeficiente de absorção capilar, absorção máxima às 24 horas, índice de secagem e taxas de secagem e porosidade aberta aos 28, 90 e 360 dias.

Argamassa		C (kg/m ² min ^{1/2})	Abs. 24h (kg/m ²)	ID	D_1 (kg/m ² h)	D_2 (kg/m ² h ^{1/2})	Po (%)
Ca Al CP	28 dias	1,51 ± 0,03	32,9 ± 0,24	0,40 ± 0,06	0,18 ± 0,03	4,14 ± 0,65	24,6 ± 0,15
	90 dias	1,51 ± 0,04	32,6 ± 0,10	0,53 ± 0,09	0,18 ± 0,05	4,17 ± 0,12	24,9 ± 0,16
	360 dias	1,30 ± 0,05	31,4 ± 0,10	0,28 ± 0,02	0,55 ± 0,04	3,97 ± 0,11	25,2 ± 0,14
Ca C CP	28 dias	1,54 ± 0,07	34,3 ± 0,10	0,45 ± 0,05	0,10 ± 0,03	3,28 ± 0,76	23,9 ± 0,14
	90 dias	1,61 ± 0,02	34,8 ± 0,31	0,50 ± 0,03	0,10 ± 0,02	5,70 ± 0,08	24,8 ± 0,15
	360 dias	1,62 ± 0,03	35,2 ± 0,11	0,45 ± 0,04	0,20 ± 0,04	4,59 ± 0,60	25,4 ± 0,15
Ca G CP	28 dias	1,43 ± 0,02	33,2 ± 0,10	0,33 ± 0,04	0,31 ± 0,04	3,91 ± 0,04	24,1 ± 0,14
	90 dias	1,53 ± 0,02	33,8 ± 0,10	0,39 ± 0,05	0,34 ± 0,06	5,32 ± 0,49	25,7 ± 0,12
	360 dias	1,49 ± 0,01	33,9 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,29 ± 0,05	3,40 ± 0,40	26,1 ± 0,16

No que se refere às características de absorção de água por capilaridade (Quadro 2) é possível observar que a argamassa com areia calcária (Ca C CP) apresenta a maior velocidade de absorção capilar inicial (C) em todas as idades, enquanto a argamassa com areia granítica (Ca G CP) apresenta os coeficientes inferiores aos 28 dias e a argamassa com areia siliciosa (Ca Al CP) apresenta os menores coeficientes a 90 e 360 dias (Figura 5), embora sempre com valores

muito próximos. Este comportamento pode ser justificado pela variação de volume na gama de poros capilares, representada essencialmente pelo pico principal, onde Ca Al CP possui um menor volume.

Os valores de absorção máxima de água, por unidade de superfície do provete, às 24 horas, mostram a mesma tendência, sendo a argamassa Ca Al CP a que absorve menor volume de água e cuja quantidade tende a diminuir com o processo de carbonatação. Por outro lado, a argamassa com areia calcária (Ca C CP) absorve um maior volume e incrementa com a carbonatação, à semelhança da argamassa Ca G CP. Esta variação está em geral em consonância com a variação da porosidade aberta (Po), que em grande parte condiciona a absorção máxima. No entanto, nestas argamassas com volume significativo de macroporos, esta relação pode ser alterada pela macroporosidade com dimensões acima da gama capilar, que influencia Po mas não interfere na absorção capilar máxima.

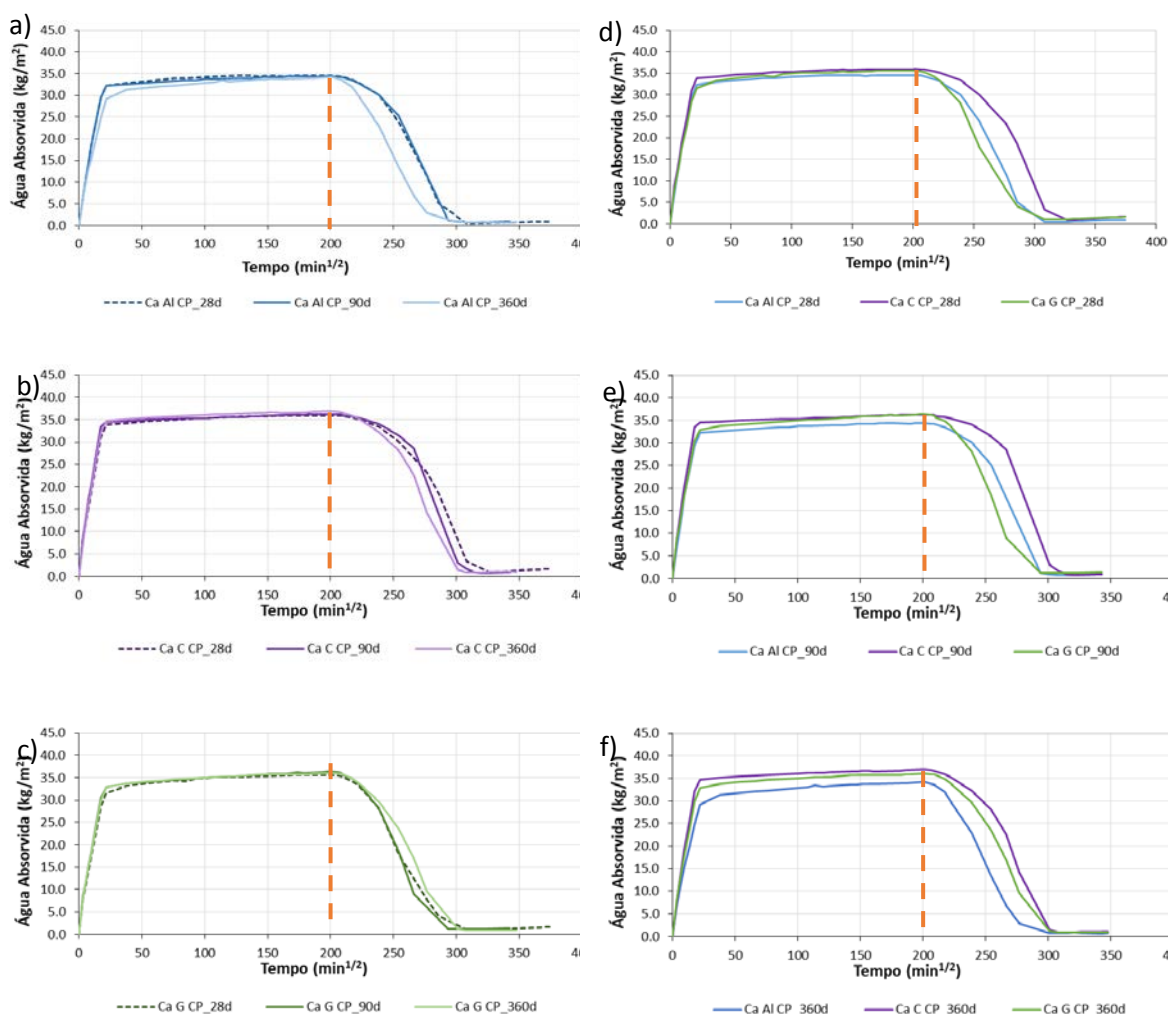


Figura 5: Evolução da absorção e secagem da água absorvida nas argamassas: a) Ca Al CP; b) Ca C CP; c) Ca G CP, aos d) 28 dias; e) 90 dias; f) 360 dias.

Assim, por exemplo, a argamassa Ca Al CP aos 28 dias tem a maior porosidade aberta e a menor absorção capilar às 24 h, provavelmente porque uma parte do volume de macroporos, que é particularmente elevado, está acima da gama capilar. Na mesma argamassa a porosidade aberta

umenta dos 28 para os 360 dias, enquanto a absorção de água continua diminuir, possivelmente devido ao facto do aumento de porosidade se dar principalmente na gama dos macroporos supracapilares.

No que diz respeito à cinética de secagem (Quadro 2 e Figura 6), é possível observar que a argamassa com areia calcária (Ca C CP) apresenta índices de secagem (ID) em geral mais elevados do que as restantes amostras, apresentando uma maior resistência à secagem, possivelmente associada à baixa macroporosidade desta argamassa. Para todas as argamassas, verifica-se um incremento de ID de 28 para 90 dias mas um decréscimo para 360 dias, que é menos acentuado na argamassa Ca G CP. Esta tendência está de acordo com a variação de volume, ao longo do processo de carbonatação, na gama dos macroporos. A argamassa Ca G CP, que apresenta, em geral, ID's inferiores, mas não um maior volume de macroporos, exhibe uma elevada porosidade aberta, o que permite a libertação de água para o exterior de forma mais acentuada.

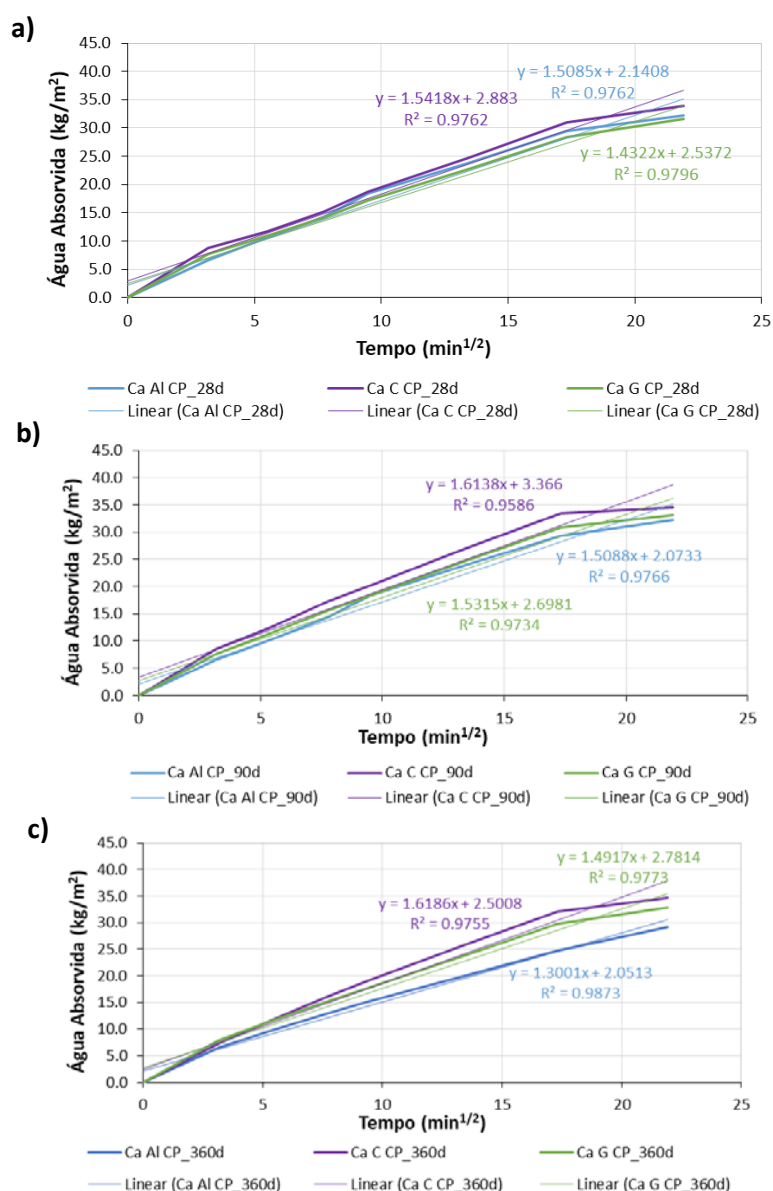


Figura 6: Troço inicial da curva de absorção de água aos: a) 28 dias; b) 90 dias; c) 360 dias.

No que diz respeito às taxas de secagem, D_1 e D_2 , é possível verificar que a argamassa Ca C CP apresenta, em geral, um menor D_1 e um elevado D_2 aos 90 e 360 dias, o que representa um baixo transporte de água líquida para a superfície e uma alta difusão de vapor de água. A baixa macroporosidade pode ser responsável pela redução da primeira fase de evaporação.

Por outro lado, a argamassa Ca G CP apresenta elevados valores de D_1 e intermédios D_2 , o que se traduz em alto teor de água transportada até à superfície e também uma moderada evaporação, que está de acordo com os seus elevados valores de porosidade aberta.

Conclusões

Na presente comunicação, a influência da mineralogia dos agregados nas alterações da microestrutura das argamassas de cal aérea e, conseqüentemente, no comportamento hídrico das argamassas foi avaliada. Para tal, foram estudados três agregados de distintas mineralogias (siliciosa, calcária e granítica) com semelhante distribuição granulométrica.

Dos resultados obtidos, é possível concluir que a mineralogia dos agregados tem a capacidade de alterar a microestrutura das argamassas e, conseqüentemente, o seu desempenho, mantendo o teor de ligante e a granulometria.

A argamassa com areia calcária apresenta semelhanças químicas entre a cal e o agregado, o que conduz à diminuição da macroporosidade da zona de ITZ (\approx entre 5 e 60 μm) devido à boa continuidade na interface entre os cristais de calcite do agregado e os cristais de calcite recém-formados da matriz e a um incremento do volume de poros capilares (0,1 a 1,0 μm) que conduzem também ao incremento da taxa de carbonatação. Esta continuidade entre o agregado e a matriz do ligante não existe em argamassas com agregados siliciosos, que são, de facto, as que apresentam uma maior percentagem de macroporosidade.

As diferenças na porosidade das argamassas também têm um papel importante no comportamento hídrico: a gama de poros capilares tem grande influência na absorção de água por capilaridade, uma vez que maiores volumes nesta gama conduzem a velocidades de absorção mais elevadas, enquanto maiores porosidades abertas se refletem em maiores quantidades máximas de água livre absorvida.

No que se refere à secagem, uma elevada percentagem de macroporosidade está, em geral, associada a D_1 mais elevados (um bom transporte de água líquida). No entanto, para valores de macroporos semelhantes, maiores porosidades totais contribuem para o aumento de D_1 . O processo de transporte misto que ocorre na segunda fase de secagem, quantificado por D_2 , apresenta-se muito heterogéneo, como seria expectável por envolver dois mecanismos de transporte. Com efeito, deve-se ter em conta que a água que não é removida da argamassa durante a primeira fase é retirada na segunda fase, de uma forma mista (líquida mais vapor), envolvendo a totalidade da porosidade aberta.

Assim, verificou-se que a utilização de agregado calcário em argamassas de cal conduz a velocidades de absorção mais elevadas e a maiores quantidades máximas de água livre absorvida. Além disso, devido à boa coesão entre a matriz e os grãos calcários, a libertação de água livre é demorada, o que as torna mais vulneráveis à degradação do revestimento e do

suporte. Por outras palavras, a argamassa com agregado calcário tem menor capacidade de proteção das alvenarias à água do que as argamassas com os outros tipos de areia. As argamassas com areia granítica apresentam coeficiente de absorção de água moderado e elevada porosidade aberta, que permite uma rápida secagem da água (líquida ou em vapor) absorvida, nomeadamente em idades em que a carbonatação não está completa. Este facto apresenta-se como um aspeto positivo no contexto da reabilitação, favorecendo a secagem de suportes com elevados teores de humidade.

Conclui-se ainda que os indicadores estudados para absorção e secagem são representativos do tipo de estrutura porosa e das características analisadas. No entanto, em argamassas que ainda apresentem elevados teores de portlandite, isto é, baixa carbonatação, estes índices necessitam de uma análise mais cuidada.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração das empresas *Agregados S.A.* e *Lusical S.A.* pelo fornecimento dos materiais, à Universidade de Navarra, e em especial ao Professor José Ignacio Álvarez, pela realização e colaboração nos ensaios MIP; ao LNEC, I.P. através da colaboração nos Projetos “PRESERVE” e “REUSE”, ao projeto “DB-HERITAGE”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e ainda ao CERIS do IST.

Referências bibliográficas

- Brito, V.; Dias, T.G; Faria, P. (2011). *Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*. Journal of Coatings Technology and Research, vol. 8 (4), pp. 513-525.
- Damas, A.L.; Veiga, M.R.; Faria, P.; Santos Silva, A. (2018). *Characterisation of old azulejos setting mortars: A contribution to the conservation of this type of coatings*, Construction and Building Materials, vol. 171, pp. 128-139.
- Flores-Colen, I.; Silva, L.; de Brito, J.; Freitas, V. (2016). *Drying index for in-service physical performance assessment of renders*. Construction and Building Materials, vol. 112 (1), pp. 1101-1109.
- Fragata, A.; Veiga, M.R. (2010). *Air lime mortars: the influence of calcareous aggregate and filler addition*. Materials Science Forum, vols. 636-637, pp. 1280-1285.
- Lawrence, M.; Mays, T.; Rigby, S.; Walker, P.; D'Ayala, D. (2007). *Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars*, Cement and Concrete Research, vol. 37 (7), pp. 1059-1069.
- Magalhães, A.C.; Veiga, M.R. (2008). *Physical and mechanical characterisation of ancient mortars. Application to the evaluation of the state of conservation*. Materiales de Construcción, vol. 59 (295), pp. 61-77.
- Pavía, Sara; Toomey, B. (2008). *Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars*. Materials and Structures, vol. 41, pp. 559-569.

Pipilikaki, P.; Beazi-Katsioti, M. (2009). *The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes*, Construction and Building Materials, vol. 23 (5), pp. 1966-1970.

RILEM TC 203-RHM. (2012). *Repair mortars for historic masonry: Performance requirements for renders and plasters*. Materials and Structures, vol. 45, pp. 1277-1285.

Santos, A.R.; Veiga, M.R.; Matias, L.; Santos Silva, A.; de Brito, J. (2018). Durability and compatibility of lime-based mortars: the effect of aggregates. In Rehabend 2018 - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. Cáceres.

Santos, A.R.; Veiga, M.R.; Santos Silva, A.; de Brito, J. (2017). *O papel dos agregados naturais na durabilidade das argamassas de cal*. In Revista Pedra & Cal, n.º 61, 29-32.

Stefanidou, M.; Papayianni, I. (2005). *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Research, vol. 27 (9-10), pp. 914-919.

Veiga, M.R. (2012). *Conservation of Historic Renders and Plasters: From Laboratory to Site*, in: Válek J., Hughes J., Groot C. (eds.), Historic Mortars, RILEM Book series, vol. 7. Springer, pp. 207-225.

Veiga, M.R. (2017). *Air lime mortars: what else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review*. Construction and Building Materials, vol. 157 (30), pp. 132-140.

Veiga, M.R.; Santos Silva, A.; Tavares, M.; Santos, A.R.; Lampreia, N. (2013). *Characterization of renders and plasters from a 16th Century Portuguese Military Structure: Chronology and durability*. Restoration of Buildings and Monuments, vol. 19 (4), pp. 223-238.

Von Konow, T. (2003). *Aggregate grain size distribution: a major influence on many properties of lime mortars for restoration*. In Euromat 2003 - European Congress on Advanced Materials and Processes. Lausanne.

European Committee for Standardization (CEN), *EN 1015-2:1998 – Methods of test for mortar for masonry Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*.

CEN, *EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry; Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.

CEN, *EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry; Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*.

CEN, *EN 15801:2009 - Conservation of cultural property Test methods Determination of water absorption by capillarity*.

CEN, *EN 16322:2013 - Conservation of Cultural Heritage Test methods Determination of drying properties*.

Instituto Português da Qualidade (IPQ), *NP EN 459-1:2015 - Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*.

IPQ, *NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*.

IPQ, *NP EN 196-1:2017 - Métodos de ensaio de cimentos Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*.

Incidencia de los valores de consistencia de los morteros de cal de elaboración artesanal en su comportamiento en estado endurecido

Esther Ontiveros Ortega⁽¹⁾, Reyes Rodríguez García⁽²⁾, Ana González Serrano⁽³⁾

(1) Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Sevilla. España. esther.ontiveros@juntadeandalucia.es

(2) Departamento Construcciones Arquitectónicas I. ETSA. Sevilla. España. rgarcia@us.es

(3) Departamento Construcciones Arquitectónicas I. ETSA. Sevilla. España. gserrano@us.es

Resumen

La restauración de Bienes Culturales esta demandado actualmente productos adecuados para su conservación. Los morteros de cal resultan ser uno de los materiales mas adecuados, en base a su uso tradicional y su funcionalidad actual en restauración. Por otra parte la recuperación de las actividades de construcción tradicionales es uno de los aspectos de mayor interés para el diseño de estos productos, junto con su control de calidad. Las investigaciones de estos materiales han sido abundantes en las últimas décadas, aunque es necesario orientar los avances hacia aspectos que permitan correlacionar comportamientos macroscópicos, mucho de ellos recogidos en la normativa actualmente en vigor, con los procesos que tienen lugar a escala microscópica. Este trabajo se ha centrado fundamentalmente en la incidencia de los valores de consistencia de los morteros de cal tradicional en el comportamiento final del mortero y la importancia de su comportamiento como fluido. La plasticidad de los morteros de cal está relacionada con los valores de consistencia que adquiere el mortero en estado fresco y son muchos los factores que inciden según la bibliografía científica; se señala la importancia de las propiedades de la cal, que viene dada por la agregación o dispersión de las nanopartículas de portlandita en la suspensión acuosa y por otra parte por la granulometría de los agregados y composición entre otros. En este trabajo se pone de manifiesto la importancia de las dosificaciones, incidiendo especialmente en el contenido en agua de amasado.

Palabras clave: Cal; Mortero; Consistencia; Normas; Conservación; Patrimonio; Porosidad; Porosimetría de mercurio.

Introducción

La plasticidad de las pastas en estado fresco define la manejabilidad o trabajabilidad de los morteros en general, que viene dada por la consistencia de las mezclas. Los valores de consistencia se determinan mediante La mesa de sacudidas, según norma UNE-EN 1015-3:2000/A1, que establece tres tipos de consistencia: consistencia seca para valores mayores de 140 mm, consistencia plástica para valores entre 140 y 200 mm y finalmente blanda o fluida para valores mayores de 200mm (Olmo-Rodríguez, 1994). Para morteros de cal se aconseja valores entre 125-130 mm (Lawrence et al., 2006), 140 mm (Paiva et al., 2006), de 134 a 155 mm (Maravelaki et al., 2005), 140-200 mm (Jornet et al., 2010). Para morteros históricos algunos autores recomienda una consistencia de 170 mm (Lanas et al., 2004).

La plasticidad de la cal es una propiedad muy valorada y ha sido ampliamente estudiada (Rodríguez Navarro et al., 1998, Mascolo et al. 2010, Ruiz Agudo & Rodríguez Navarro 2010). Estos valores dependen del tipo de cal utilizada (Lawrence & Walter, 2008), que viene definida por las propiedades físicas de los cristales de portlandita, como tamaño de las partículas, (Rodríguez Navarro et al., 2005, Hansen et al., 2008, Klein et al., 2010) o carga eléctrica (potencial Z) (Arizzi et al., 2012, Ontiveros et al., 2017) y la energía superficial que adquieren las partículas de cal en suspensión tras su apagado (Ontiveros et al., 2017). Se destacan otros aspectos de interés como el contenido en agua (Ashurst & Ashurst, 1989), relación cal/agua y tipo de agregados (composición y granulometría).

El contenido en agua de los morteros controla la porosidad total y distribución del tamaño de poro (Cazalla, 2000, Lanás & Álvarez, 2003). Se ha establecido una relación entre la densidad del mortero fresco y la capacidad de retención de agua de las pastas frescas, para menores densidades mayor retención de agua (Izaguirre, Lanás et al., 2009). Estos aspectos son de interés ya que tienen un papel esencial en su comportamiento en obra, al ser responsables de sus resistencias mecánicas, comportamiento hídrico y carbonatación o endurecimiento de los morteros de cal (Martys & Ferraris, 1997, Fernandes et al., 2005; Izaguirre, et al., 2009).

La densidad de los morteros en estado fresco es otro parámetro de interés; un mayor empaquetamiento de los agregados define unos valores mayores de consistencia, donde la granulometría de los agregados juega un papel importante. En una granulometría no continua el agua se introduce en los huecos y reducen la fluidez de la pasta y por otra parte si los agregados son más redondeados (mayor área superficial) la fluidez aumenta porque reduce el rozamiento (Arizzi, 2012). Se ha constatado que el conglomerante es el principal factor responsable de la porosidad del mortero, sin incluir los agregados más porosos (Lanás & Álvarez, 2003, Lanás et al., 2004).

Todos estos aspectos inciden en la porosidad abierta y distribución del tamaño de poro que presenta el mortero (Arandigoyen & Álvarez, 2007) y tienen un efecto importante en el proceso de carbonatación o endurecimiento (Van Balen & Germert, 1994). En base a las investigaciones realizadas hasta el momento, se constata que la consistencia que presentan las pastas frescas es una propiedad macroscópica de interés; ya que nos puede dar información sobre el comportamiento que posteriormente tendrá del mortero, además de ser un aspecto fácilmente controlable en obra.

Con esta finalidad se ha llevado a cabo un estudio comparativo entre dos tipos de morteros pre-dosificados de cal aérea de elaboración artesanal, en pasta (mSPL) para su aplicación en revocos (B) y enlucidos (F). Se han determinado el contenido en agua, densidad y consistencia de las pastas fresca y posteriormente se han controlado sus propiedades físicas sobre probetas normalizadas para ensayos en estado endurecido, durante un periodo de curado de 180 días: densidad, porosidad abierta y distribución del tamaño de poro. Ha sido objetivo de este trabajo poner de manifiesto como inciden los valores de consistencia de las pastas frescas en el comportamiento de los morteros endurecidos.

Material y métodos

Materias primas utilizadas para la elaboración de los morteros

Se han analizado dos tipos de morteros, comercializados como productos pre-dosificados, elaborados con cal aérea en pasta CL-90S PL, (denominados mSPL). En función de su aplicación en obra, el fabricante ha diferenciado mortero Base, para su aplicación como revoco (B), y mortero fino, para su aplicación como enlucido (F). Las denominaciones de los morteros estudiados según el tipo de cal son: mSPLB y mSPLF.

La cal utilizada en la elaboración de estos morteros es de producción artesanal. Se trata de cales procedentes de la Comarca Morón de la Frontera, Seville (Spain) que comercializan estos productos en la actualidad con la denominación Gordillo's Cal de Morón, Sevilla, (España) (ver Figura 1). Su entorno, rico en recursos naturales, cuenta con las materias primas adecuadas para generar productos de calidad.



Figura. 1. Horno de producción artesanal, Morón de la Frontera, Sevilla.

Los datos de composición mineralógica de los morteros analizados (obtenida por difracción de rayos X, difractómetro D8I-90, Bruker) indican que en el mortero para revoco (mSPLB) los agregados son mayoritariamente de calcita y cuarzo y en el mortero para enlucido (mSPLF) mayoritariamente dolomíticos. Es de señalar el aporte de cal en el mSPLF en torno al 9%, y de 14% para mSPLB (14%). Las dosificaciones en peso: cal/agregados están en torno al 1:3 para mSPLF y una dosificación 1:2.5 para el mSPLB.

La distribución granulométrica de los agregados se muestra en la Figura 2, el tamaño máximo de grano en el mSPLF está en un rango $< 1\text{mm}$ y para los SPLB $< 2\text{mm}$. Se señala el mSPLB con mayor porcentaje de partículas de tamaño comprendido entre 1-2 mm (30 %), lo que indica una granulometría menos continua.

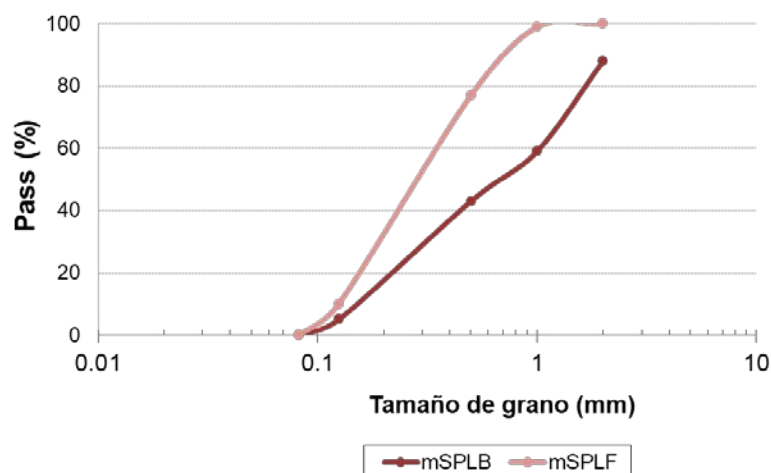


Figura 2. Granulometrías de los agregados utilizados en la elaboración de los morteros.

Procedimiento de elaboración de las probetas de ensayo

Los morteros utilizados en la fase experimental se preparan según las recomendaciones indicadas por el fabricante, el dato de cantidad de agua dosificada se muestra en la Tabla 1. Las probetas prismáticas ensayadas se elaboraron según las normas UNE-EN 1015-2/A1 y UNE-EN 1015-11/A1.

Los morteros se homogenizan con una batidora manual y a las pastas obtenidas se les determinó la consistencia de la masa fresca según la norma UNE-EN 1015-3/A1 y la densidad aparente de la mezcla según la norma UNE-EN 1015-6/A1. Los datos obtenidos se muestran también en la Tabla 1. Las probetas permanecieron en los moldes 5 días a 20°C y una HR de 95% y 2 días fuera del molde. Posteriormente se dejaron curar en el laboratorio a 20°C y una HR de 65%.

Los valores medios de consistencia se encuentran en el rango de valores establecido por la UNE-EN 1015-2/A1 y UNE-EN 1015-6:1999/A1 (175 mm ± 10mm. En base a los resultados, la consistencia de los morteros sería plástica (entre 140 a 200 mm) de acuerdo con el porcentaje de agua preestablecido por el fabricante. Es de señalar los mSPL con una consistencia más fluida.

Tabla 1. Propiedades de las pastas frescas

Morteros	Contenido agua (%)	Consistencia (mm)	Densidad (g/cm ³)
mSPLB	17,5	172,8	3,02
mSPLF	17,0	166,0	3,02

Ensayos y técnicas de control.

Para la planificación de la fase experimental se ha seleccionado una serie de ensayos de control, de tipo físico, como densidad aparente y porosidad abierta. El control se ha llevado a cabo sobre un total de 36 probetas por tipo y a distintos tiempos de curado: 28, 90 y 180 días. Igualmente

se ha determinado los valores de porosidad al mercurio, distribución del tamaño de poro y área superficial específica por porometría de mercurio a los 90 y 180 días.

Resultados

Densidad aparente y porosidad abierta

Los datos de densidad aparente y porosidad al agua a distintos tiempos de control se muestran en la Tabla 2. Estos datos indican que los morteros elaborados con granulometrías más finas son más densos. Sin embargo la evolución de la densidad con el tiempo no sigue la misma tendencia, en los mSPLF la densidad disminuye progresivamente a partir de los 28 días a diferencia mSPLB que experimenta una reducción significativa de densidad a partir de los 180 días.

Los datos de porosidad abierta van del 21,4 al 22,5%. Los morteros con más porosidad inicial son los de revoco mB, con granulometrías más gruesas y contenido en agregados silíceos (Arandigoyen et al., 2005). La porosidad se reduce con el tiempo de curado, siguiendo la misma tendencia que la densidad aparente.

Los valores del volumen medio de intrusión de mercurio a baja presión indican que a los 90 días el mSPLB es el más macroporoso, pero a los 180 días su porosidad se reduce de forma significativa. Tendencia opuesta sigue el mSPLF, que incrementan su macroporosidad de forma importante a los 180 días. Estos datos de macroporosidad explica los valores medios de área superficial específica obtenidos, menores valores para el mSPLF a los 180 días, reflejando, además de una mayor proporción de macroporos, un mayor tamaño de poro (ver Figura 3).

Tabla 2. Datos de densidad aparente y porosidad abierta en los distintos morteros.

Morteros	Tiempo (días)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad abierta (%)
mSPLB	28	1,77	22,5
	90	1,78	21,9
	180	1,73	21,4
mSPLF	28	1,84	21,8
	90	1,72	21,4
	180	1,73	21,4

Propiedades superficiales y distribución de tamaño de poro

Los datos de volumen de intrusión de Hg (que se puede correlacionar con al volumen de poros abiertos), área superficial específica y tamaño medio de poro de los distintos morteros a los 90 y 180 días se indican en la Tabla 3 y 4 respectivamente.

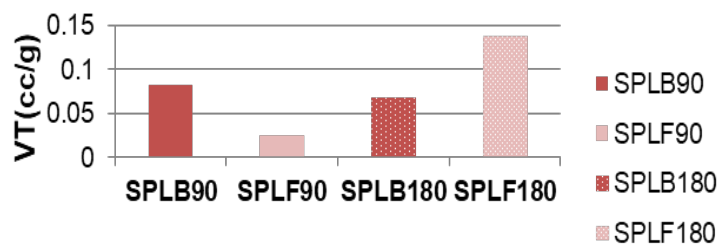
El espectro de porosidad medido está en el rango 6,5 a 0,005 μ m (dentro del dominio mayoritariamente macroporos y en menor proporción mesoporos según IUPAC y/o microporos según clasificación Choquete and Pray, 1970). En este trabajo se va a considerar poros

macroporos los de tamaño superior a 0,5µm y microporos por debajo de este tamaño, en base al rango de poros establecido por esta técnica (a alta y alta presión).

Tabla 3. Propiedades físicas a los 90 y 180 días, obtenidas por porosimetría de Hg. V_T: Volumen medio de intrusión de Hg. AS_T: Área superficial media.

Morteros	Rango poro (µm)	V _T (cm ³ /g)	DMP1 (µm)	AS _T (m ² /g)	DMP2 (µm)
SPLB90	6,5-0,5	0,0818	28	0,017	10,3
	0,5-0,0053	0,087	0,71	1,87	0,058
SPLF90	5,1- 0,5	0,024	87	0,0052	5,9
	4,21-0,0049	0,15	0,68	5,83	0,03
SPLB180	6,9-0,5	0,069	21,0	0,0161	10,1
	0,5-0,0053	0,088	0,93	4,16	0,00659
SPLF180	5,13-4,26	0,139	87,0	0,0086	5,9
	4,21-0,0049	0,14	1,19	7,15	0,00532

VT de macroporos



AS de macroporos

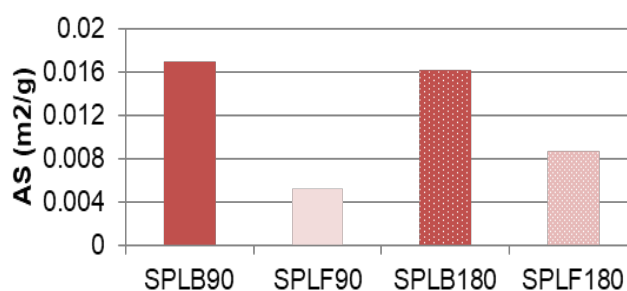


Figura. 3. Datos de volumen medio de intrusión de mercurio y área superficial específica media de los morteros a baja presión (90 y 180 días). VT: Volumen total de mercurio instruido. AS: Área Superficial específica.

En el rango de microporos, el mSPLF es el que presenta los valores más altos a los 90 días, con una sensible reducción de esta microporosidad a los 180 días. Por el contrario el mSPLB presenta valores más bajos que no se modifican de los 90 a 180 días. Estos datos también son coincidentes

con los valores de área superficial específica, mayor proporción de microporos para el mSPLF y una reducción sensible en el tamaño de poro con el tiempo (ver Figura 4).

Esto indica que la carbonatación de los morteros de cal en pasta se caracteriza por un incremento significativo en el contenido en macroporos y tamaño de poro (tamaño medio de poros de $87\mu\text{m}$) y una reducción sensible de la microporosidad y manteniendo el tamaño dominante de poro; características microtexturales observadas a los 90 días, como se puede ver en el mSPLF. Su estudio comparativo con el mSPLB indica que no sigue la misma evolución microtextural, el tamaño de poro se reduce con el tiempo (de $28\mu\text{m}$ a los 90 días a $21\mu\text{m}$ a los 180 días).

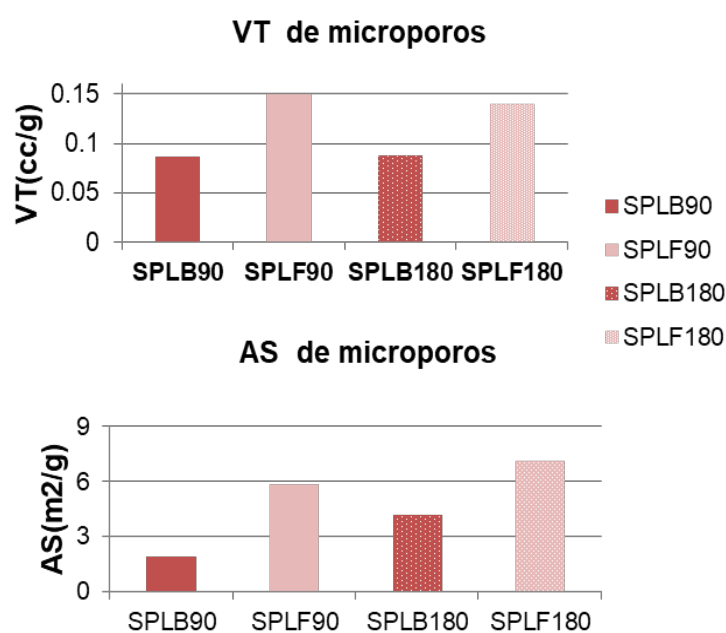


Figura. 4. Datos de volumen de mercurio instruido a alta presión y área superficial específica de los morteros a los 90 y 180 días. VT: Volumen total de mercurio instruido. AS: Área Superficial específica.

El espectro de porosidad del mSPLB y mSPLF se indica en la Figura 5 y 6 respectivamente. En base a los datos podemos decir que los morteros de cal en pasta siguen una tendencia bimodal, que viene definida por dos rangos de poro dominantes: un primer rango entre $0,1$ y $5\mu\text{m}$ y un segundo rango con poro de tamaño superior a $5\mu\text{m}$.

En el mSPLB este último rango viene definido por poros de tamaño comprendido entre 5 y $50\mu\text{m}$. La evolución que experimenta durante el tiempo de curado de los 90 a 180 días es mínima, con un incremento en el tamaño de poro de 1 a $5\mu\text{m}$ y reducción en poros de tamaño mayor a $50\mu\text{m}$.

Se observa como la distribución del tamaño de los poros conserva la misma tendencia, con un escaso incremento de la porosidad a los 180 días. La tendencia es a un incremento en el rango de tamaños $0,5\mu\text{m}$ y una reducción en rango $<0,1\mu\text{m}$.

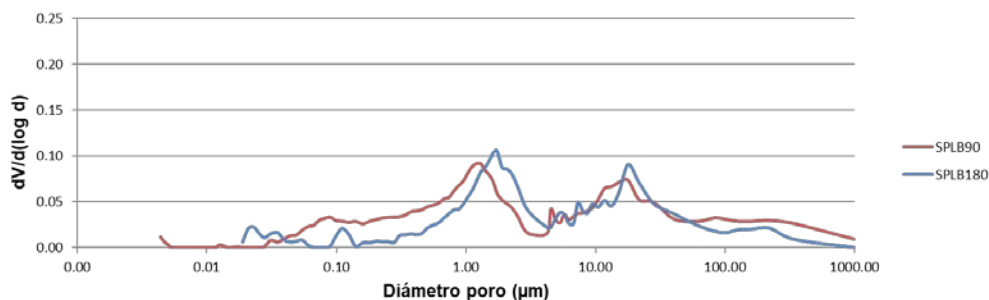


Figura 5. Distribución del tamaño de poro del mSPLB a 90 y 180 días de curado

La distribución del tamaño de poro del mSPLF se caracteriza por presentar un tamaño de poro predominante en torno a 5µm que aumenta a 7µm a los 180 días. Se destaca el rango de poros 0,1 a 3µm que no se modifica con el tiempo y un incremento de poros >100µm. Se destaca la presencia de poros de tamaño 0,005µm a los 90 días y su desaparición a los 180 días, que se puede relacionar como porosidad intergranular entre partículas finas. Estos poros desaparecen a los 180 días debido al efecto de la interacción con el conglomerante primero, relleno y posterior cierre de poros por efecto de la carbonatación.

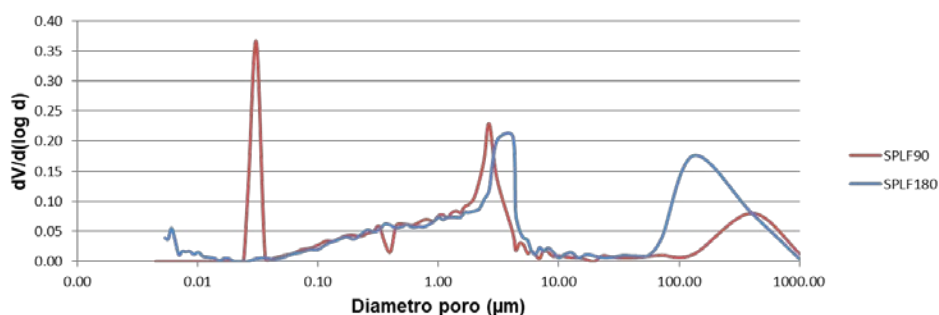


Figura 6. Distribución del tamaño de poro del SPLF a 90 y 180 días de curado

Discusión

El mortero mSPLB se caracteriza por una mayor dosificación en cal, una granulometría mas gruesa, distribución granulométrica mas discontinua y una consistencia en torno a 173mm. El resultado es una microtextura con una distribución de tamaño de tipo bimodal (propia de los morteros de cal en pasta) pero que no evoluciona de los 90 a 180 días hacia una mayor porosidad y mayor tamaño de poro como ocurre con el mSPLF.

El mortero mSPLF corresponde a un morteros de granulometría finas y continua, con unas dosificaciones que se adaptan a la relación 1:3 y valores de consistencia de 166mm. El resultado es un mortero con una distribución de tamaño de poro bimodal y que evoluciona microtexturalmente en el tiempo, hacia hacia poros de mayor tamaño con un rango predominante de 0,05 a 3µm, que no se modifica durante el proceso de carbonatación, e incremento de poros de mayor tamaño en el rango 0,5 µm y de 100 a 1000µm. Esta microtextura porosa permite que en período de curado de 180 días el proceso de carbonatación sea progresivo y relativamente rápido.

Conclusiones

Este trabajo pone de manifiesto la calidad de los morteros de cal en pasta pero también la importancia del tipo de dosificación y su incidencia en la puesta en obra. El diseño de morteros de cal en pasta debe hacerse de forma controlada, dada su sensibilidad a modificaciones relacionadas con la dosificación en cal, agua y granulometría de los agregados. Estas dosificaciones inadecuadas se manifiestan por variaciones en la consistencia de las pasta preparadas para su aplicación, de utilidad para un control de calidad en obra. De igual manera se constata que valores de consistencia superiores a 170mm en morteros de cal en pasta pueden generar morteros que no carbonatan de forma adecuada por efecto del bloqueo de su sistema poroso.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Grupo de investigación RNM349 de la Junta de Andalucía, proyecto: Normalización del uso de la cal para su aplicación en conservación de Bienes Culturales, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Junta de Andalucía. Agradecemos el apoyo a Gordillo's Cal de Morón SA y al Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Universidad de Sevilla.

Bibliografía

Arhurst & Arhurst (1989). *Mortars, platers and redens*, Southampto, Gower Technical Press edition de English Heritage Technical Handbook. Practical Building Conservation, vol.3.

Arandigoyen M, Perez Bernal JL, Bello López MA, Alvarez JI (2005). *Lime-pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity*. Appl Surf Sci 252:1449–1459].

M. Arandigoyen, J.I. Alvarez (2007). *Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars*. Cem. Concr. Res. 37 (5), 767-775.

Arizzi A (2012). *Design of ready-to-use rendering mortars for use in restoration work*. ISBN: 978-84-15536-42-0, Ed. Copicentro Granada S.L., Granada, Spain.

Arizzi, A., Hendrickx, R., Cultrone, G. and Van Balen, K. (2012). *Differences in the rheological properties of calcitic and dolomitic lime slurries: influence of particle characteristics and practical implications in lime-based mortar manufacturing*. Materiales de Construcción, 62(306) 231-250.

Cazalla O (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el Patrimonio Histórico*. PhD Tesis, Universidad de Granada, Spain.

Choquete, F. & Pray, LL. (1970). *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, vol. 54, nº2, 207-250.

Fernandes, V.; Silva, V.M. Ferreira, J.A. (2005). *Labrincha, Influence of the kneading water content in the behaviour of single-coat mortars*, Cem. Concr. Res., 35, 1900-1908.

Hansen, E; Rodríguez-Navarro, C; and Van Balen, K. (2008). *Lime putties and mortars: insights into fundamental properties*. Studies in Conservation 53, no. 1 (2008), 9-23.

- Izaguirre, A.; Lanas, J y Álvarez" JI. (2009). *Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars*. *Cement and Concrete, Research, Volume 39, Issue 11, November 2009*, 1095-1104.
- Jornet, A.; Mosca, C.; Cacalle, G.; Correfog, G. (2010). *Comparasion betwwn traditional lime based and industrial, dry mortars*. 2 nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republi, 631-641.
- Klein, D.; Hogewoning, S; Schimdt, S.O.; Middendorf, B. (2010). *The influence of calcium hidroxide on the plasticity of lime putties*. En Válek, J.,; Groot, C; Hughes, J.J eds, 211-218.
- Lana, J & Alvarez, J.I. (2003). *Masonry repair lime based mortars: factors affecting the mechanical behavior*. *Cem. Concr. Res.*33, 1867-1876
- Lanas, J, Perez Bernal, J.L, Bello López, M, A. and Álvarez Galindo, J,I (2004):*Mechanical Properties of Natural Hydraulic Lime-Based Mortars*. *Cement & concrete composites*. 2004. Vol. 34. Núm. 12, 2191-2201.
- Lawrence, R.M.H.; Walker, P. (2008). *The impact of the water/lime ratio on the structural characteriscs of lime mortars*, en D'AYALA, D. Fodde, E. eds, 885-889.
- Lawrence, R.M.H.;M Mays, T.J.; Walker, P.; Walker, P. (2006). *Determination of carbonation profiles in non-hidraulic lime mortars using thermigravimetric analysis*. *Termochimica Acta*, nº 444, 179-198.
- Martys, N.S. & Ferraris, C.F. (1997). *Capillary transport in mortars and concrete*, *Cem. Concr. Res.*, 27 (5) 747-760.
- Mascolo, G. Mascolo, M.C. Vitale, A. (2010). *Microstructure evolution of lime putty upon aging*. *Journal of Crytal Growth*, vol. 312, n 116-17, 2363-2368.
- Maravelaki-Kalaitzaki P, Bakolas A, Karatasios I, Kilikoglou V. *Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete*. *Cem. Concr. Res.* 2005; 35(8):1577-1586.
- Olmo Rodriguez, C (1994). *Los morteros. control de calidad*. *Informes de la construcción*, Vol. 46, nº 433, 57-73.
- Ontiveros Ortega E., Ontiveros Ortega A., Moleón Baca J. A., Ruiz Agudo E.M. *Electrokinetic and thermodynamic characterization of lime-water interface: physical and rheological properties of lime mortar*. *Construction and Building Materials*. 151, (2017), 809-818.
- Paiva, H; Ferreira, V.B; Labrincha, J.A. (2006). *Effects of a water retaining agent on the rheological behavior of a single-coat render mortat.*, *Cement and Concrete Research*, nº 36, 1257-1262.
- Rodriguez-Navarro, C; Ruiz-Agudo, E; Ortega-Huertas, M and Hansen, E (2005). *Nanostructure and Irreversible Colloidal Behavior of Ca(OH)₂: Implications in Cultural Heritage Conservation*. *Langmuir* 2005, 21, 10948-10957.
- Ruiz Agudo, E. Rodríguez Navarro, C. (2010) *Microstructure and rheology of lime putty*. *Langmuir* Vol. 26, pg. 3868-3877.
- UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005 *Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*.
- UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007 *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo*.

UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. . Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

UNE-EN 1015-10:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.

UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005 Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

Van Balen, K., D. Van Gemert, D. *Modelling lime mortar carbonation*, Mater. Struct., 27 (1994) 393-398.

Análise experimental do fluxo de humidade em argamassas de cal aérea

Mateus A. Oliveira⁽¹⁾, Érika T. Guimarães⁽²⁾, Miguel Azenha⁽³⁾, Paulo B. Lourenço⁽⁴⁾, Bernardo N. M.

Neto⁽⁵⁾, Rafael A. Maia⁽⁶⁾

(1) *Universidade Federal do Pará, Brasil, mateusengcivil@gmail.com*

(2) *Universidade do Minho, erikaguimaraes@poli.ufrj.br*

(3) *Universidade do Minho, miguel.azinha@civil.uminho.pt*

(4) *Universidade do Minho, pbl@civil.uminho.pt*

(5) *Universidade Federal do Pará, Brasil, bnmn@hotmail.com*

(6) *Universidade Federal do Pará, Brasil, rafaelalves_maia@hotmail.com*

Resumo

Uma parte significativa do património histórico na Península Ibérica é constituída de alvenaria estrutural, com juntas preenchidas com argamassa. Nesses sistemas estruturais, a argamassa usualmente representa uma parcela pequena/moderada do volume total da estrutura. No entanto, a argamassa é reconhecida como a principal fonte de deformações/movimentos na estrutura, o que justifica a necessidade de conhecimento aprofundado do seu comportamento. Nas argamassas antigas, a cal aérea é um dos ligantes mais antigos e recorrentes. Nessas argamassas, o endurecimento do material é gradual a partir da superfície, em correspondência com os processos de carbonação e secagem. Para essas argamassas, os processos citados condicionam diversas propriedades do material. Para argamassas de cal aérea, o estudo da carbonatação é difundido na literatura. Porém para o fluxo de humidade, o número de estudo ainda é bastante reduzido. Durante a fabricação da argamassa, parte da água utilizada é evaporada pela reação exotérmica de hidratação. Todavia, permanece no material um alto teor de humidade. No presente trabalho, são descritos estudos realizados para compreensão dos fluxos internos de humidade em argamassas de cal aérea. Inicia-se com a caracterização dos materiais, bem como a definição da composição. Efetuou-se trabalho experimental sobre provetes armazenados em ambiente controlado, com geometrias que simulam fluxos uniaxiais e axissimétricos. Foi efetuada a monitorização da humidade interna dos provetes a várias profundidades. Os resultados indicam uma difusão acelerada, com decréscimo rápido da humidade quando comparados com valores usuais observados em materiais à base de cimento.

Palavras-chave: Cal Aérea; Alvenaria; Argamassa; Construções Históricas; Análise Experimental; Processo de Secagem; Humidade.

Introdução

Diferentes estruturas históricas em alvenaria têm importantes aspectos culturais, sociais, arqueológicos, estéticos, económicos, políticos, arquitetónicos e técnicos que devem ser considerados (Warren, 2000, Oliveira, 2015). Nesse sentido, a preservação de construções históricas é de grande importância para a sociedade e para as gerações futuras (Warren, 2000, Oliveira, 2015).

Uma análise estrutural detalhada de estruturas antigas em alvenaria exige cuidado especial ao se considerar as propriedades da argamassa (Oliveira, 2015, Lourenço, 1996). De facto, apesar da argamassa corresponder a uma pequena ou moderada parcela do volume da alvenaria, (Binda *et al.*, 2000), a mesma é reconhecido como o principal componente, responsável por deformações estruturais (Oliveira, 2015). Argamassas à base de cal aérea foram utilizadas em diversas partes do mundo, inclusivamente na península ibérica (Oliveira, 2015). Para essas argamassas o processo de carbonatação é de fundamental importância para o ganho de resistência (Oliveira, 2002, Oliveira, 2015, Oliveira *et al.*, 2016, Oliveira *et al.*, 2017). Vários parâmetros ambientais influenciam o processo de carbonatação, como temperatura, humidade relativa e concentração de dióxido de carbono (Saetta and Vitaliani, 2005, Montes-Hernandez *et al.*, 2010).

Outro fator essencial no estudo desse tipo de material é a secagem. Com relação a esse processo, vários autores já mediram a difusão da humidade em materiais à base de cimento (Kim and Lee, 1999, Oliveira *et al.*, 2015a); Para argamassas históricas, poucos resultados podem ser encontrados em outras literaturas (Diaz Gonçalves and Brito, 2012, Guimarães *et al.*, 2016, Azevedo *et al.*, 2014, Oliveira *et al.*, 2017).

A humidade afeta diferentes propriedades da argamassa, como comportamento mecânico (Oliveira, 2015, Lawrence, 2006a), carbonatação e outros fenómenos (Lanas *et al.*, 2005, Arizzi and Cultrone, 2013). Portanto, se faz essencial a análise da secagem e para a compreensão dos fluxos internos de humidade em argamassas de cal aérea. No estudo da humidade torna-se essencial o conhecimento do perfil de humidade (Oliveira *et al.*, 2015b), bem como a redução pela auto-dissecação do material, fenómeno associado a redução da humidade pelo consumo próprio do material (Oliveira *et al.*, 2017, Oliveira *et al.*, 2015b, Oliveira, 2015).

A estratégia adotada neste trabalho pretende investigar a difusão de humidade na argamassa de cal aérea nas idades iniciais, durante o processo de endurecimento. O programa experimental começou com a caracterização dos materiais, bem como a definição da composição, seguida de uma avaliação experimental pioneira da distribuição de humidade interna com mangas embutidas no material.

Com o objetivo de se estudar experimentalmente o fluxo 1D, um espécime prismático foi utilizado, sendo que o mesmo possuía todas as faces seladas com exceção de uma. O mesmo molde plástico foi também adotado para o estudo da auto-dissecação, nesse caso todas as faces estavam seladas.

Em continuidade, no estudo do perfil de humidade cilindros com mangas para medição posicionadas vertical e horizontalmente foram também estudados, juntamente com provetes completamente selados.

Componentes, composição, preparação e armazenamento

Componentes

A cal viva micronizada foi adotada como aglutinante no presente trabalho. A cal foi classificada como CL90 Q (Oliveira, 2002, Oliveira, 2015, Oliveira *et al.*, 2016, Oliveira *et al.*, 2017). Para caracterizar o material e também atestar essa condição, o material foi analisado por espectroscopia de fluorescência de raios-X (XRF). Os resultados da XRF revelaram a presença de 97,2% de CaO, seguido por SO₃ (1,32%) e menor quantidade de MgO (1,05%) e outros elementos menores - para maiores informações, ver Oliveira (2015).

A argamassa adotou uma areia siliciosa como agregados. Para a curva do agregado e mais informações sobre o agregado ver, Oliveira (2015).

Composição da argamassa, processo de mistura e armazenamento

Apresenta-se nessa seção informações sobre a composição e produção da argamassa. A mistura selecionada possui as proporções em termos de volume 1:3:1,3 (cal:areia:água). A definição da mistura envolveu um processo interativo atentando-se para a representatividade, a trabalhabilidade e a presença de fissura, mais detalhes podem ser visto em Oliveira (2015a).

O método de mistura adotado foi o “*hot-lime mix*”, em coerência com vários trabalhos de investigação anteriores e também com a estratégia utilizada em construções históricas. O processo de mistura foi feito de acordo com as recomendações da norma EN 196-1(CEN, 2005), e seguiu a adição dos componentes na seguinte ordem: agregados (mistura de areias grossa e fina), cal e água (Forster, 2004, Margalha *et al.*, 2011).

Os provetes foram armazenados num ambiente controlado desde a moldagem. Para isso uma câmara climática foi utilizada, com humidade relativa e temperatura controladas: 60% e 20°C, respectivamente - para mais informações ver Oliveira (2015a).

Análise do perfil de humidade

Espécimes prismáticos

Nesta secção, são fornecidas informações sobre os espécimes prismáticos para ensaios simulando o fluxo 1D. O molde prismático transparente, esquematicamente mostrado na Figura 6 foi adotado, para que fosse possível visualizar possíveis fissuras na argamassa. O recipiente possui três furos perfurados através da sua superfície inferior posteriormente se introduzirem as mangas de humidade. O molde apresenta as seguintes dimensões: 5,3 cm de altura, 5,0 cm de espessura e 17,8 cm de comprimento (ver Figura 6).

As mangas para medição da humidade foram introduzidas em três profundidades de medição. A posição das mangas visa não perturbar o percurso da humidade entre a superfície e o ponto de medição, uma vez que as mesmas são introduzidas do lado oposto da superfície de evaporação, como pode ser visualizado na secção A-A da Figura 6.

As partes inferiores das mangas em contato com a amostra foram vedadas por uma membrana GORE-TEX® (Gore, 2014), fixada por cola quente (ver Figura 6). Outros autores também citam o uso dessa técnica em medições nos materiais à base de cimento (Tanabe *et al.*, 2008, Grasley *et al.*, 2006, Quincot, 2012). Uma visão do molde prismático adotado e suas dimensões utilizadas é apresentada com mais detalhes na Figura 6.

Em continuidade, uma camada de parafina foi aplicada na margem de contato entre a argamassa e o recipiente de plástico (ver Figura 6). Este procedimento foi adotado para minimizar o efeito da retração da argamassa, o que poderia criar um caminho preferencial para o fluxo da humidade.

Três espécimes prismáticos foram moldados (*HM.A*, *HM.B* e *HM.C*). Um espécime (*HM.A*) foi adotado para simular o fluxo 1D, e os outros dois (*HM.B* e *HM.C*) foram adotados para investigar o comportamento sob condições seladas. Para os moldes selados, o processo de vedação foi feito com plástico de embalagem fechada, cola quente e fita plástica para auxiliar. Os espécimes selados também foram moldados com três mangas para medição de humidade interna. Em relação as condições de cura, o espécime *HM.A* foi exposto desde a modelagem.

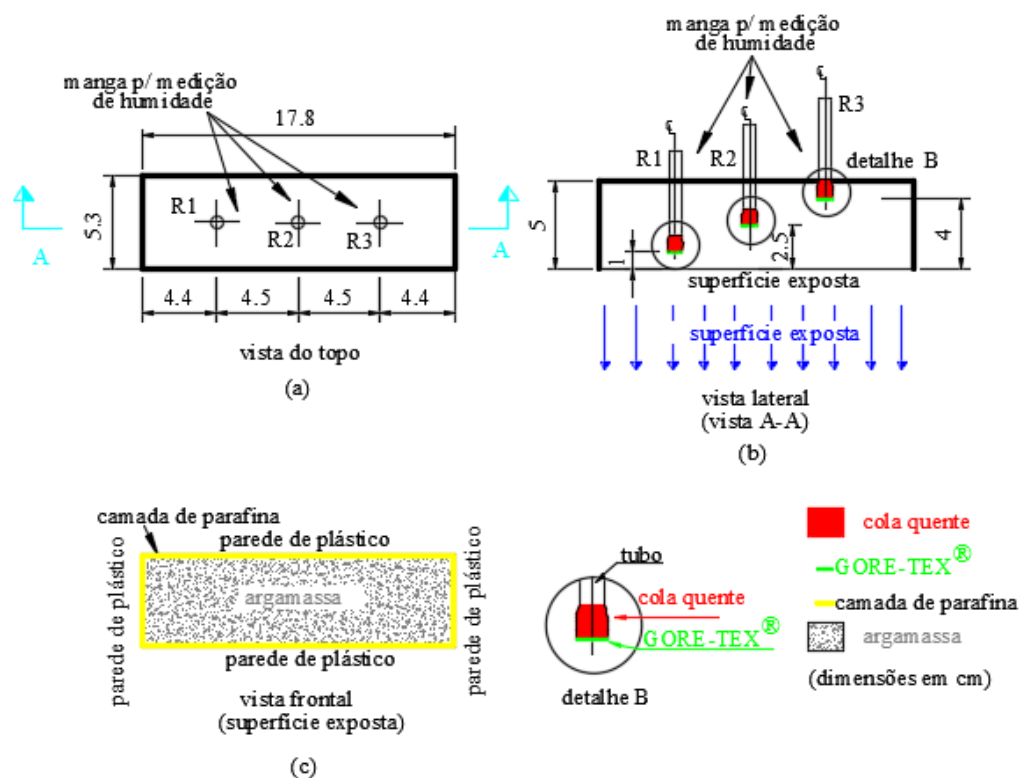


Figura 6 – Molde uniaxial a) Posição das mangas para medição da humidade vista do topo; b) Profundidade das mangas para medição da humidade - vista da lateral; c) Vista frontal da superfície exposta

Para o fluxo 1D, os resultados das amostras *HM.A*, para as três profundidades monitoradas, são apresentados na Figura 7.

Os valores medidos em diferentes profundidades da superfície de evaporação (1 cm, 2,5 cm e 4 cm) mostram uma pequena diferença, especialmente após 30 dias. Os resultados para 2,5 cm e 4 cm foram semelhantes em todos os ensaios. Esses resultados podem ser associados a um valor de coeficiente de difusão elevado para este material, ou até mesmo um erro relacionado ao dispositivo de medição. O sensor de humidade apresenta um erro de $\pm 3\%$ e para valores elevados de humidade relativa ($\sim 95\%$), o erro é de aproximadamente $\pm 5\%$ (Vaisala, 2004, Meneghini, 2014). Os valores de humidade foram semelhantes ao equilíbrio com o ambiente após ~ 50 dias para as três profundidades estudadas.

O primeiro valor de humidade medida a idade inicial (~ 2 dias) foi cerca de 93%, um valor mais alto seria esperado, quando se comparado ao estudo envolvendo betão (Oliveira *et al.*, 2015a). Uma explicação possível para essa observação é a imprecisão do sensor para ambientes de humidade relativa elevada (Vaisala, 2004). Outro motivo para o ocorrido, poderá ser a elevada evaporação de água durante a hidratação da cal na preparação da argamassa (Snow and Torney, 2014, Lawrence, 2006b).

Nos espécimes selados, após o início das medições, para ambos os espécimes (apresentou uma diminuição relativamente pequena de h e o valor estabilizado em torno de $\sim 90\%$). A diferença nos resultados para os dois espécimes foi de $\sim 2\%$, para idades iniciais.

Os valores inicialmente medidos foram em torno de 92-93%, mesmo para os espécimes selados. Em comparação com medições em materiais a base de cimento, seria esperado um valor próximo de 100% (Kang *et al.*, 2012, Kim and Lee, 1999, Kim and Lee, 1998). A evaporação inicial da água devido ao processo de hidratação durante a moldagem e a sensibilidade do sensor podem justificar esses resultados.

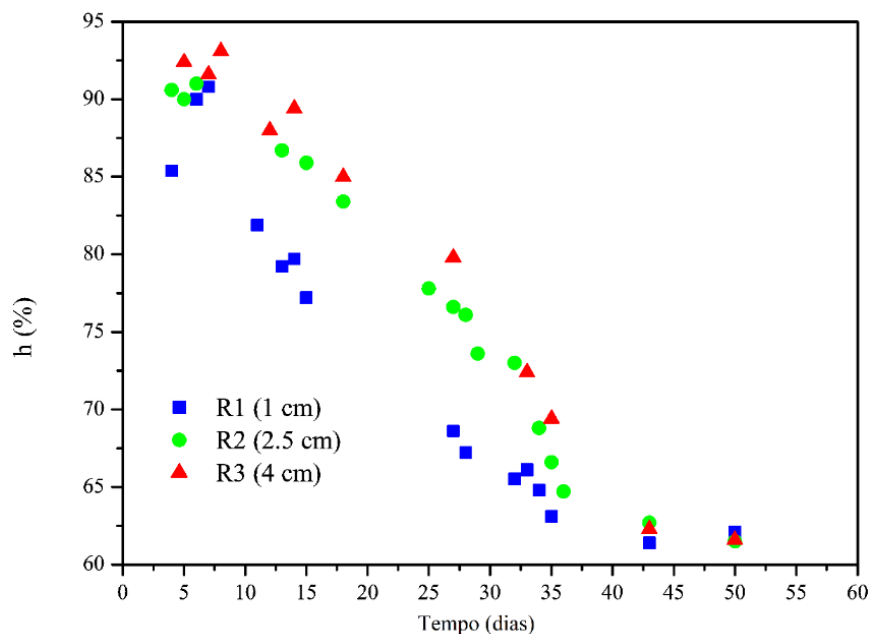


Figura 7 - Umidade ao longo do tempo – Espécime HM.A (tempo expresso desde a moldagem)

Espécimes Cilíndricos

Esta secção apresenta informações sobre os espécimes cilíndricos que foram adotados para estudar o fluxo de umidade, para o qual um resumo é apresentado na Tabela 1. Esta geometria foi intencionalmente adotada para reproduzir condições assimétricas, para que as camadas de parafina fossem aplicadas, nas partes superior e inferior, para reduzir o fluxo de água nessas regiões. Os cilindros apresentam diâmetro de ~6 cm e altura de ~12 cm.

Tabela 1 – Resumo de espécimes cilíndricos para testes de difusão de umidade

Ambiente de exposição	Fases do teste (dias)	Espécimes	Espécimes
câmara padrão câmara padrão (selada)	contínuo	3+1 (3 expostos + 1 selado)	H-H60-A H-H60-B H-H60-C H-H60-S

Em relação ao molde, foi adotado um sistema com tubos de PVC e uma rede de plástico enrolado no interior do tubo de polipropileno (ver a Figura 8). Os espécimes foram então colocados nas câmaras climáticas e mantidos nesta condição por cerca de 5 horas.

Após o período inicial, os espécimes foram parcialmente desmoldados (ver a Figura 8). A rede de plástico foi utilizada para fornecer o suporte para a argamassa de cal aérea na fase inicial, e as camadas de parafina foram aplicadas na parte superior e na parte inferior do cilindro (ver a Figura 8). Desta forma, a rede foi adotada durante as idades iniciais, para permitir o contato

entre a argamassa e o ambiente (ver a Figura 8). A rede de plástico foi removida após um período de 24 horas após a moldagem. Após este período, as superfícies laterais dos cilindros estavam completamente expostas às condições ambientais.

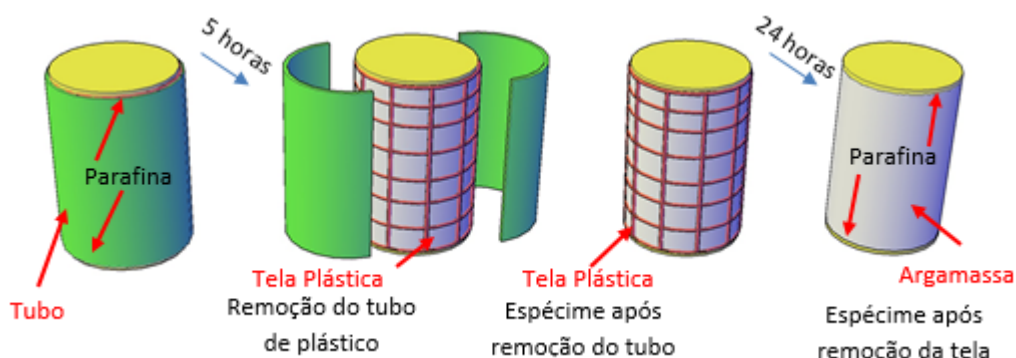


Figura 8 -Moldagem dos espécimes cilíndricos (tubo + rede plástica).

Em relação às mangas utilizadas para estudar o processo de difusão em cilindros, foi adotado o mesmo procedimento para a elaboração apresentada na secção anterior (tubos + GORE-TEX® + cola quente). Em termos de configuração, duas configurações foram testadas, primeiro com as mangas de humidade na posição vertical (ver a Figura 9), e, em seguida, com os tubos inseridos horizontalmente (ver a Figura 10).

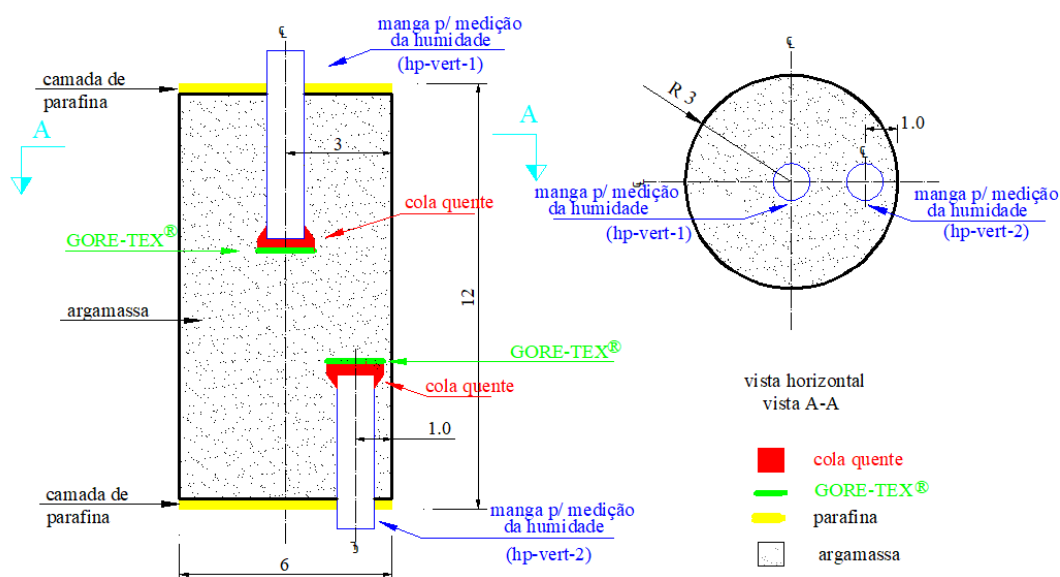


Figura 9 - Espécime cilíndrico – Mangas verticais para medição da humidade (H-H60-A)

Estas duas configurações (Figura 9 e Figura 10) foram testadas com o objetivo de verificar a consistência dos resultados e também verificar a possível influência da posição adotada para as mangas. Em resumo, foram analisados três cilindros: H-H60-A, H-H60-B e H-H60-C (ver a Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo dos espécimes cilíndricos

Nome dos Espécimes	Configuração da Manga	Posições da Manga	Detalhes
H-H60-A	Inserida verticalmente	1,0 e 3,0 cm	Figura 9
H-H60-B	Inserida horizontalmente	1,3 e 3,0 cm	Figura 10
H-H60-C	Inserida horizontalmente	1,3 e 3,0 cm	Figura 10

Considerando a informação dada, para o primeiro espécime, a configuração final para H-H60-A pode ser vista na Figura 9. Duas mangas (*hp-vert-1* e *hp-vert-2*) foram inseridas verticalmente e as partes superiores das amostras foram seladas com uma camada de parafina.

A configuração final para H-H60-B e H-H60-C pode ser vista na Figura 10. Para esses espécimes, duas mangas (*hp-hor-1* e *hp-hor-2*) foram inseridas horizontalmente. Para estes espécimes, as camadas de parafina foram colocadas perto da região externa do cilindro, onde as mangas foram inseridas na argamassa, com o objetivo de reduzir o possível escape de líquido, conforme indicado na Figura 10 e Figura 11.

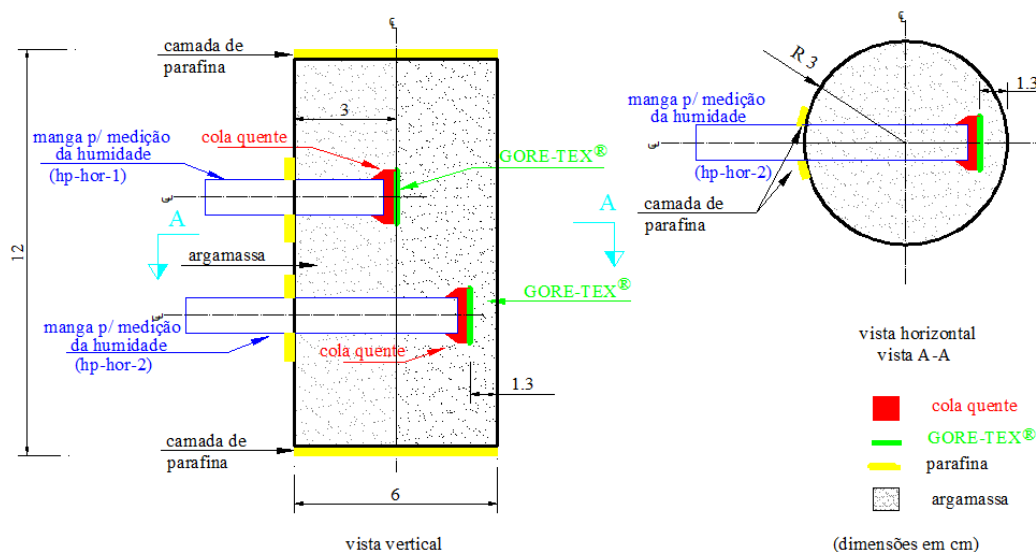


Figura 10 - Espécime cilíndrico – Mangas horizontais para medição da humidade (H-H60-B e H-H60-C)

Os três cilindros estudados (H-H60-A, H-H60-B e H-H60-C) apresentaram resultados semelhantes de humidade ao longo do tempo para a mesma profundidade (*hp-hor-1* e *hp-vert-1*). Um gráfico comparativo com os dados dos três cilindros testados para a manga inserida a 3 cm de profundidade é apresentado na Figura 11.

Analisando os dados, os resultados das três amostras testadas (H-H60-A, H-H60-B e H-H60-C) mostraram coerência razoável. Na mesma idade, a diferença máxima dos valores medidos foi de ~ 5%, em torno do oitavo dia (ver a Figura 11). A dispersão também pode estar relacionada à precisão do sensor. Portanto, os resultados enfatizam a viabilidade da configuração experimental (pelo menos do ponto de vista da repetibilidade). Quanto aos resultados para os

dois espécimes testados com mangas horizontais (*H-H60-B* e *H-H60-C*) para a profundidade de 1,3 cm (manga *hp-hor-2*), os dados são mostrados na Figura 12.

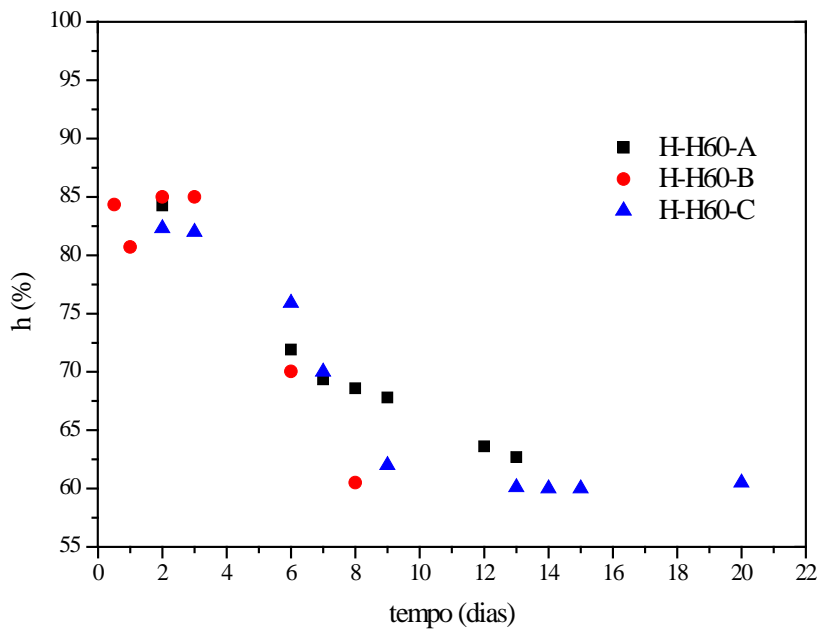


Figura 11 - Resultados comparativos para a humidade em espécimes cilíndricos H-H60-A, H-H60-B e H-H60-C (3 cm de profundidade - *hp-hor-1* e *hp-vert-1*)

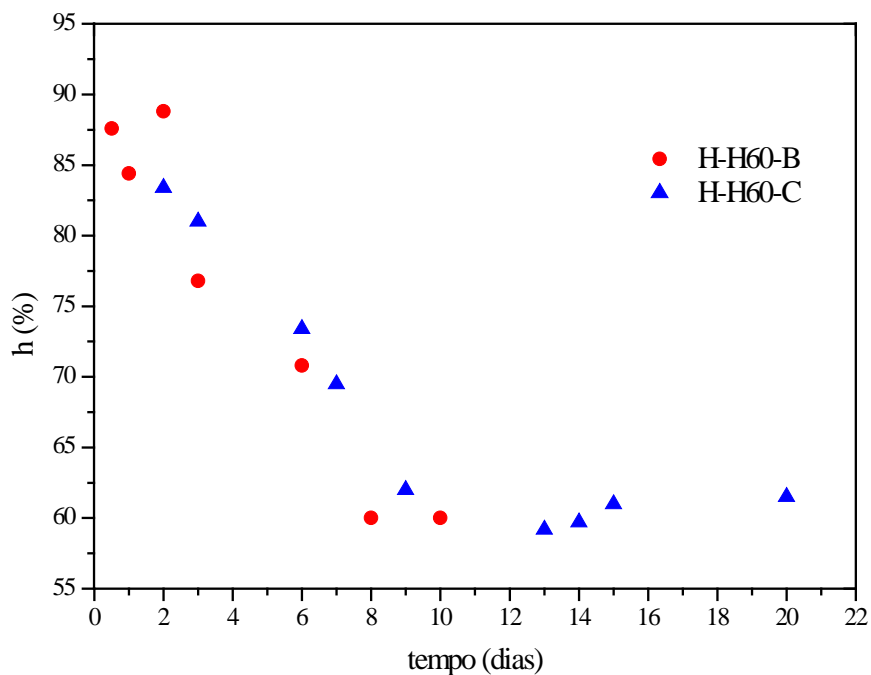


Figura 12 - Resultados comparativos para a humidade em espécimes cilíndricos H-H60-B e H-H60-C (1,3 cm de profundidade, *hp-hor-2*), desde a exposição.

Considerando os resultados da Figura 10, para as horas iniciais de monitoramento, quando apenas uma pequena parte da difusão ocorreu, os valores medidos da amostra *H-H60-B* foram de $\sim 90\%$. Estes valores eram bastante semelhantes aos valores de humidade previamente medidos para a condição 1D com o espécime *HMA* ($\sim 93\%$). Com o objetivo de ilustrar os

resultados obtidos especificamente para o cilindro *H-H60-C*, os valores de humidade nas duas profundidades medidas são apresentados na Figura 13.

No segundo dia, os valores medidos para as duas profundidades investigadas foram $\sim 83\%$; esses valores ilustram a diminuição rápida da humidade. Em um especto comparativo, os valores foram menores do que os medidos para outros dois moldes para a condição 1D (*HM.A*) na mesma idade: $\sim 90\%$. Este resultado pode ser justificado pelo facto de que, para esse molde axissimétrico, o processo de secagem ocorreu mais rápido, devido às características geométricas.

Os dados apresentados na Figura 13 mostraram que, para as duas profundidades diferentes, a humidade apresentou valores similares, o que significa que nenhum gradiente de humidade relevante foi medido durante o ensaio. Este resultado foi em coerência com os dados apresentados na Figura 7, com *HM.A*.

Com o objetivo de estudar a diminuição da humidade relativamente rápida e validar um possível problema com os dados obtidos pelo sensor Vaisala (Vaisala, 2004), foi adotado outro dispositivo capaz de medir a humidade. O *SHT75* (Sensorium, 2015) foi usado para medir os valores para algumas idades intermediárias, durante os ensaios com *H-H60-B* e *H-H60-C*. Os resultados obtidos com o sensor *SHT75* (Sensorium, 2015) foram semelhantes aos dados do equipamento Vaisala (Vaisala, 2004), com discrepâncias de $\sim 2\%$.

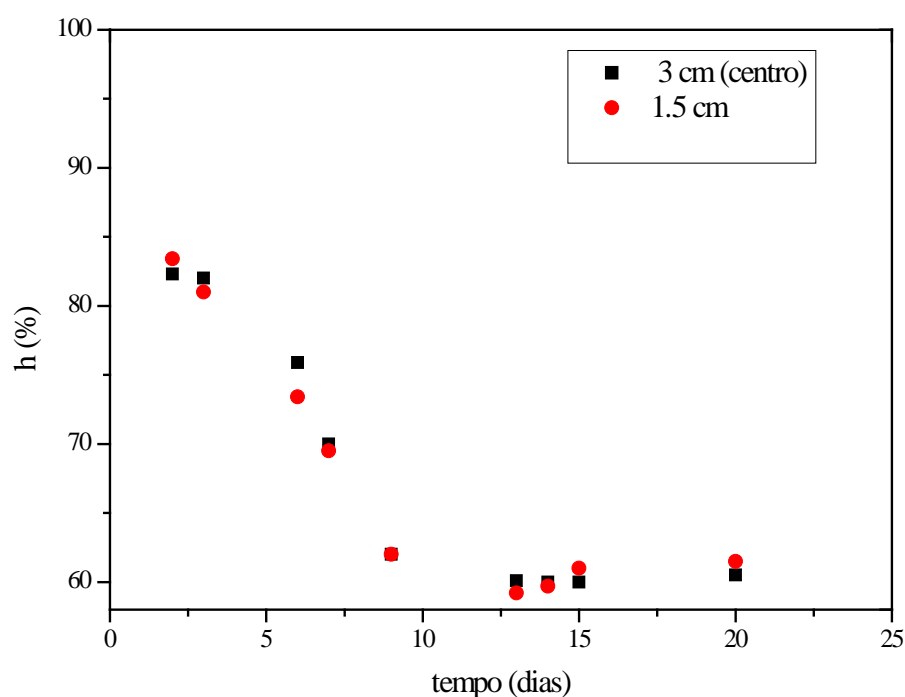


Figura 13 - Humidade em espécimes cilíndricos, provete: H-H60-C, desde a exposição.

Em continuidade com os experimentos, a auto-dissecação foi analisada aqui mais uma vez. O método de vedação foi feito com o uso de tubos de plástico, parafina e sacos de plástico. Conforme adotado anteriormente, dois tubos de plástico foram usados como mangas. Os tubos foram inseridos em duas profundidades diferentes (1,0 e 3 cm) na posição vertical (uma configuração similar das mangas pode ser vista na *Figura 9*). Os resultados apresentados mostraram que os valores para as duas profundidades estudadas foram consistentes, com diferenças inferiores a $\sim 2\%$. Os resultados concordaram com os dados obtidos nos espécimes testados anteriores. Os valores medidos relacionados à humidade no experimento proposto

para investigar a auto-dissecação foram ~90%, e essa percentagem foi quase constante durante a duração total do ensaio, em torno de 22 dias.

Conclusão

O presente artigo aborda um programa experimental com foco no estudo de argamassas de cal aérea, no tocante ao processo de secagem.

A primeira abordagem experimental incidiu sobre provetes de argamassa prismáticos com 5,3 cm de altura, 5,0 cm de espessura e 17,8 cm de comprimento, para os quais foi avaliada a evolução da humidade ao longo do tempo, através das inserção mangas de medições. Foram fabricados três espécimes, sendo dois selados e um exposto a um fluxo uniaxial. Para esse último provete, as medidas realizadas nas três profundidades estudadas evidenciaram que depois de cinquenta dias após a exposição, a amostra estava em equilíbrio com o meio ambiente. Além disso, durante o monitoramento, valores similares de humidade foram obtidos para as três profundidades estudadas, o que foi inesperado, pois, para betão, a humidade é normalmente diferente de acordo com a profundidade analisada. Esses resultados podem estar relacionados com uma elevada difusividade do material. As medições de auto-dissecação indicaram um valor de humidade final estabilizado de ~90%, significando que houve uma redução de ~ 10% em comparação com o estado saturado.

Em consistência, uma segunda abordagem experimental incidiu sobre espécimes cilíndricos de argamassa com diâmetro de 6cm e altura de 12cm. Os três espécimes cilíndricos mostraram um resultado coerente em termos de valores iniciais de humidade quando comparados com os moldes prismáticos testados anteriormente (1D). Porém, ao longo do tempo demonstraram uma queda mais rápida. O decréscimo de humidade devido ao processo de auto-dissecação foi novamente medido, dessa vez para um molde cilíndrico, e os espécimes selados apresentaram novamente humidade de $\approx 90\%$ no final do experimento. Outro facto importante a ser citado, para todos os espécimes estudados: os primeiros valores de humidade medidos em idades de um dia foram ~90-93%, mesmo nos espécimes selados.

Este estudo visar apoiar a modelagem do campo de humidade para o estudo multifísico de argamassas de cal aérea. Ainda há uma grande lacuna a ser preenchida através de experimentos e pesquisas especificamente para argamassa de cal aérea, tendo em vista a pequena quantidade de trabalhos nessa área.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela FCT (Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia) e pelo CNPq através da bolsa de doutoramento do primeiro autor.

Referência Bibliográfica

- Arizzi, A. and Cultrone, G., (2013). "The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46 (4), 507-520.
- Azevedo, J., Guimarães, A. and Diaz Gonçalves, T., (2014). "Uncertainty in absorption and drying of a mortar and a brick contaminated with six different binary salts."
- Binda, L., Saisi, A. and Tiraboschi, C., (2000). "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries." *Construction and Building Materials*, 14 (4), 199-233.
- CEN (2005). "CEN-EN-196-1-Methods of testing cement. Determination of strength." European Committee for Standardization.

- Diaz Gonçalves, T. and Brito, V., (2012). "SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS POSSIVELMENTE CONTAMINADOS COM SAIS SOLÚVEIS – Projecto DRYMASS."
- Forster, A., (2004). "Hot-Lime Mortars: A Current Perspective." *Journal of Architectural Conservation*, 10 (3), 7-27.
- Gore, W. L. A. (2014). Gore-Tex [Online]. Available: <http://www.gore-tex.com/en-us/home> [Accessed 10/02/2014].
- Grasley, Z., Lange, D. and D'Ambrosia, M., (2006). "Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete." *Materials and Structures*, 39 (9), 901-909.
- Guimarães, A., Diaz Gonçalves, T. and Azevedo, J., (2016). "Soluble Salts Amplify the Effect of Small Heterogeneities in the Structure of Porous Building Materials During Drying."
- Kang, S., Kim, J., Lee, Y., Park, Y. and Kim, J. K., (2012). "Moisture Diffusivity of Early Age Concrete Considering Temperature and Porosity." *KSCE, Journal of Civil Engineering*, 16 (1), 179-188.
- Kim, J.-K. and Lee, C.-S., (1999). "Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages." *Cement and Concrete Research*, 29 (12), 1921-1927.
- Kim, J. K. and Lee, C. S., (1998). "Prediction of differential drying shrinkage in concrete." *Cement and Concrete Research*, 28 (7), 985-994.
- Lanas, J., Sirera, R. and Alvarez, J. I., (2005). "Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments." *Thermochimica Acta*, 429 (2), 219-226.
- Lawrence, R. (2006a). "A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars." In: University of Bath (ed.) *Doctor of Philosophy, PhD Thesis*.
- Lawrence, R. M. H., (2006b). "A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars." Doctor of Philosophy, PhD Thesis, University of Bath.
- Lourenço, P. B., (1996). "Computational Strategies for Masonry Structures." Delft University of Technology.
- Margalha, G., Veiga, R., Silva, A. S. and de Brito, J., (2011). "Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method." *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 796-804.
- Meneghini, A., (2014). "Experimental Characterization of Aerial Lime Mortars in View of Multiphysics Modelling." Master Thesis, University of Padova, Università Degli Studi di Padova.
- Montes-Hernandez, G., Pommerol, A., Renard, F., Beck, P., Quirico, E. and Brissaud, O., (2010). "In situ kinetic measurements of gas–solid carbonation of Ca(OH)₂ by using an infrared microscope coupled to a reaction cell." *Chemical Engineering Journal*, 161 (1–2), 250-256.
- Oliveira, D. V. C., (2002). "Experimental and Numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading." PhD thesis, University of Minho.
- Oliveira, M. A., Azenha, M. and Lourenço, P. B., (2015a). "Simulation of Humidity Fields in Concrete: Experimental Validation and Parameter Estimation." *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13 (4), 214-229.
- Oliveira, M. A., Azenha, M. and Lourenço, P. B., (2015b). "Simulation of Humidity Fields in Concrete: Experimental Validation and Parameter Estimation " *Journal of Advanced Concrete Technology - J-Stage*, 13 (4), 214-229.
- Oliveira, M. A., Azenha, M., Lourenço, P. B., Guimarães, E. T., Castro, F. and Soares, D., (2016). "Study of the evolution of carbonation in aerial lime mortars " In: *V Fical - FICAL – FORUM IBÉRICO DA CAL. Lisbon*, 23-25 of May 2016 2016, 10.
- Oliveira, M. A., Azenha, M., Lourenço, P. B., Meneghini, A., Guimarães, E. T., Castro, F. and Soares, D., (2017). "Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar." *Construction and Building Materials*, 148 38-48.
- Oliveira, M. A. N., (2015). "A Multi–Physics Approach Applied to Masonry Structures with Non–Hydraulic Lime Mortars." Universidade do Minho.

- Quincot, P. G., (2012). "*Measurement of internal moisture distribution in concrete with relative humidity sensors.*" Bachelor Thesis, University of Minho.
- Saetta, A. V. and Vitaliani, R. V., (2005). "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures: Part II. Practical applications." *Cement and Concrete Research*, 35 (5), 958-967.
- Sensorium. (2015). Datasheet Evaluation Kit EK-H4 - SHT75 Version 4. Available: <http://www.sensirion.com/nc/en/products/humidity-temperature/download-center/?cid=879&did=62&sechash=e4106742> [Accessed 14/08/2015].
- Snow, J. and Torney, C. (2014). Lime Mortars in Traditional Buildings. (Short Guides, 6). Available: <http://conservation.historic-scotland.gov.uk/hs-short-guide-6.pdf> [Accessed 05-02-2015].
- Tanabe, T., Sakata, K., Mihashi, H., Sato, R., Maekawa, K. and Nakamura, H., (2008). "*Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Two Volume Set: Proceedings of the CONCREEP 8*" First Edition. Taylor & Francis.
- Vaisala (2004). "*Operating Manual.*" *HMI41 Indicator and HMP42 Probe*. Helsinki, Finland: Vaisala Oyj.
- Warren, M., (2000). "Economic Analysis for Property and Business." *First Edition*. Butterworth-Heinemann, Routledge.



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Características de materiales con base cal

Estudo de revestimentos à base de cal: uma abordagem integrada

António Santos Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, ssilva@lnec.pt

Resumo

A conservação e restauro do património arquitetónico construído é uma área de atuação complexa e que, por isso, exige uma grande interdisciplinaridade. Várias intervenções realizadas em Portugal optaram pela remoção dos revestimentos antigos e pela aplicação de novos revestimentos com ligantes mais recentes. Porém, os monumentos onde este tipo de intervenções ocorreu desenvolveram anomalias graves devido à incompatibilidade entre os novos revestimentos e os pré-existentes. Isto torna necessário no futuro a adoção de requisitos que garantam a compatibilidade entre materiais, o que implica um melhor conhecimento das características físicas, mecânicas, químicas e microestruturais dos revestimentos antigos.

O estudo de revestimentos antigos permite obter um conhecimento bastante profundo sobre os materiais utilizados, a técnica de aplicação e execução, e complementarmente sobre a história dos próprios monumentos. Neste contexto, o estudo de revestimentos de diferentes períodos e locais diversos, e que tenham também estado sujeitos a diferentes condições de exposição, permite a obtenção de informação valiosa para a conservação de revestimentos antigos, nomeadamente nos casos em que demonstraram com o passar dos séculos o seu bom desempenho. Esta informação também permitirá a formulação e aplicação de revestimentos no futuro com maior durabilidade.

Nesta comunicação apresentam-se exemplos de estudos em Portugal de caracterização de revestimentos de cal em que se demonstra a necessidade de uma abordagem integrada para um melhor conhecimento desses materiais e do seu estado de conservação. É ainda abordada a necessidade do registo e disponibilização dessa informação a todos os intervenientes e ao público em geral, nomeadamente através de repositórios de informação como é exemplo a base de dados de materiais portuguesa de construção com interesse histórico e patrimonial DB-Heritage.

Palavras-chave: Revestimentos de cal; Caracterização; Desempenho; Património histórico e arquitetónico; Base de dados.

Introdução

A conservação e restauro do património arquitetónico construído é uma área de atuação complexa, necessitando do apoio de diferentes especialidades, como arqueólogos, arquitetos, conservadores-restauradores, engenheiros, geólogos, historiadores, químicos, entre outras.

Nas intervenções em fachadas, em muitos casos infelizmente, tem-se optado pela remoção dos revestimentos antigos e a sua substituição por novos revestimentos formulados com ligantes mais modernos. Outra situação que também ocorre, igualmente atentatória do património e descaracterizadora dos materiais das fachadas, é a da reparação com revestimentos de pintura, a maior deles com características hidrófugas que impedem as trocas de humidade do interior para o exterior das paredes, contribuindo para o agravamento da degradação dos suportes e revestimentos.

Estas intervenções sem o devido planeamento e acompanhamento especializado originam com frequência o aparecimento de anomalias graves, essencialmente devido à incompatibilidade entre os materiais antigos e os mais recentes. Esta situação relança a necessidade de existirem requisitos que possam garantir a compatibilidade entre diferentes materiais e suportes, o que exige por parte da comunidade técnica e científica um maior e melhor conhecimento das características físicas, mecânicas, químicas e microestruturais dos revestimentos antigos.

De facto, o estudo de revestimentos antigos permite obter um conhecimento bastante profundo sobre os materiais utilizados e o seu estado de conservação, a técnica de aplicação e execução, e complementarmente sobre a história dos próprios monumentos [Groot et al., 2000; Santos Silva, 2002; Veiga, 2003; Veiga et al., 2013]. Os estudos de revestimentos de diferentes períodos, provenientes de diferentes condições de exposição, e que tenham tido um bom desempenho permitem a obtenção de informação valiosa para o estabelecimento de requisitos que possam garantir que as novas formulações tenham uma garantia de compatibilidade e de durabilidade com os materiais pré-existentes [Faria Rodrigues et al., 2008; Veiga et al., 2004; Veiga et al., 2010].

Neste artigo após uma descrição geral do tipo de ensaios de caracterização a realizar in-situ e em laboratório, apresentam-se exemplos de estudos em Portugal de caracterização de revestimentos antigos à base de cal em que se demonstra a necessidade duma abordagem integrada para um melhor conhecimento desses materiais e do seu estado de conservação. É ainda abordada a necessidade do registo e disponibilização dessa informação a todos os intervenientes e ao público em geral, nomeadamente através de repositórios de informação como é exemplo a base de dados de materiais portuguesa de construção com interesse histórico e patrimonial DB-Heritage [Santos Silva et al., 2018].

Ensaio de caracterização: in-situ e em laboratório

Atualmente existe um grande número de ensaios disponível para a caracterização física, química, mecânica e microestrutural de revestimentos à base de cal. Esses ensaios podem ser realizados in-situ e em laboratório – Figura 1. A vantagem dos primeiros é que são, em geral, semi-destrutivos ou não-destrutivos e permitem uma primeira avaliação de algumas características como o teor e distribuição de humidade, a resistência superficial, o módulo de

elasticidade, o tipo, teor e distribuição de sais solúveis, entre outras [Magalhães et al., 2008]. Os ensaios laboratoriais, apesar de terem uma maior precisão do que os anteriores, têm a desvantagem de necessitarem da obtenção de amostras. A amostragem é aliás um aspeto muito importante, pois se por um lado pode condicionar o resultado da caracterização, por outro deve obedecer aos requisitos de conservação, isto é, sem prejuízo do rigor e da representatividade a quantidade de amostra a recolher deve ser sempre a mínima necessária [Veiga et al., 2004; EN 16085, 2012].

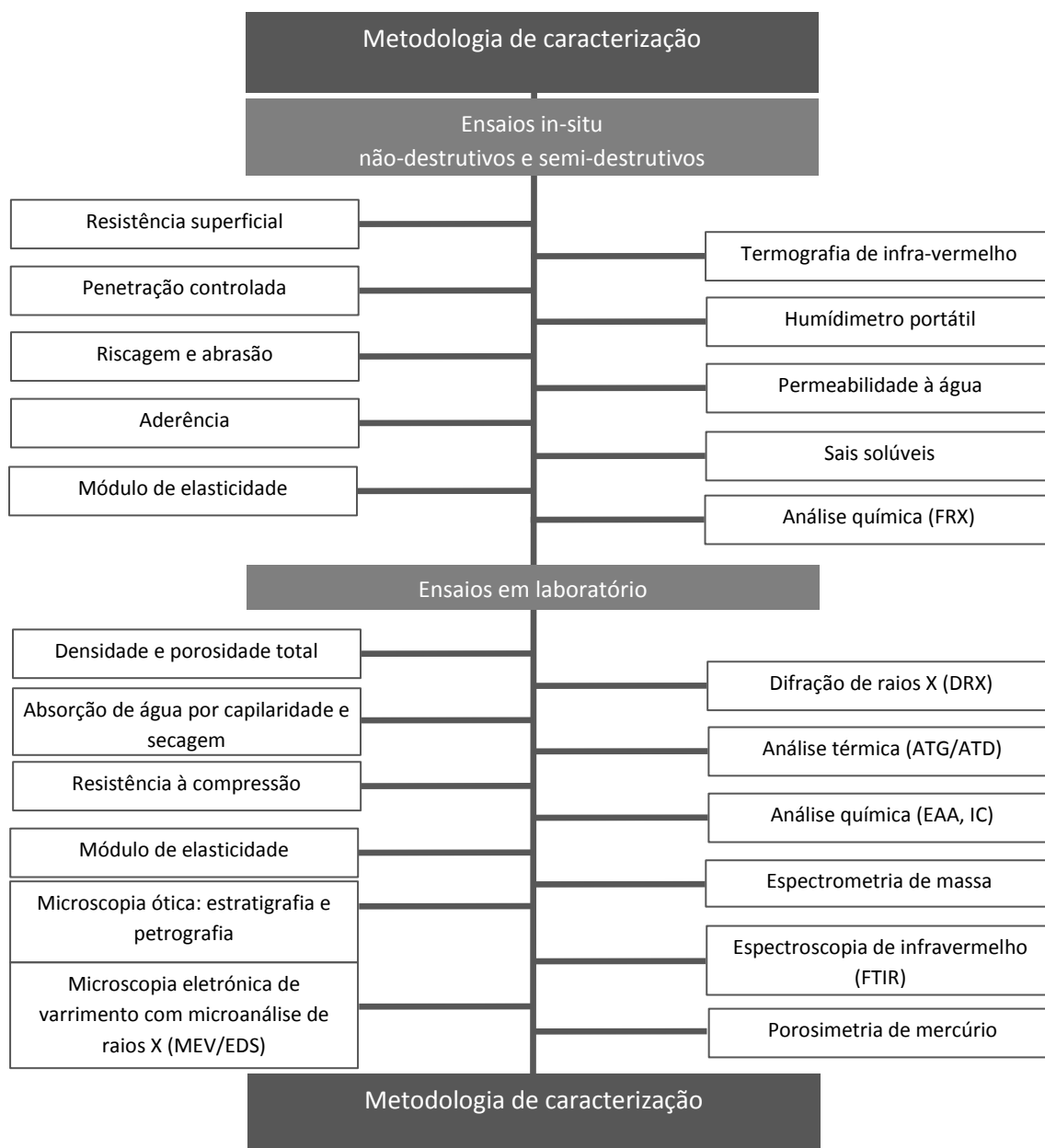


Figura 1: Representação esquemática da metodologia de caracterização de revestimentos antigos

A amostragem deve ser realizada segundo o objetivo do estudo: avaliação do estado de conservação ou determinação das características do revestimento visando a sua reprodução. Isso implica, respetivamente, a recolha de amostras em zonas com sinais de degradação ou em zonas sãs.

As amostras em laboratório devem ser observadas a olho nu, ou com o auxílio duma lupa binocular, para registo e descrição da cor, número de camadas e tipo de constituintes (por exemplo, presença de nódulos de cal, fragmentos de tijolo, entre outros). Após registo as amostras são separadas em frações para serem analisadas pelas diferentes técnicas selecionadas (Quadro 1).

Quadro 1: Técnicas de caracterização em laboratório: principais vantagens e limitações (adaptado de Magalhães et al., 2008)

Técnica	Objetivo	Vantagens	Limitações
Densidade e porosidade total	Determinação da massa volúmica aparente e porosidade	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer amostras com alguma dimensão e o resultado pode ser afetado pela forma da amostra
Porosimetria de mercúrio	Determinação da distribuição porosimétrica entre 1 mm e alguns nanómetros, bem como a área total de poros e o diâmetro médio de poro	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados
Absorção de água por capilaridade e secagem	Determinação do coeficiente de capilaridade e taxa de secagem	Possibilidade de utilização de amostras irregulares	Requer amostras com alguma dimensão e o resultado pode ser afetado pela forma da amostra
Resistência à compressão	Determinação da resistência mecânica	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer a utilização duma argamassa de confinamento, de maior resistência que a ensaiar, e que pode influenciar o resultado
Módulo de elasticidade	Determinação da rigidez	Possibilidade de utilização de amostras irregulares	Requer amostras com alguma dimensão e o resultado pode ser afetado pela forma da amostra
Microscopia ótica: estratigrafia e petrografia	Determinação do nº, cor e espessura das camadas; tipo de agregados e produtos de alteração	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento com alguma sofisticação e técnicos especializados
Microscopia eletrónica de varrimento com microanálise de raios X	Possibilita a visualização e análise de detalhes da microestrutura e a identificação dos constituintes existentes	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados
Difração de raios X (DRX)	Permite a deteção e identificação dos constituintes mineralógicos dos agregados e ligante, bem como de produtos de alteração	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados; só deteta compostos cristalinos
Análise térmica (ATG/ATD)	Permite a deteção de compostos em quantidades vestigiais e, em complemento com a DRX, a quantificação do teor de ligante; em complemento com a análise química possibilita a determinação do traço das argamassas	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados; só deteta compostos hidratados ou que sofram mudança de fase por aquecimento
Análise química (EAA, IC)	Permite a determinação dos elementos químicos presentes e perfis de distribuição de agentes químicos agressivos; a dissolução do ligante permite a realização da análise granulométrica da areia	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados; a presença de areia ou pó de pedra calcária dificulta a determinação do traço
Cromatografia líquida ou gasosa	Permite detetar e identificar moléculas; usada essencialmente para compostos orgânicos	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados
Espectroscopias de infravermelho (FTIR) e RAMAN	Permite detetar e identificar grupos funcionais de moléculas orgânicas e inorgânicas	Possibilidade de utilização de amostras pequenas e irregulares	Requer equipamento sofisticado e técnicos especializados

De entre as técnicas apresentadas no Quadro 1, são de salientar as técnicas de análise microestrutural pela sua versatilidade e gama de aplicações. Entre estas técnicas a que é menos exigente em meios instrumentais é a microscopia ótica. Nesta técnica é possível a observação de superfícies fraturadas e planas de amostras de argamassa de revestimento. No caso das superfícies planas e polidas é possível fazer a observação da estratigrafia das amostras, o que é particularmente importante para conhecimento do modo de aplicação e acabamento da superfície do revestimento, bem como para o conhecimento do tipo, cor e morfologia dos agregados, ou o número, cor e espessura das camadas existentes – Figura 2.

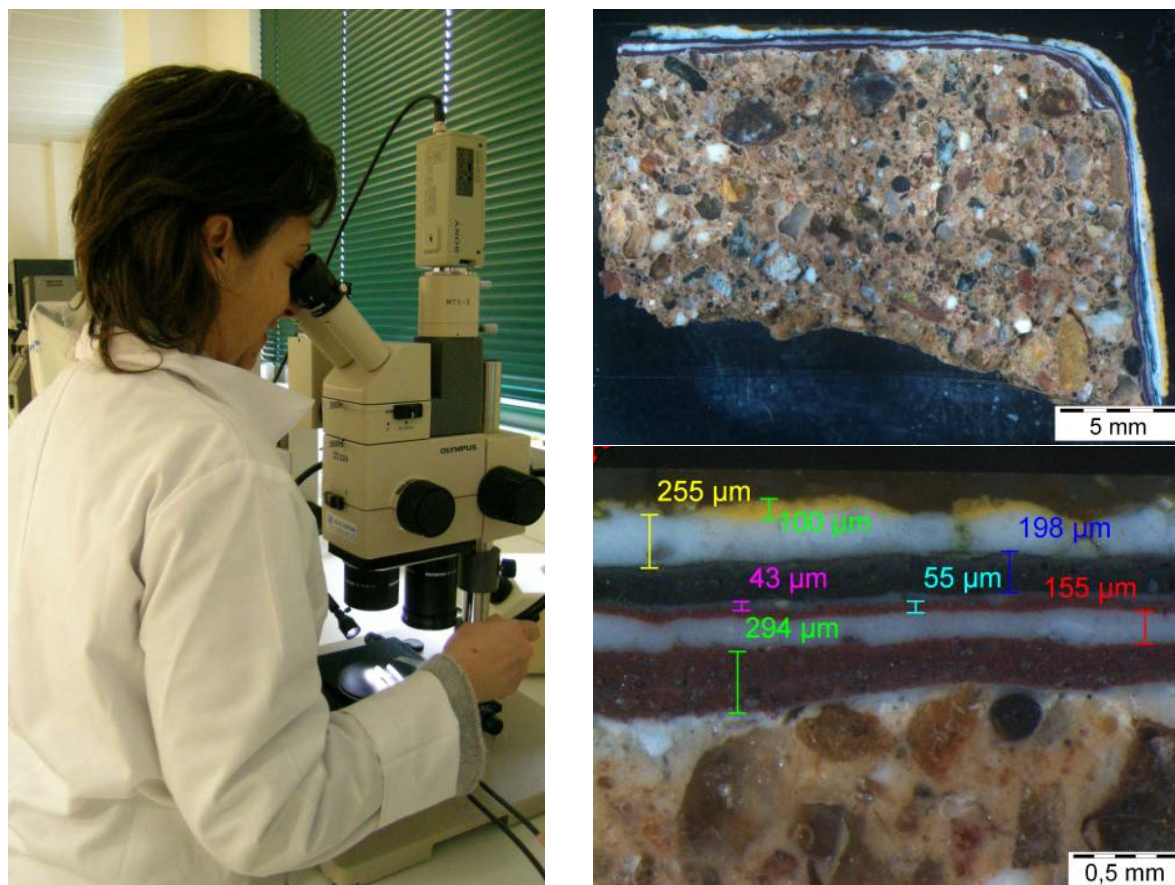


Figura 2: Observação da estratigrafia de argamassas de revestimento ao microscópio ótico

Existem ainda outras técnicas microscópicas que, embora tenham maior resolução, têm o inconveniente de serem mais dispendiosas e exigirem o apoio de técnicos especializados para a interpretação dos resultados. Destas, a análise petrográfica, por exemplo, tem a vantagem de fornecer informação sobre o tipo e estado de alteração dos agregados, que são o componente principal das argamassas. Pode ainda dar informação sobre a origem dos agregados que foram usados, dado muito relevante, juntamente com a cor e granulometria, para a formulação de argamassas de substituição. Outra técnica ainda com maior resolução e que alia a análise microestrutural com a análise química é a microscopia eletrónica de varrimento com a microanálise de raios X (MEV/EDS). Com esta técnica é possível obter, por exemplo, imagens de morfologia e da distribuição da composição elementar (Figura 3), o que é muito importante para

o diagnóstico das causas de degradação, no controlo da eficácia dos tratamentos de limpeza, de consolidação e de proteção aplicados [Veiga et al., 2004]. Para além disso, na MEV/EDS é possível fazer-se a análise química das zonas em observação, o que permite determinar a composição do ligante, dos agregados e a identificação de compostos de neoformação ou de degradação.

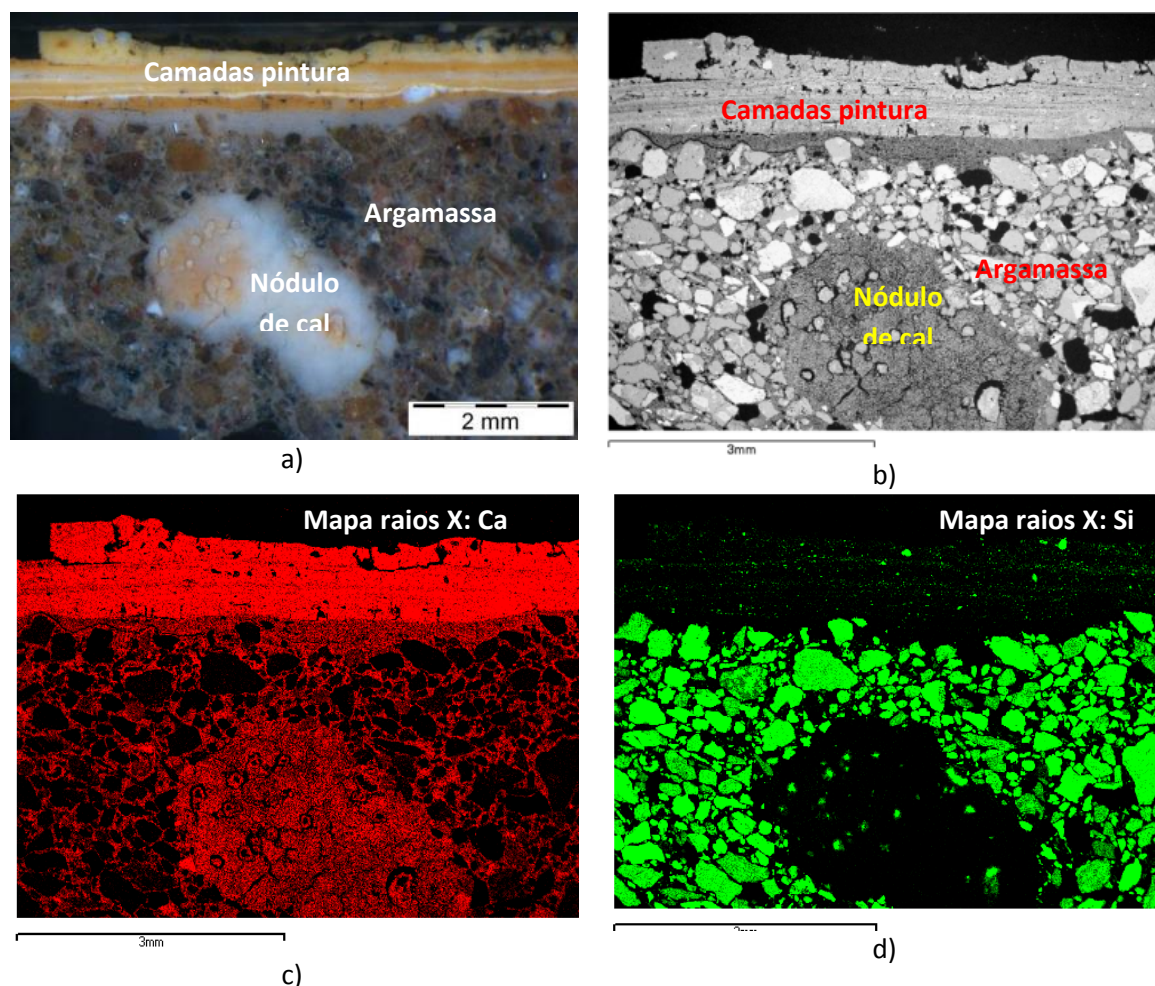


Figura 3: Amostra de argamassa de revestimento com pintura; a) Imagem ao microscópio ótico; b) Idem, mas ao microscópio eletrónico de varrimento e onde é visível a porosidade (espaços negros) e a distribuição do agregado; c,d) Mapas elementares de raios X dos elementos cálcio (c) e silício (d) correspondentes à imagem em (b)

O ataque ácido das amostras de argamassa, associado a métodos instrumentais de análise química, como por exemplo, a espetrometria de absorção atómica (EAA) ou a cromatografia iónica (IC), permite um conhecimento acerca dos elementos químicos presentes na amostra em análise. Esta informação é particularmente relevante para determinar o teor de alguns agentes químicos agressivos (por exemplo, sulfatos ou cloretos). O ataque ácido permite também a separação do ligante dos agregados siliciosos e argila, o que viabiliza a análise granulométrica da areia e o seu estudo morfológico e de cor.

Já a identificação de compostos inorgânicos e orgânicos requer a utilização de técnicas instrumentais de análise química com alguma complexidade e que necessitam de técnicos especializados para a realização e interpretação dos ensaios.

A técnica de excelência para a análise de compostos cristalinos é a difração de raios X (DRX). No caso de amostras de revestimento permite a identificação dos constituintes dos agregados e dos ligantes, bem como na identificação de sais e compostos de neoformação (compostos estes originados, em presença de humidade, pela reação entre os constituintes da amostra e o meio ambiente, e que poderão ter, ou não, características hidráulicas).

A análise térmica é, a par da DRX, outra técnica usada para a identificação de compostos, a maioria hidratados ou carbonatados. Entre as técnicas de análise térmica as mais empregues são a análise termogravimétrica com a análise térmica diferencial em simultâneo (ATG/ATD). A ATG/ATD permite determinar os teores de alguns compostos da pasta do ligante (por exemplo, gesso, portlandite e calcite), o que a torna indispensável na obtenção do teor de ligante e, em complemento com a análise química, a determinação da razão ligante:agregado.

Já as técnicas mais empregues para a deteção e análise de compostos orgânicos são a espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a espectroscopia de Raman e a cromatografia líquida e gasosa. Estas técnicas são especialmente úteis na identificação de óleos, ceras, resinas, pigmentos, corantes e ligantes orgânicos.

Finalmente as técnicas de caracterização mecânica (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e física (densidade, porosidade, absorção e secagem de água) dão informação sobre o estado de conservação do revestimento, permitindo fundamentar as futuras intervenções de conservação e dar apoio à formulação de argamassas de substituição.

Exemplos de estudos em Portugal de caracterização de revestimentos antigos à base de cal

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil ao longo dos últimos anos tem acompanhado diversas intervenções e tem realizado estudos de caracterização de diversas estruturas em todo o território nacional. Essa intervenção tem possibilitado a recolha de informação de diversos materiais e em diferente contexto.

Assim, nesta secção descrevem-se de forma muito genérica alguns dos estudos realizados e os principais resultados obtidos, que foram divididos em 3 períodos: romano, árabe e cristão.

Período romano

Ruínas romanas de S. Cucufate (séc. I – IV)

Situado perto da cidade de Beja, na região do Alentejo, instalou-se no séc. I d.C., uma *villa*, que foi centro de uma exploração agrícola. Até ao século IV a casa da primeira instalação foi sendo progressivamente monumentalizando, sendo desta fase os vestígios que, ainda hoje permanecem no local [Ricardo & Santos Silva, 2005] – Figura 4.

Foram analisadas argamassas de 3 locais: do revestimento da parede do tanque/piscina (datado do séc. II), da alvenaria duma parede da habitação (possivelmente do séc. II) e do reboco da capela (datada do séc. IV).



Figura 4: Vistas gerais das ruínas de S. Cucufate [Ricardo & Santos Silva, 2005]

A argamassa do tanque caracterizava-se por apresentar uma grande proporção de agregado cerâmico partido – Figura 5a, característica comum a outras argamassas do mesmo período [Santos Silva et al., 2006; Velosa et al., 2007], e cuja incorporação seria propositada para melhorar a hidráulica da argamassa. De facto, os ensaios DRX confirmaram a presença de compostos hidratados, do tipo aluminatos de cálcio. Nas outras duas argamassas, provenientes de zonas menos expostas à água, o agregado empregue foi uma areia natural de natureza siliciosa, e não foram detatados compostos hidratados.

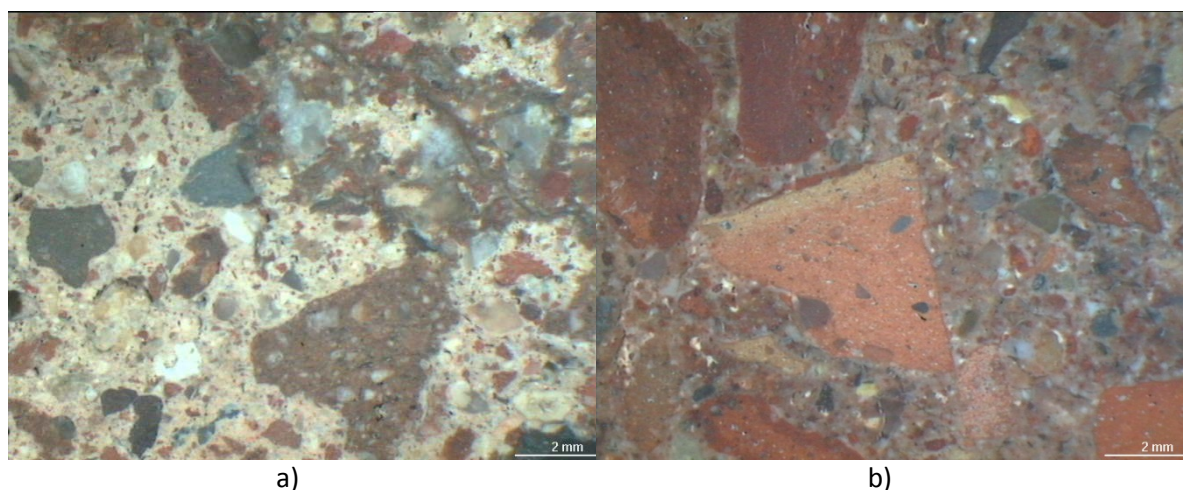


Figura 5: Imagens em superfície polida de argamassas de revestimento do tanque das ruínas romanas de S. Cucufate (a) e do criptopórtico das ruínas romanas de Mértola [Ricardo & Santos Silva, 2005]

Ruínas romanas de Tróia (séc. I – VI)

O sítio arqueológico de Tróia fica situado na margem esquerda do rio Sado, em frente à cidade de Setúbal, tendo sido um grande centro de produção de peixe salgado e de molhos de peixe [Pinto et al., 2014]. As ruínas abrangem várias construções do período entre os séculos I ao VI, e incluem uma área habitacional, um balneário, quatro zonas de enterramento, um núcleo religioso e vários núcleos industriais [Ricardo & Santos Silva, 2005].

Entre os tipos de sepultura utilizados destacam-se as *mensae*, ou sepulturas de mesa, com revestimento em *opus signinum* – Figura 6a. Segundo Pinto, Magalhães & Brum [2016] as *mensae* destinavam-se à realização de refeições sobre a campa dos defuntos, ou à deposição de oferendas alimentares e de perfumes, sendo esta manifestação um traço característico em Tróia mas raro na Lusitânia.

As fábricas de salga incluem vários tanques (*cetareas*) revestidos a *opus signinum*, a maioria em muito bom estado de conservação – Figura 6b.

Foram analisadas amostras do revestimento das sepulturas de mesa e argamassas dos tanques para determinação da composição – Figura 6c e 6d, visando o apoio a futuras intervenções de conservação e restauro.

Os resultados mais surpreendentes do estudo de caracterização talvez tenham sido a diversidade da estratigrafia e materiais empregues nos pavimentos das *cetareas*. A presença de tijolo partido e moído parece ter sido usada só em algumas das *cetareas*, enquanto noutras a opção foi pela utilização de agregado calcário, muito abundante na zona. Uma outra curiosidade foi a presença duma camada de argila montmorilonítica na base desses pavimentos, a qual teria sido usada, dado a proximidade do nível do mar, como camada de impermeabilização.

Constatou-se ainda, nomeadamente por DRX e ATG/ATD, a presença de dois tipos de cal: cal cálcica e cal dolomítica.



Figura 6: Ruínas romanas de Tróia; a) Zona de enterramento com sepulturas *mensae*; b) Núcleo industrial da produção de peixe salgado e de molhos de peixe; c,d) Pormenores da estratigrafia dos pavimentos de duas *cetareas*, sendo visível a presença duma camada de assentamento em argila (setas)

Ruínas romanas de Mértola (séc. III – VI)

Mértola fica no distrito de Beja, região do Alentejo, junto à fronteira com Espanha. Está localizada numa elevação cercada pela ribeira de Oeiras e pelo Guadiana, garantiram-lhe

invejáveis condições naturais de defesa, e que foram reforçadas com a construção de imponentes muralhas que cintam todo o conjunto edificado da velha urbe – Figura 7a. Mértola está situada numa região de climas tipicamente mediterrâneos, com Invernos pouco chuvosos e Verões extremamente quentes e secos [Ricardo & Santos Silva, 2005; Palma, 2009], razão que terá provavelmente motivado a construção na vertente norte da encosta do Castelo numa galeria subterrânea – o criptopórtico – com cerca de 30 metros de comprimento e 6 de altura que serviu de cisterna – Figura 7b.



Figura 7: a) Vista geral de Mértola com as muralhas em primeiro plano e o castelo no alto; b) Vista do interior do criptopórtico

Foram analisadas argamassas de assentamento da alvenaria e do revestimento do criptopórtico [Santos Silva et al., 2006]. Apenas na argamassa de revestimento eram visíveis fragmentos de tijolo partidos e moídos – Figura 5b, característica que havia sido anteriormente observada em amostras de S. Cucufate e de Tróia, e que confirma a utilização destes materiais quando era pretendida a obtenção de características hidráulicas. Também neste os ensaios de DRX evidenciaram a presença de compostos de caráter hidráulico, do tipo aluminato de cálcio hidratado.

Período árabe

Mesquita / Igreja de Mértola (séc. XII)

A Igreja Matriz de Mértola é um reaproveitamento cristão da antiga mesquita muçulmana construída em finais do século XII – Figura 8a. Foi com os cavaleiros da Ordem de Santiago, em 1238, depois de sagrado para o uso do ritual cristão, que este edifício recebeu a sua primeira intervenção, que lhe alterou a sua primitiva configuração de mesquita almóada. Da antiga mesquita restam dois capiteis, reutilizados nas obras quinhentistas, quatro portas de arco ultrapassado e o *mihrab* – nome dado ao nicho que integra os grandes santuários de oração muçulmanos e que tinha por finalidade indicar aos fiéis a direção de Meca [Adriano & Santos Silva, 2006].



Figura 8: a) Vista da Mesquita / Igreja de Mértola com o castelo em segundo plano; b) Vista do revestimento da parede interior do *mihrab*

A caracterização por DRX da argamassa de revestimento do *mihrab* evidenciou a presença de gesso e, em pequena quantidade, quartzo, feldspatos, mica, clorite e calcite, indicando tratar-se duma argamassa de gesso e areia siliciosa. A presença de uma pequena quantidade de calcite pode ser devida à adição de cal ao gesso durante a preparação da argamassa.

A descoberta da utilização do gesso em materiais de construção em Portugal em materiais deste período, ou mesmo no período romano, é bastante rara. Que o autor tenha conhecimento, este será o primeiro registo em Portugal da utilização de gesso como ligante em argamassas.

Era cristã

Sé Catedral de Évora (séc. XII – XVI)

A Sé Catedral de Évora (Figura 9a) é um dos mais emblemáticos monumentos de Évora, cidade situada no distrito do Alentejo. A data da construção é um dado bastante discutido entre os historiadores; segundo a versão tradicional, o lançamento da primeira pedra terá sido em 1186 e as obras ter-se-ão prolongado até ao século XVI, mas subsistem muitas dúvidas sobre a data de início e sobre as intervenções de conservação efetuadas ao longo dos vários séculos.

No âmbito dum projeto de investigação relacionado com a caracterização e conservação de argamassas tradicionais históricas de edifícios religiosos (<http://cathedral.Inec.pt/index.html>) do

Alentejo procedeu-se em 2005 ao estudo de sete amostras de argamassa de revestimento recolhidas em vários locais – Figura 9b.

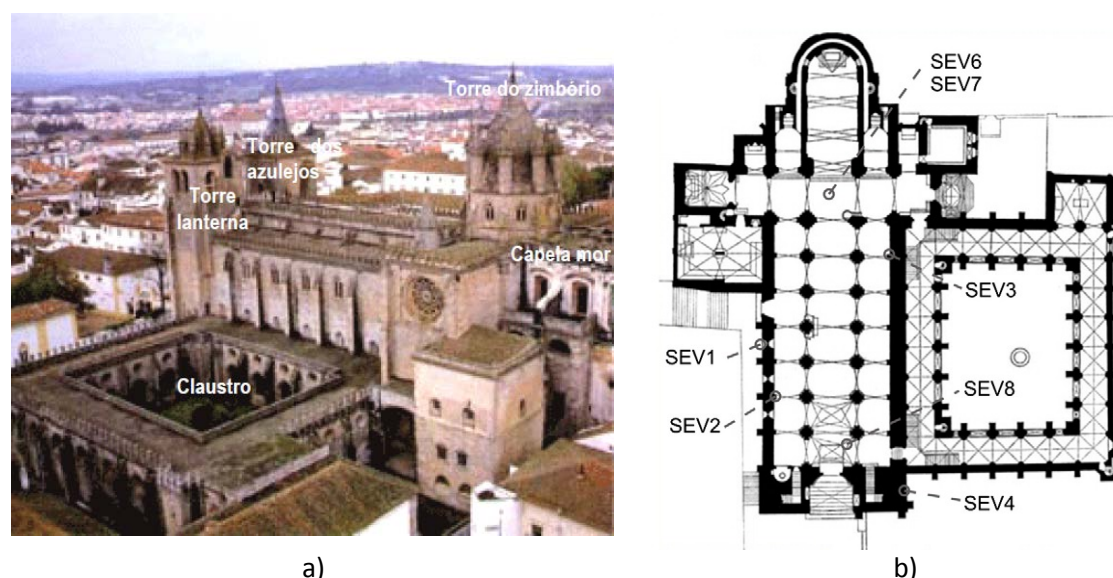


Figura 9: a) Vista geral do exterior da Sé de Évora e do claustro; b) Planta do interior da Sé com a localização das amostras analisadas [Adriano & Santos Silva, 2006; Adriano et al., 2009]

O estudo realizado permitiu obter conclusões muito interessantes acerca do tipo e proveniência de alguns dos materiais empregues, bem como sobre o seu estado de conservação e a época provável da sua aplicação.

A análise à lupa binocular e análise por DRX mostraram que as argamassas têm uma composição mineralógica uniforme e correlacionada com as rochas granitóides do complexo cristalino de Évora. Por outro lado, a análise petrográfica identificou a presença de olivina (um mineral muito suscetível à meteorização) nos agregados, o que demonstra que estes tiveram um transporte mínimo, e que é consentâneo com os granodioritos da pedra do *Alto de S. Bento* na proximidade de Évora.

Em termos do ligante verificou-se por DRX e ATG/ATD que as argamassas são, à exceção de duas amostras e ambas da torre do Zimbório, de cal dolomítica – Figura 10. A informação de que num dos locais amostrados a argamassa teria sido aplicada no século XVI, associado às características determinadas na análise das várias amostras, coloca a hipótese de que as argamassas analisadas correspondem a apenas duas épocas: as de cal calcítica do século XIV e as de cal dolomítica do século XVI. De facto, inicialmente pensava-se que as amostras seriam de épocas muito distintas e situadas entre os séculos XIII e o XVI.

Outro dado interessante foi constatar por DRX e MEV/EDS a presença de cloreto de sódio (halite) – Figura 11 – nas argamassas do interior da Sé, sal que não havia sido detetado nas argamassas da torre do Zimbório. É possível que a halite tenha sido adicionada durante a confeção das argamassas, com a finalidade de acelerar o processo de carbonatação, e não por contaminação do exterior, já que nesse caso então a sua presença seria maior no Zimbório.

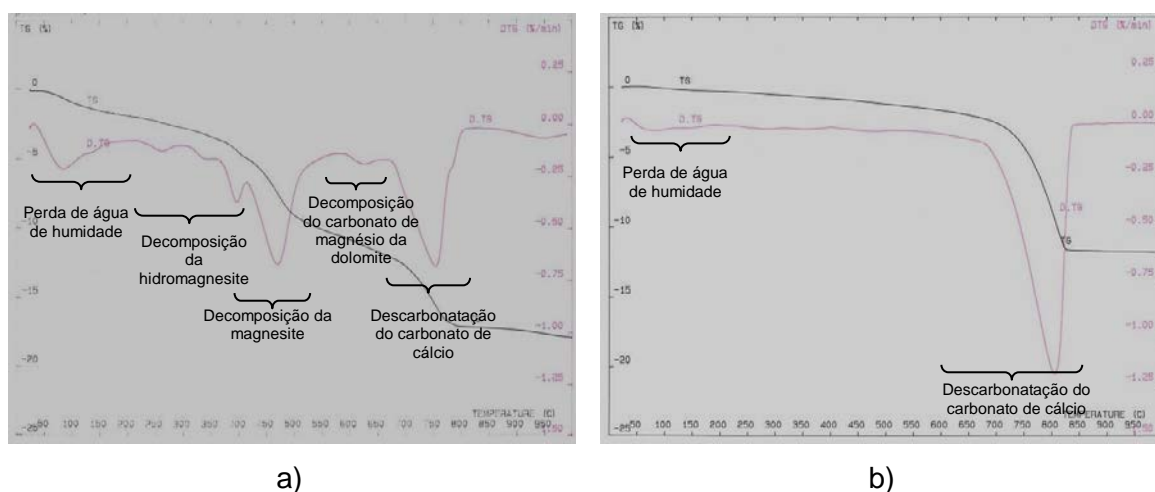


Figura 10: a) Termogramas da amostra SEV4, característico duma argamassa de cal dolomítica;
b) Termogramas duma amostra de cal cálcica

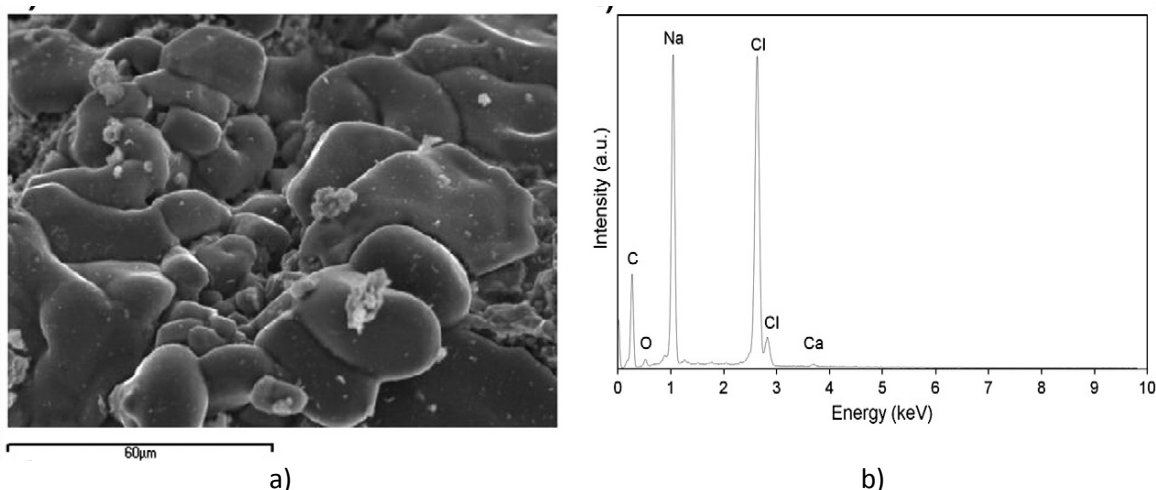


Figura 11: a) Aspeto ao MEV de cristais de halite numa interface agregado/pasta; b) Espetro EDS da halite

Castelo da Amieira do Tejo (séc. XIV)

O Castelo de Amieira do Tejo (Figura 12) situa-se na povoação de Amieira do Tejo, no distrito de Portalegre no Alentejo. Edificado em meados do século XIV, é um excelente espécime da arquitectura militar trecentista integrado na linha defensiva da margem sul do Tejo. O Castelo com a sua forma original em granito emparelhado sofreu várias modificações ao longo dos séculos, e teve utilizações diversas.

As análises da composição das argamassas mostraram tratar-se de argamassas ricas em nódulos de cal, aspecto característico das argamassas de cal aérea cálcica. No entanto, a abundância e dimensões indica que nas argamassas deste monumento o processo de extinção da cal foi incompleto [Elsen et al., 2004]. O estudo petrográfico indicou que a origem provável

dos agregados empregues seja de um afloramento próximo do Castelo – os Conglomerados de Mação (depósitos fluviais terciários) e ainda de granitos.

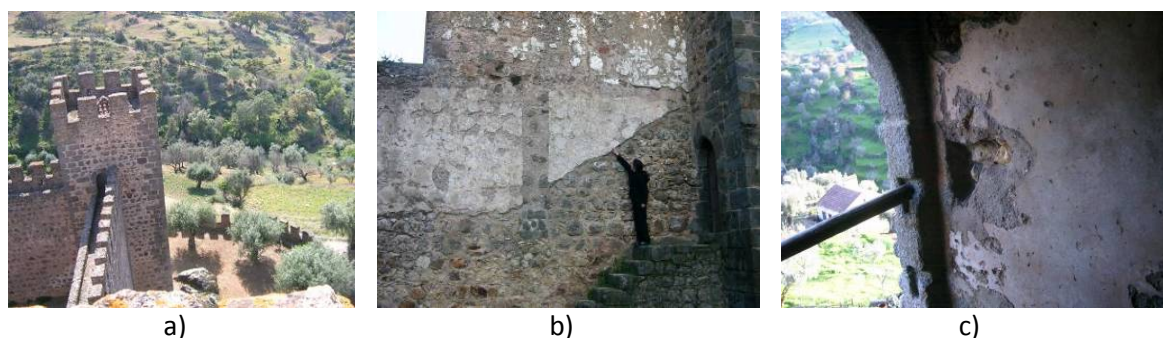


Figura 12: a) Vista de uma das torres do Castelo de Amieira doT; b) Parede no interior do pátio onde foi colhida a amostra AM1; c) parede interior duma torre do Castelo onde foi colhida a amostra AM2 [Cruz & Santos Silva, 2006]

Outro dado que se verificou foi que as substâncias neoformadas foram detectadas em quantidades vestigiais e as pozolanas, naturais ou artificiais, não foram detectadas. Este dado é sintomático dum menor cuidado neste período na formulação das argamassas.

Castelo de Viana do Alentejo (séc. XIV – XVI)

O Castelo de Viana do Alentejo terá sido construído no início do século XIV e está situado na vila do mesmo nome, pertencente ao distrito de Évora. No espaço intra-muros, na ala sul do Castelo, datando do primeiro quartel do século XVI, ergueu-se a nova Igreja matriz, edifício manuelino, com nítidas influências mudéjares [Santos Silva et al., 2005] – Figura 13.

Englobado no projecto de conservação recuperação e valorização do Castelo de Viana do Alentejo, estudou-se um conjunto de amostras de argamassa de diferentes tipologias. Na Igreja da Misericórdia analisaram-se amostras de argamassa de assentamento de azulejos do interior da igreja (VA3 e VA4) e do enchimento da base do altar barroco (VA5). Na Igreja Matriz foi analisada amostra de argamassa de preenchimento de juntas do interior da face exterior da parede sul (VA6) – Figura 14.

A análise por DRX mostrou que as amostras são argamassas de cal aérea cálcica e areias de composições muito semelhantes, não se detectando a presença de compostos de características pozolánicas. A observação ao microscópio óptico do resíduo insolúvel como por DRX foi possível verificar que as amostras VA3 e VA6 possuem areias provavelmente provenientes da meteorização de rochas do tipo granodiorítico existentes na região. Relativamente à amostra VA5, estas duas técnicas permitiram constatar que as areias são constituídas por uma mistura de rochas metamórficas e magmáticas, sendo possivelmente originárias de sedimentos de leito de rio. Esta hipótese é corroborada pela não existência de biotite, um mineral que se altera muito facilmente, e pela argilização dos feldspatos [Santos Silva et al., 2005].



Figura 13: Vista do conjunto monumental do Castelo de Viana do Alentejo [imagem retirada de <http://www.cm-vianadoalentejo.pt/pt/site-visit/patrimonio-edificado/Paginas/Castelo.aspx>]

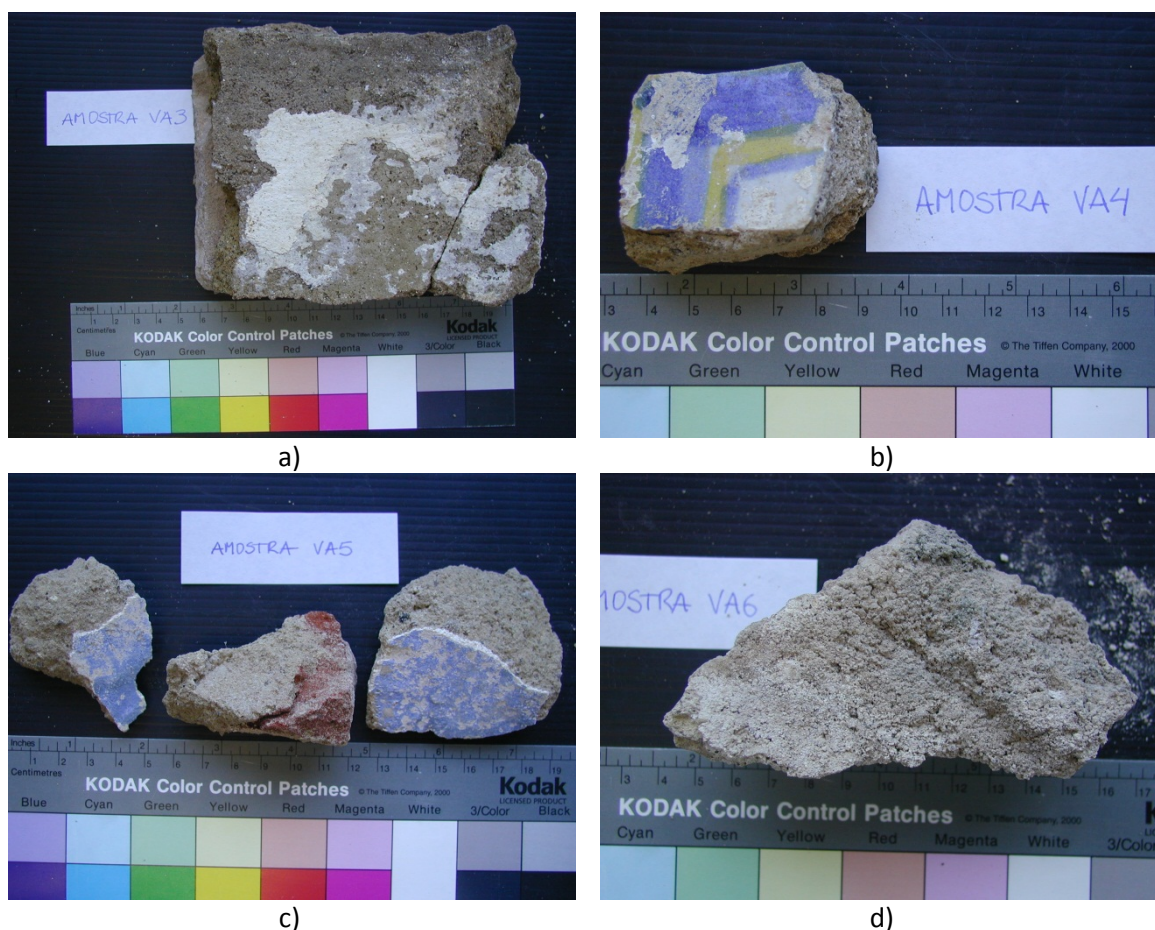


Figura 14: Fotos das amostras de argamassa de assentamento de azulejos (VA3 e VA4), de enchimento da base do altar barroco (VA5) e de preenchimento de juntas (VA6) do conjunto monumental do Castelo de Viana do Alentejo

Em termos globais as análises revelaram estar-se em presença de argamassas ricas em ligante, e areias de composição homogénea, revelando um cuidado na selecção e proporção dos materiais. A existência de calcite recristalizada e de carboaluminatos de cálcio hidratados na pasta são indicativos de processos reaccionais entre os agregados e o ligante e de dissolução e reprecipitação devidos à ação da água. De facto, em vários locais eram evidentes sinais de humidade elevada e de infiltrações que causaram diversos tipos de anomalias, como destacamentos e colonizações biológicas.

Sé de Elvas - Igreja de Nossa Senhora da Assunção (séc. XVI – XVIII)

A Sé de Elvas, ou Igreja de Nossa Senhora da Assunção (Figura 15), está localizada em Elvas, cidade do distrito de Portalegre na região do Alentejo. A sua construção terá sido iniciada em 1517, segundo um projecto atribuído a Francisco de Arruda, e sofreu várias modificações até ao século XVIII, sendo de destacar as obras levadas a cabo no episcopado de D. Lourenço de Lencastre (bispo de 1759 a 1780), a quem se deve a encomenda dos retábulos de mármore de Estremoz para as capelas mor e laterais e os programas azulejares típicos da segunda metade do século XVIII. A diocese de Elvas foi extinta em 1881 e daí em diante não se efectuaram obras significativas. Actualmente o edifício continua a ser utilizado para o culto religioso [Cruz & Santos Silva, 2006].

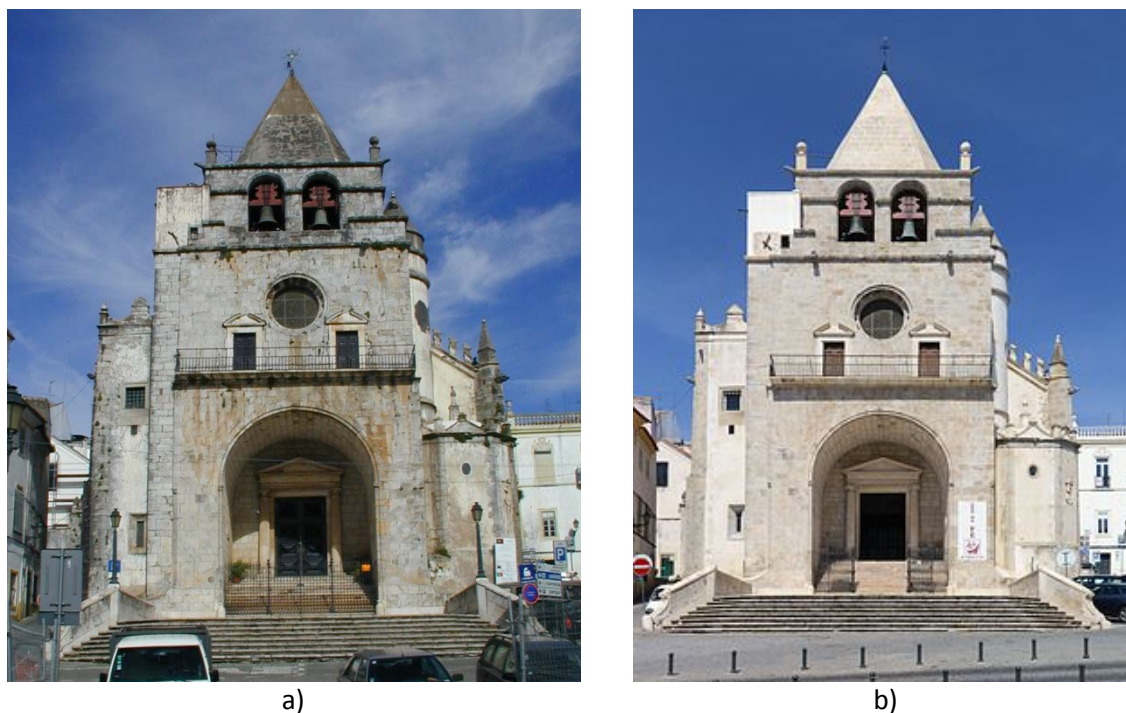


Figura 15: Vista da fachada da Sé de Elvas antes (a) e depois (b) de obras de conservação e restauro efetuadas em 2006. Imagem em (b) retirada de <https://pt.wikipedia.org>

Deste monumento estudou-se a composição de 3 amostras de argamassa: do revestimento de um pináculo do terraço (SEL 1); da camada subjacente à argamassa de assentamento de azulejos numa parede junto à sacristia (SEL 2) e do revestimento do tecto da nave central da sé (SEL 3).

Os resultados do estudo petrográfico das argamassas deste monumento permitem admitir, face à envolvente geológica do monumento, que no fabrico destas argamassas foram usados como agregados rochas ígneas e metamórficas da região, nomeadamente granitos alcalinos, gabros e outras rochas alcalinas. Constatou-se também a presença de fragmentos cerâmicos nestas argamassas, o que se revelou de extrema importância como forma de melhorar a qualidade mecânica destas argamassas. De facto, a análise por DRX e MEV/EDS mostrou a presença de compostos hidratados de características hidráulicas.

Finalmente, verificou-se que as argamassas foram fabricadas com ligantes aéreos de diferente natureza: cálcica (SEL 1 e SEL 3) e dolomítica (SEL 2). A obtenção desta informação foi relevante para a campanha de restauro efetuada em 2006 [Salema et al., 2008].

Palácio de Estói (séc. XIX)

O Palácio Estói fica situado na aldeia de Estói, distrito de Faro, no sul de Portugal (Figura 16). A construção começou em meados do séc. XIX, mas só terá sido concluído em finais do séc. XIX. O programa decorativo do Palácio foi concebido por Domingos Meira, considerado o mais importante estuador Português da segunda metade do século XIX [Freire et al., 2016].

Em 2008, uma extensa campanha de obras promoveu o restauro e adaptação do edifício para hotel de luxo, tendo nessa sequência sido analisadas algumas amostras de revestimento de estuque.



Figura 16: Vista da fachada sul do palácio de Estói [Freire, 2016]

Das várias amostras analisadas é de realçar uma pertencente a uma moldura duma porta do Salão Nobre que imitava pedra natural (Figura 17a), e que se havia destacado devido à corrosão dos elementos metálicos de pregagem.

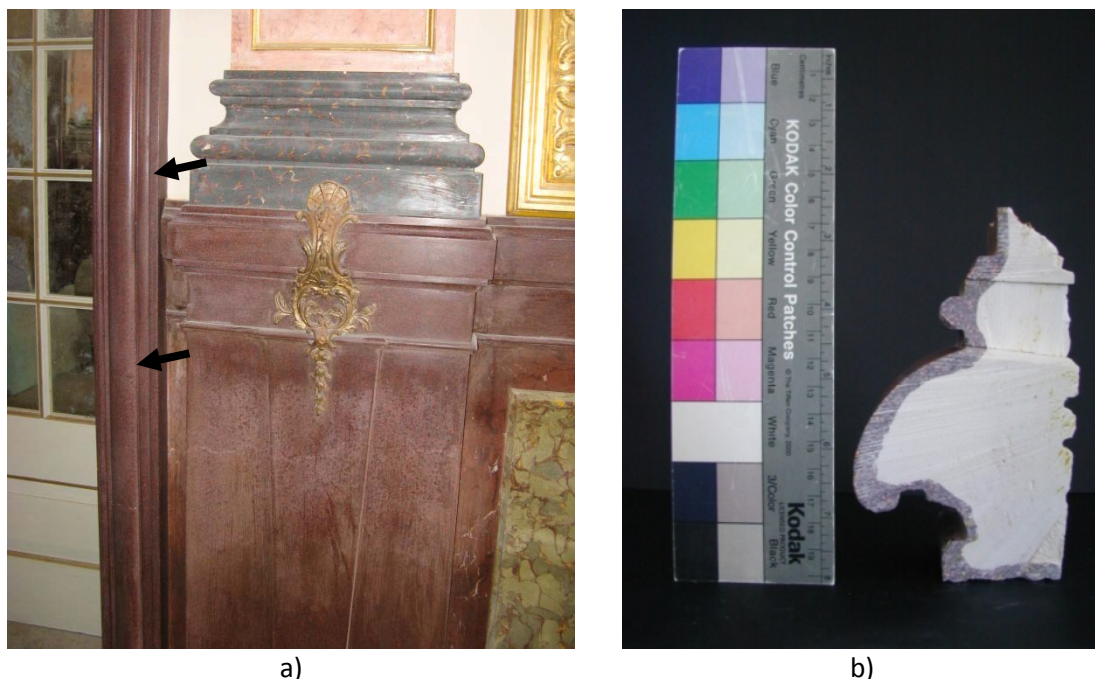


Figura 17: a) Moldura da porta (setas) do Salão Nobre do Palácio de Estói, que simula uma pedra vermelho pórfiro imperial; b) Corte estratigráfico da amostra da moldura

As análises estratigráficas (Figura 17b) revelaram um revestimento multi-camada, constituído por uma camada final de acabamento muito compacta e com cores diversas.

As análises DRX e por microscopia ótica e MEV/EDS revelaram a presença de gesso, o mineral em maior proporção, e alguma anidrite e hematite. A hematite foi assim o pigmento usado, sendo que a análise por microscopia ótica permitiu clarificar a razão da diferente coloração: na cor-de-laranja o pigmento foi usado como pó; na cor púrpura clara foi usado em partículas mais grosseiras; na cor púrpura foi usado uma mistura de pó e partículas do pigmento (Figura 18) [Freire et al., 2016].

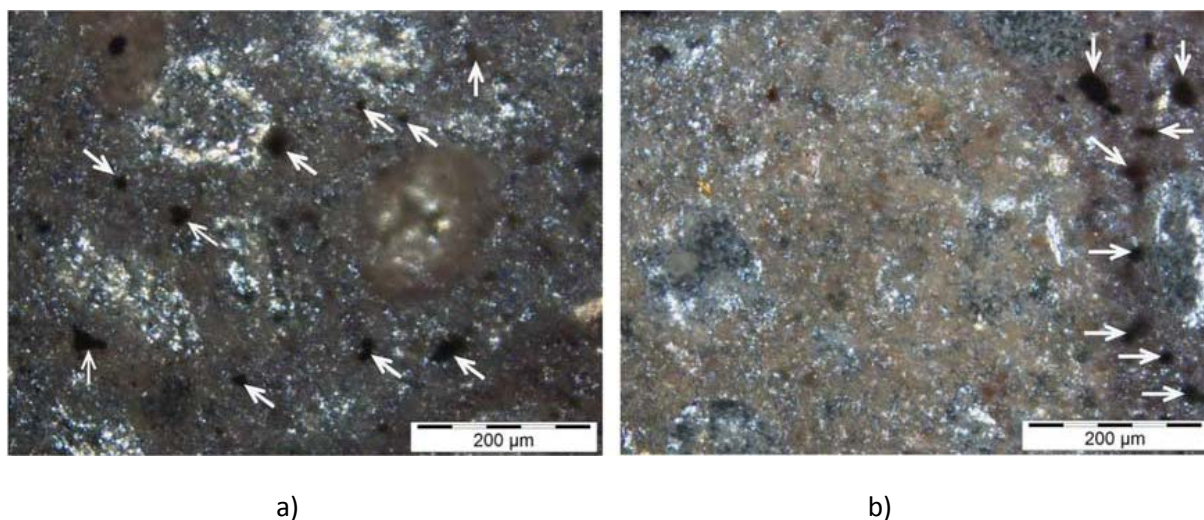


Figura 18: Observações ao microscópio petrográfico com nicóis cruzados mostrando os diferentes tamanhos de grãos de pigmentos de hematite (setas brancas): (a) cor purpura clara; (b) cor de laranja laranja e púrpura [Freire et al., 2016]

A elevada resistência demonstrada por este revestimento estará relacionada com a presença na “pasta” de anidrite II, um sulfato de cálcio anidro e relativamente pouco solúvel.

As análises realizadas nesta amostra permitiram caracterizar pela primeira vez em Portugal uma amostra do denominado *stucco-mármore*, um revestimento de gesso de elevada complexidade técnica.

Edifício de Luíz Rau (séc. XX)

O edifício de Luíz Rau (Figura 19) está situado na cidade de Lisboa, e foi galardoado com o Prémio Valmor da Arquitetura em 1923. Esta atribuição corresponde a um dos mais prestigiados prémios da arquitetura em Portugal. Trata-se de um edifício construído especificamente para alojamento, e em que a estrutura das paredes é em alvenaria de tijolo e pedra, sendo os pisos e a estrutura da cobertura em madeira [Almeida et al., 2017].



Figura 19: Vista da fachada do edifício Luíz Rau em Lisboa [Almeida et al., 2017]

Este edifício está no limiar da utilização em larga escala do cimento portland em Portugal, e encontra-se incluído num estudo em curso dum conjunto de edifícios galardoados com o Prémio Valmor da Arquitectura em Portugal, onde se procura clarificar a transição da utilização da cal para o cimento portland em revestimentos e betões na construção em Portugal.

Base de Dados de materiais de construção com valor histórico e patrimonial

As intervenções de conservação e restauro devem garantir o respeito pela autenticidade e compatibilidade com os materiais originais, o que implica um conhecimento das características dos materiais originais existentes e dos de reparação. Torna-se por isso fundamental preservar a informação sobre o desempenho dos materiais de construção, quer em termos do seu valor histórico, mas também para servir de base à inovação e desenvolvimento de novas soluções na área da conservação do património construído.

Como se viu nos exemplos apresentados neste artigo, existe um largo arquivo de informação já disponível sobre a caracterização física, química e mecânica de materiais. A necessidade de reunir a informação existente, mas em geral dispersa, foi a base para a criação do projeto DB-HERITAGE (Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial), que visa a construção de um repositório de materiais históricos. Esse repositório inclui a compilação física de amostras de referência e uma Base de Dados para registo sistematizado de dados relativos à história, propriedades e desempenho dos materiais, promovendo uma plataforma de investigação sobre o desempenho passado e futuro de materiais de construção históricos.

Os dados arquivados na Base de Dados consistem em informação de carácter documental sobre os monumentos/casos de estudo, as características ambientais dos locais de construção desses monumentos, resultados de caracterização dos materiais e o histórico de ações realizadas nos monumentos (por exemplo: inspeção, monitorização, reparação). No que se refere à caracterização ambiental, os dados inseridos incluem informação meteorológica e de poluição atmosférica, e em alguns casos características do solo e da água. O utilizador poderá aceder à informação ambiental registada na região em que se encontra localizado o monumento ou aceder aos registos locais associados a um determinado elemento desse monumento. Os dados de caracterização do material incluem características químicas, mineralógicas, microestruturais, físicas e mecânicas, sendo ainda possível indicar as características de eventuais sistemas de proteção. Esta Base de Dados foi preparada para facilitar a análise de dados, nomeadamente com a possibilidade de representações gráficas, filtros diversos e possibilidade de exportação de dados em diferentes formatos [Santos Silva et al., 2018].

Conclusões

Neste artigo apresentou-se a metodologia de caracterização de revestimentos à base de cal, ilustrando com alguns exemplos de estudos em Portugal o tipo de informação que é obtida e que servirá de base para o estabelecimento de recomendações para uma adequada preservação e conservação desses materiais. No final é ainda abordada a base de dados DB-HERITAGE, uma ferramenta que visa criar um espaço de informação sobre as características e o desempenho de materiais de construção históricos, onde é possível aceder aos dados de caracterização de amostras provenientes de monumentos e edifícios em Portugal com valor histórico e patrimonial.

Agradecimentos

O autor agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo seu apoio através do projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial, e também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) pelo seu apoio através do projeto DUR-HERITAGE - Durabilidade e caracterização de materiais com interesse histórico.

Bibliografia

Adriano, P., Santos Silva, A. (2006). Caracterização de argamassas antigas da Igreja de Santa Maria de Évora - Sé Catedral de Évora. Relatório 59/06 – NMM, Lisboa: LNEC, 86 p.

Adriano, P., Santos Silva, A. (2006). Caracterização de argamassas do período romano e árabe da Vila de Mértola, Relatório 200/06 – NMM, Lisboa: LNEC, 59 p.

Adriano, P.; Cruz, T.; Santos Silva, A.; Veiga, M. R.; Candeias, A.; Mirão, J. (2007). Mineralogical comparison study of old mortars from Southern Portugal Cathedrals (Évora and Elvas). In IV International Materials Symposium - A Materials Science Forum, Porto, 5 pp.

Adriano, P.; Santos Silva, A.; Veiga, M. R.; Mirão, J.; Candeias, A. (2009). Microscopic characterisation of old mortars from the Santa Maria Church in Évora. Materials Characterization. 62, pp. 610-620.

Almeida, L.; Santos Silva, A., Veiga, M. R., Mirão, J. (2017). Characterization of renders from buildings awarded with Lisbon's Valmor prize of architecture (1902 – 2002). State of conservation and contributions for preservation, 3rd International Conference on Protection of Historical Constructions, IST, Lisbon, 12 pp.

Cruz, T., Santos Silva, A. (2006). Caracterização de argamassas da Igreja de Nossa Sr.^a da Assunção (Elvas) e do castelo da Amieira do Tejo (Nisa), Relatório 215/06-NMM, Lisboa: LNEC, 113 pp.

Elsen, J., Brutsaert, A., Deckers, M., Brulet, R. (2004). Microscopical study of ancient mortars from Tournai (Belgium). Materials Characterization, Vol. 53, pp 289 – 294.

EN 16085 (2012). Conservation of Cultural property - Methodology for sampling from materials of cultural property - General rules, CEN, 8 p.

Faria Rodrigues, M. P., Henriques, F. & Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation, Journal of Cultural Heritage, Vol. 9, pp. 338-346.

Freire, M. T.; Santos Silva, A.; Veiga, M. R.; Brito, J.; Schlütter, F. (2016). Natural or Artificial? Multi-Analytical Study of a Scagliola from Estoi Palace Simulating Imperial Red Porphyry, Microscopy and Microanalysis, Vol. 22, Issue 6, pp. 1281-1303

Freire, M. T. (2016). Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: characterization and development of compatible gypsum-based products, PhD Thesis in Civil Engineering, IST – Lisbon University, 399 pp.

Groot, C.; Bartos, P. & Hughes, J. (2000). Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair, Proceedings of the 12th International Brick/Block Masonry Conference, Madrid, pp. 815-827.

Magalhães, A. C., Veiga, M. R., Santos, C. P.; Matias, L., Vilhena, A. (2008). Methodology for diagnosis of rendering anomalies due to moisture in walls, Conservar Património, N.º 7, pp. 45-54.

Palma, Maria de Fátima (2009). Arqueologia Urbana na Biblioteca Municipal de Mértola (Portugal) – Contributos para a História Local, Tese de Mestrado, Universidad de Huelva, 134 p.

Pinto, I. V.; Magalhães, A. P.; Brum, P. (2014). Ruínas Romanas de Tróia: a valorização de um património singular, Musa, 4, pp. 29-40.

Pinto, I. V.; Magalhães, A. P.; Brum, P. (2016). Tróia na antiguidade tardia, in A Lusitânia entre Romanos e Bárbaros, Coord. José D'Encarnação, M. Conceição Lopes, Pedro C. Carvalho, Mangualde, pp. 309-333.

Ricardo, J. M.; Santos Silva, A. (2005). Caracterização de Argamassas Romanas, Relatório 28/05 – NMM, Lisboa: LNEC, 95 p.

Riccardi M.; Lezzerini M.; Caro F.; Franzini M.; Messoga B. (2007). Microtextural and microchemical studies of hydraulic ancient mortars: Two analytical approaches to understand pre-industrial technology processes. *Journal of Cultural Heritage*. 8, pp. 350-360

Salema, S.; Proença, N.; Cardoso, I. (2008) Conservação dos rebocos históricos na Igreja de Nossa Senhora da Assunção em Elvas, *Conservar Património*, Nº 8, pp. 39-47.

Santos Silva, A. (2002). Caracterização de argamassas antigas – Casos paradigmáticos. *Cadernos de Edifícios Nº 2 – Revestimentos de paredes em edifícios antigos*, LNEC, pp. 87-101.

Santos Silva, A.; Paiva, M.; Ricardo, J.; Salta, M.; Monteiro, A. M.; Candeias, A.E. (2006). Characterisation of roman mortars from the archaeological site of Tróia (Portugal), In *Materials Science Forum*, Vols. 514-516, pp. 1643-1647.

Santos Silva, A.; Candeias, A.E.; Pais, A. C.; Nogueira, P. M. (2005). Caracterização de argamassas do conjunto monumental do castelo de Viana do Alentejo, *Conservar Património*, Nº 1, pp. 21-32.

Santos Silva, A.; Ricardo, J.; Salta, M.; Adriano, P.; Mirão, J.; Candeias, A. E.; Macias, A. (2006). Characterization of Roman mortars from the historical town of Mértola. *Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation*, Vol. I, Madrid, pp. 85-90.

Santos Silva, A.; Veiga, M. R.; Correia, M. J.; Amaral, J. L. (2018) Revestimentos com base em cal em monumentos de interesse histórico e patrimonial: Exemplos do repositório DB-HERITAGE, *Libro de Actas VI Jornadas FICAL - Tradição, versatilidade e innovación en la cal: un material de excelência*, Pamplona, 28-30 de mayo de 2018, pp. 27-38.

Veiga, M. R.; Aguiar, J.; Santos Silva, A.; Carvalho, F. (2001). Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. *Proceedings of the 3rd International Seminar Historical Constructions*, Guimarães, Universidade do Minho, pp. 353-362.

Veiga, M. R. (2003). As argamassas na conservação, *Actas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes*, Aveiro, Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. R., Aguiar, J., Silva, A. & Carvalho, F. (2004) Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos, *Coleção Edifícios (CED)*, Vol. 9, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. R., Fragata, A., Velosa, A. L., Magalhães, A. C. & Margalha, G. (2010), Lime-based mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings, *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 4 No. 2, pp. 177-195.

Veiga, M. R.; Santos Silva, A.; Tavares, M.; Santos, A. R.; Lampreia, N. (2013). Characterization of renders and plasters from a 16th Century Portuguese Military Structure: Chronology and durability. In *Restoration of Buildings and Monuments*. Vol. 19, n. 4, pp. 223–238.

Veiga M. R. (2012). Conservation of Historic Renders and Plasters: From Laboratory to Site. In: Válek J., Hughes J., Groot C. (eds) *Historic Mortars*. RILEM Bookseries, Vol 7. Springer, Dordrecht, pp 207-225.

Velosa, A.; Coroado, J.; Veiga, M. R.; Rocha, F. (2007). Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair, *Materials Characterization*, Vol: 58 (11-12) pp: 1208-1216.

Caracterización de los morteros históricos del puente de Trillo (Guadalajara)

Pablo Guerra García ⁽¹⁾, David Sanz Arauz ⁽²⁾, Antonio Batanero Nieto ⁽³⁾, Juan Carlos Batanero

Nieto ⁽³⁾, Israel J. Alcón García ⁽³⁾

(1) Universidad Politécnica de Madrid. p.guerra.garcia@gmail.com

(2) Universidad Politécnica de Madrid. david.sanz.arauz@upm.es

(3) ABN Patrimonio. abnpatrimonio@gmail.com

Resumen

En el año 2014 el ayuntamiento de Trillo se propuso realizar el estudio completo del puente de Trillo sobre el río Tajo, obra del s. XVI, y una de las obras públicas históricas de mayor relevancia en la provincia de Guadalajara. Se trata de una pieza con múltiples etapas constructivas y varias restauraciones, con una conservación compleja dado su estado patológico y su uso. Es por ello que la empresa de arqueología ABN Patrimonio, junto con la Universidad Politécnica de Madrid, desarrollaron un estudio sobre el estado del puente, que incluía el análisis de los morteros, a la par que se desarrollaban otros trabajos arqueológicos. Se tomaron un total de 14 muestras de morteros del puente de acuerdo con las especificaciones del equipo de arqueología añadiendo, además, muestras de algunas estructuras cercanas. Los análisis, que se efectuaron en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura y en el CAI de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, comprenden un estudio mediante esterero-microscopía, difracción de rayos X, microscopía óptica de luz polarizada y microscopía electrónica de barrido con microanálisis.

Los resultados permitieron elaborar una tabla tipológica de morteros que recababa información sobre los conglomerantes empleados, los áridos, las dosificaciones e incluso algunas evidencias de los deterioros que estaban sufriendo las argamasas. También se identificaron microorganismos, diversidad en las dosificaciones, consistencias y tamaños variadas, etc. A partir del procesado conjunto de la información histórica, arqueológica y de los análisis químicos y mineralógicos se propuso un nuevo mortero para la intervención en obras de restauración, que fuera compatible con los materiales históricos del puente y su estado de conservación.

Esta investigación confirma el valor de los trabajos multidisciplinares en el campo del patrimonio cultural. No solo son necesarios desde el punto de vista de un mayor y más profundo conocimiento del pasado, sino de cara a la prevención y conservación de sus restos.

Palabras clave: caracterización, morteros históricos, puente, cal.

Introducción

El puente sobre el río Tajo en Trillo es obra del siglo XVI, aunque por el estudio histórico realizado, sabemos que hubo en el mismo punto, otro anterior de madera (*Estudios previos arqueológicos en el puente sobre el río Tajo en Trillo, Guadalajara*, dirigido por Antonio Batanero Nieto, Juan Carlos Batanero Nieto, Israel Jacobo Alcón García y con expediente de Cultura nº 14.1192). Además, en la base de la orilla izquierda, se aprecia un resto que podría pertenecer a una cimentación anterior. Está realizado íntegramente en sillería en sus alzados, y con una fuerte matriz de cal y canto en el interior. Se compone de un gran arco ligeramente carpanel que cubre un vano total de 20,283 metros. La altura desde la clave al nivel medio del río es de aproximadamente de 9,5 metros (Figuras 1 y 2).

El puente actual es resultado de una reforma realizada a principios de s. XX, en la cual se ampliaron los laterales de la calzada de aguas arriba, construyendo unos sobre estribos que descansan en los del s. XVI. En aquella obra también se elevaron los lomos del puente en cada orilla, suplementando en los laterales con bloques de piedra arenisca tallados en hiladas trapezoidales. También se sustituyó el pretil de piedra que había por una barandilla metálica, que quedó anclada sobre una línea de impostas que ha hecho las veces de acera para los peatones.

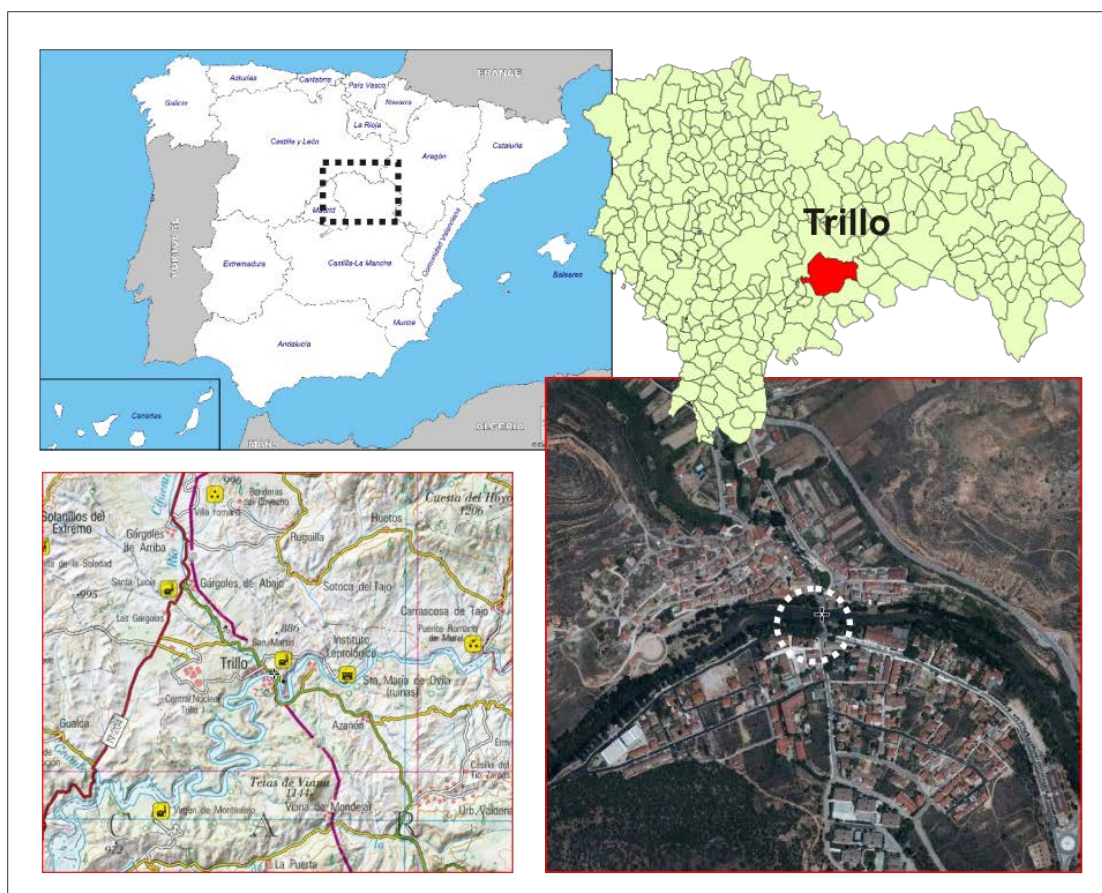


Figura 1: Emplazamiento del puente de Trillo, en la provincia de Guadalajara. Fuente: GoogleMaps.

Se conservan, de la Guerra Civil, dos oquedades sobre los estribos de aguas abajo, cuyo objetivo era el de alojar los explosivos para derruir el puente. Cosa que no llegó a producirse, pero que ha servido para que en este estudio se pudieran tomar muestras del alma de la edificación. De la fase anterior se conserva una postal en la que se aprecia el mencionado pretil, pero no era esa la estampa original del puente del siglo XVI, sino el resultado de la reparación realizada en 1826 por el Obispo de Sigüenza, sobre los restos de la voladura de la parte central del arco en el año 1810, durante la Guerra de la Independencia (Pérez Bodega, 1986).

En cuanto a la intervención arqueológica, consistió en cuatro sondeos de 2 x 1 m practicados de la siguiente manera: dos en la base del parapeto de aguas abajo, sobre el relleno de los estribos del s. XVI; uno en la base del muro de ampliación de principios de s. XX, en la orilla izquierda; y el último en la calzada, en la parte de unión entre el puente antiguo y el relleno de la estructura de ampliación de la calzada.

Para el asunto que nos ocupa, los sondeos más interesantes son los A y B, sobre los estribos del s. XVI. En ellos se tomaron algunas de las muestras del mortero de cal analizado. En éstos además se aprecian varios rellenos intencionados con el objeto de sembrar de jardín la superficie de los estribos. Capa de tierra que está transmitiendo humedad a los paramentos de sillería arenisca, y que por capilaridad está afectando a la piedra, con formación de eflorescencias, arenización, etc.



Figura 2: Detalle del puente desde aguas arriba y abajo (izquierda) y algunas instantáneas históricas (derecha). Fuente: ABN Patrimonio.

Metodología

Toma de datos y muestras

El procedimiento se inició con una exhaustiva documentación fotográfica de los puntos de muestra, contando con el trabajo y la ayuda de la dirección arqueológica, la cual facilitó la documentación fotogramétrica del puente (Figura 3). Tras el fotografiado de las zonas de muestreo, se retiraron los morteros pertenecientes en su mayoría a llagueados entre sillería. A la par, se fotografió tanto el proceso del muestreo como las muestras en sí, una vez extraídas. En total fueron trece muestras de aproximadamente 40/50 gramos cada una.

La extracción de las muestras se llevó a cabo por el equipo de investigación, siguiendo los estándares establecidos por los organismos internacionales, por algunas instituciones académicas internacionales y por recientes tesis doctorales defendidas (Bartos *et al.* 2000; (Elsen, 2006; Miriello, 2010; Guerra García, 2015), de tal forma que se ha respetado todo lo posible el estado de conservación de los paramentos originales. Además se buscaron puntos lo suficientemente ocultos para que el impacto visual fuese mínimo también, a la vez que se seleccionaban las muestras más representativas de la estructura (Tabla 1). Tras la extracción, no se procedió a la sustitución de los morteros por otro tipo de material. Este proceso de muestreo se encuentra bien documentado en otros trabajos publicados y que han sido consultados previamente (Boscheti *et al.* 2008; Hughes y Callebaut, 2000; Mertens *et al.* 2009).

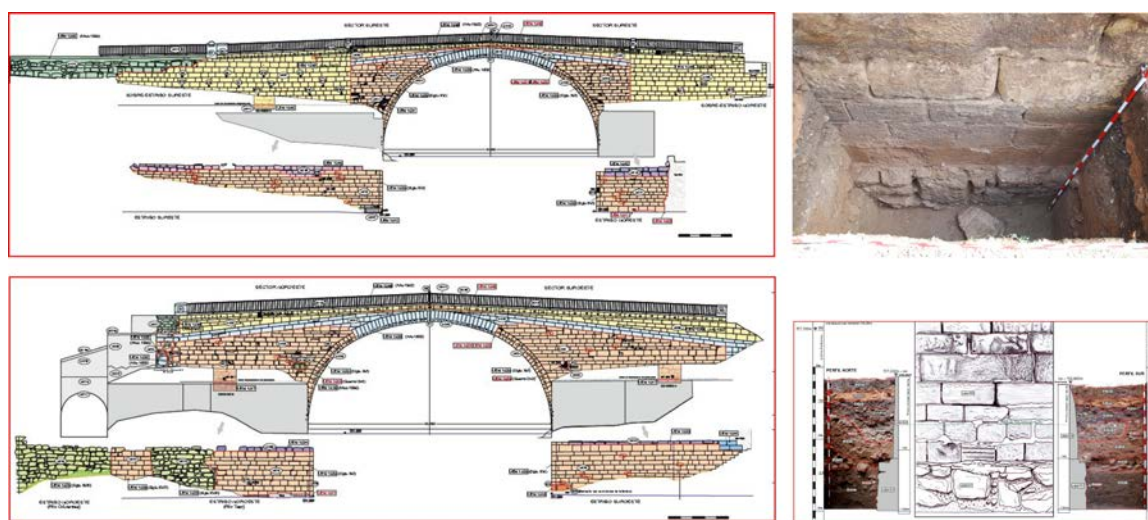


Figura 3: Lectura de paramentos del puente y columna estratigráfica del sondeo B, en el que se tomaron algunas muestras de mortero. Fuente: ABN Patrimonio.

En líneas generales las muestras corresponden a morteros de áridos silíceos de origen fluvial, poco troceados en donde destacan a simple vista, cuarzos y micas. Todos ofrecen un aspecto limpio, consistente al tacto y con tamaños finos. Algunas muestras sí sufren algún desprendimiento al tacto, probablemente por el exceso de humedad (muestras próximas al río).

Tabla 1: Resumen de las muestras analizadas y su localización.

Muestra	Ubicación	Muestra	Ubicación
PTR1	Parapeto, aguas abajo	PTR8	Contrafuerte lateral, aguas abajo
PTR2	Parapeto, aguas abajo	PTR9	Contrafuerte lateral, aguas arriba
PTR3	Parapeto, aguas abajo	PTR10	Contrafuerte lateral, aguas arriba
PTR4	Parapeto, aguas abajo	PTR13	Arranque de arcada, intradós de arco
PTR5	Parapeto (detonación), aguas abajo	PTR14	Arranque de arcada, intradós de arco
PTR6	Parapeto (detonación), aguas abajo	PTR15	Arranque de arcada, intradós de arco
PTR7	Parapeto, aguas abajo	Las muestras PTR11 y PTR12 corresponden a sedimentos.	

Macroscopía

La macroscopía trata de localizar e identificar de forma visual, todos los componentes que forman parte del material, tanto orgánico como inorgánico, determinando su interacción, su ordenamiento y su distribución (Doebly y Spitzer, 1996). En esta fase se pueden determinar los componentes pero también la relación entre ellos, el estado de conservación y los patrones constructivos. Los ensayos macroscópicos destacan por el uso del estéreo-microscopio que, a diferencia del microscopio, permite una visión del material por reflexión, facilitando ver los objetos de forma natural ampliada hasta determinados aumentos. La observación es generalmente del conjunto, principalmente debido a la amplitud del campo de visión. La visión estereoscópica, o también llamada sensación de relieve, se consigue cuando cada ojo recibe imágenes con distintos planos del objeto.

Esta fase se centra en conocer los materiales constructivos de cara la restauración de edificios históricos o para la identificación de los componentes visuales. Permite, entre otras cosas, identificar la distribución de los áridos, los cuales pueden estar dispersos de forma más o menos ordenada. Esta ordenación se puede catalogar en función de la orientación, el tamaño o la concentración/dispersión de las arenas, los granos cerámicos, etc. (Alejandre Sánchez *et al.* 2004; Ingham 2010).

Difracción de rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido

En este caso, por un lado, se han empleado las técnicas de DRX con el método del polvo cristalino, con una semicuantificación a partir de los poderes relectantes de los componentes más representativos, según el método de Chung a partir de las tres direcciones planos cristalográficos (*hkl*) de mayor intensidad, así como Microscopía Electrónica de Barrido por Microanálisis.

Las condiciones experimentales y de los equipos han sido:

Difractómetro Bruker D8 Advancer, trabajando según una geometría Bragg-Bentano, provisto de una fuente de rayos X con un ánodo de cobre de alta estabilidad y con un detector energía dispersiva SOL-X. Las mediciones se han efectuado en un rango de 2 a 50° 2θ con un tiempo de paso de escaneo de un segundo, el ángulo de divergencia se limitó a 0,02° 2θ.

El software empleado para la adquisición, proceso y evaluación de datos ha sido el EVA DIFFRACplus. Para la Microscopía Electrónica de Barrido se ha empleado un equipo JEOL JSM-

820 con microanálisis asociado, dotado de un detector de electrones secundarios y un software Oxford ISIS-Link.

Resultados

Caracterización macroscópica

En primer lugar, y relativo a los componentes que se han localizado, se podría decir que todas las argamasas presentan áridos de origen fluvial. En líneas generales se presentan los cuarzos, feldspatos y micas poco troceados y seleccionados, así como ofrecen un aspecto limpio y un tamaño pequeño (posible selección), poco o nada aristados y acompañados por fragmentos de cuarzos de mayor tamaño en la muestra PTR8. Además argamasas presentan una textura muy uniforme, propia de una mezcla aceptable (Figura 4). Los nódulos de cal que se han identificado responden a efectos posteriores propios de la recarbonatación, generando cierta pérdida de cohesión vinculada con la absorción en exceso de humedad. Es más evidente en las muestras PTR5, PTR7 y PTR9. Caso aparte son las muestras PTR13, PTR14 y PTR15, en donde la cal queda prácticamente disgregada por la saturación de agua.

En cuanto al estado de conservación y características básicas de la mezcla, en líneas generales habría que diferenciar tres tipos de muestras en función de la consistencia: por un lado, las muestras que presentan un aspecto consistente e incluso robusto (PTR6); muestras que presentan un aspecto consistente aunque con cierta disgregación de los áridos (PTR1, PTR2, PTR3, PTR4, PTR6, PTR7, PTR8 y PTR10); y muestras que presentan un aspecto poco consistente (PTR5, PTR9, PTR13, PTR14 y PTR15).

Las muestras PTR5 y PTR9 reaccionan de forma muy endeble incluso al tacto, como consecuencia del deterioro gradual que sufren por el exceso de humedad absorbida. Este efecto genera la aparición de alteraciones, mucho más profundas, así como la pérdida de material (especialmente de los áridos). No obstante el estado de conservación de las muestras es, en líneas generales, aceptable a pesar de la presencia de humedad en todas las mezclas.

En cuanto a la distribución de los áridos, las muestras analizadas presentan un aspecto relativamente ordenado y con unas dimensiones de grano reducidas, con la excepción de la muestra PTR8, en donde el mortero es un hormigón por la presencia de áridos de más de 3 mm de diámetro (gravas). En todas las muestra es predominante la heterometría de los granos, con unas dimensiones pequeñas en líneas generales.

Desde el punto de vista de la técnica de fabricación de argamasas, las muestras tomadas del puente de Trillo no presentan muchas diferencias con respecto a otras fábricas documentadas del mismo periodo. Estos morteros, denominados *de juntas*, solían ser de diversos tipos y dosificaciones, reproduciendo en la mayoría de las veces viejos modelos procedentes de oficiales y artesanos de época romana (Adam, 1996; Ambròs i Monsonís, 2000; MacKay, 1975).

En cuanto al estado de conservación se han documentado los deterioros habituales en estructuras de este tipo, relacionados en su mayoría con el exceso de humedad o la ausencia de ventilación, sobre todo en los morteros inferiores, cercanos al curso fluvial o por debajo de la capa vegetal. Todos ellos están bien estudiados y se conocen tanto las causas como las consecuencias (Magalhaes y Veiga 2009; Sabbioni *et al.* 2002), así como los procedimientos necesarios para su restauración (Arioglu y Acun, 2006).

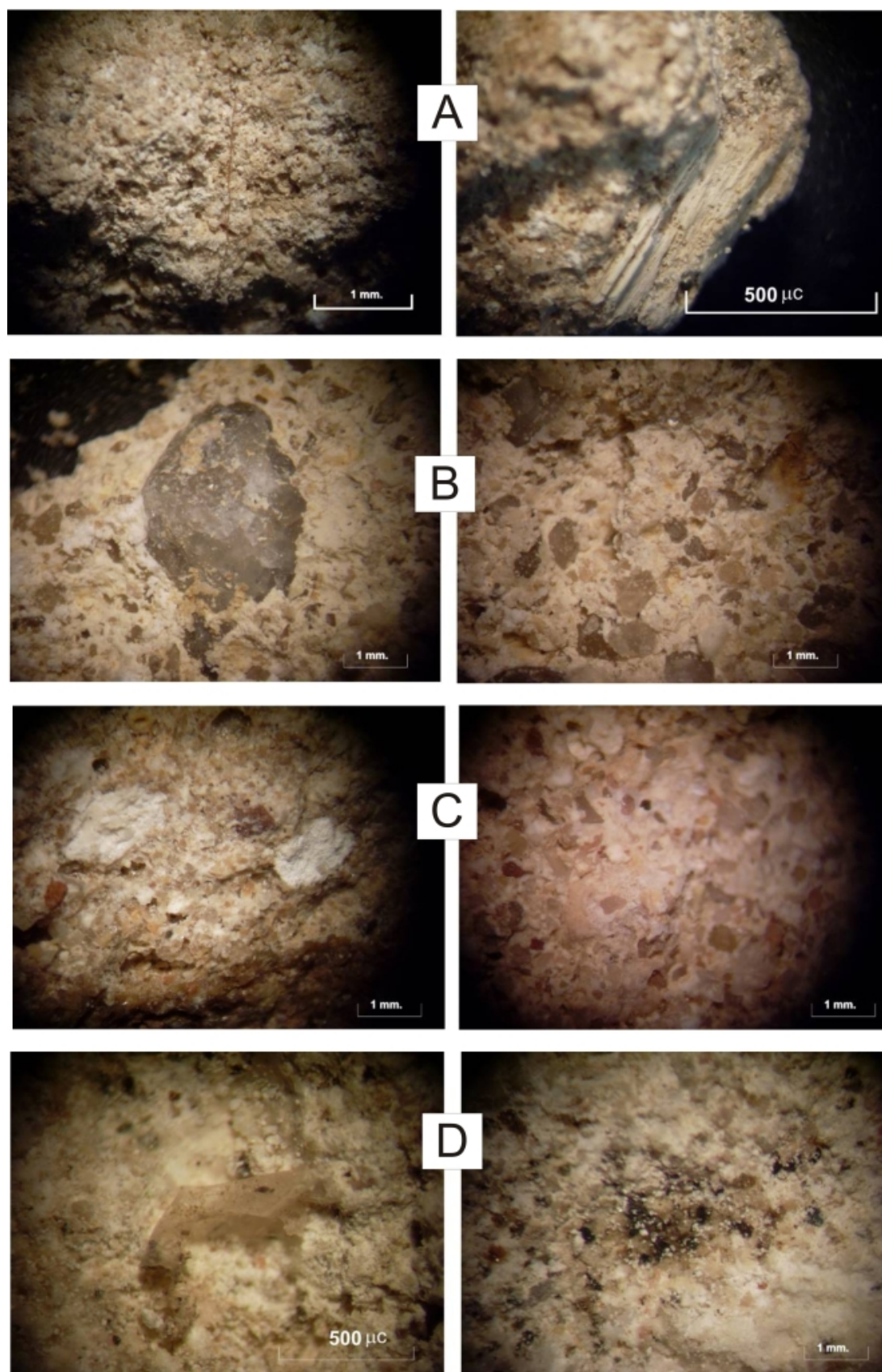


Figura 4: Imágenes de la caracterización macroscópica de diversas muestras: A) PTR1; B) PTR8; C) PTR10; y D) PTR14.

Caracterización mineralógica

Los diagramas obtenidos muestran una mineralogía similar, aunque se han identificado algunas variaciones que nos permiten agrupar las muestras en varios tipos composicionales (Tabla 2).

Un primer grupo lo constituyen las muestras PTR1, PTR2, PTR3 y PTR4, en los que se ha identificado en todos ellos la presencia de dolomita, con un porcentaje en torno al 5-6%.

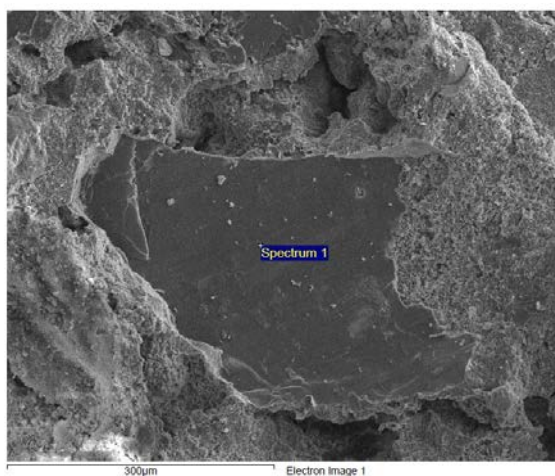
Las muestras PTR5 y PTR6, se diferencian de las anteriores en que no se han encontrado restos de dolomita, lo cual lleva a pensar que se trata de un mortero con un tipo de cal distinta. Estas muestras además se ven afectadas por sales, en especial la muestra PTR6 en la que se han detectado cloruros.

La muestra PTR7 es un caso especial, con un alto contenido en cal y con una matriz calcítica muy cerrada en su vista de microscopio electrónico, lo que lleva a pensar en una elaboración especialmente cuidada para este mortero. Tampoco se detecta dolomita en su composición. En el microscopio electrónico se observan nódulos que podrían corresponder a óxidos de calcio sin hidratar, procedentes de un apagado irregular.

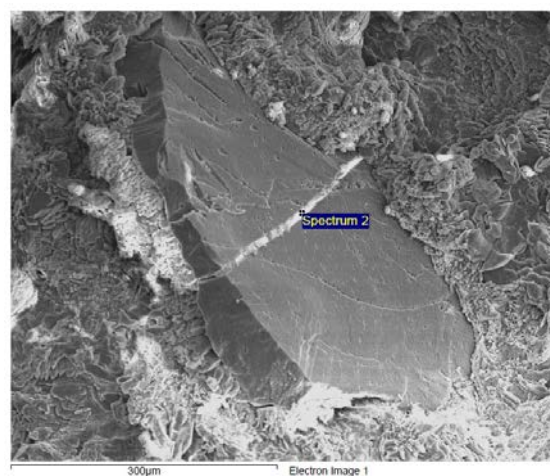
Por otra parte las muestras PTR8, PTR9 y PTR10 son muestras en las que se identifica una proporción significativa de yeso. En todas estas muestras se observan compuestos de alteración mineral. La muestra PTR9 tiene varias colonias de organismos biológicos con minerales de neoformación o bacterias. La dosificación de la muestra PTR10 es más homogénea que en las otras dos (Figura 5).

Las muestras PTR13, PTR14 y PTR15 tienen una importante presencia de yeso, en especial la PTR14. En la muestra PTR13 se identifican colonias de posibles diatomeas (restos biológicos de composición silíceo).

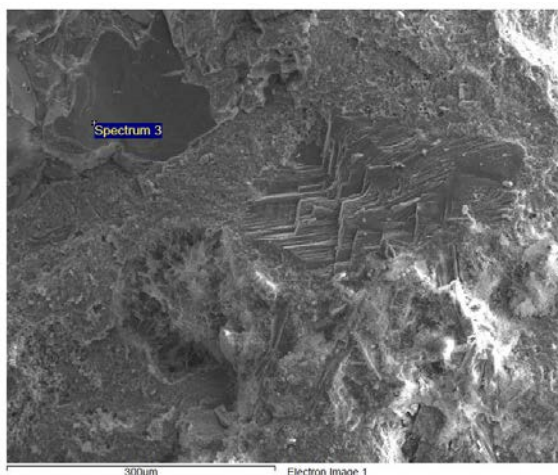
PTR1, Spectrum 1



PTR10, Spectrum 2



PTR7, Spectrum 3



PTR14, Spectrum 1

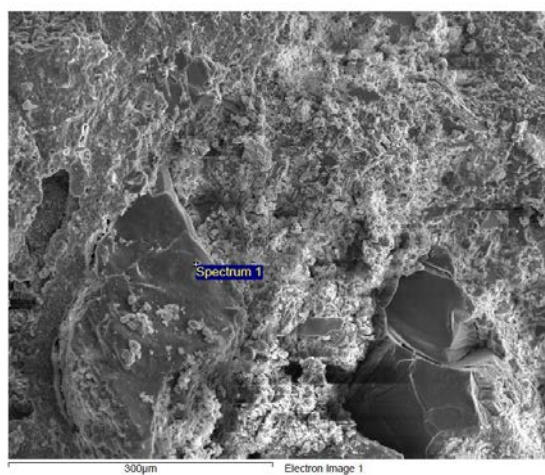


Figura 5: Serie de resultados de la microscopía electrónica de barrido en algunas muestras.

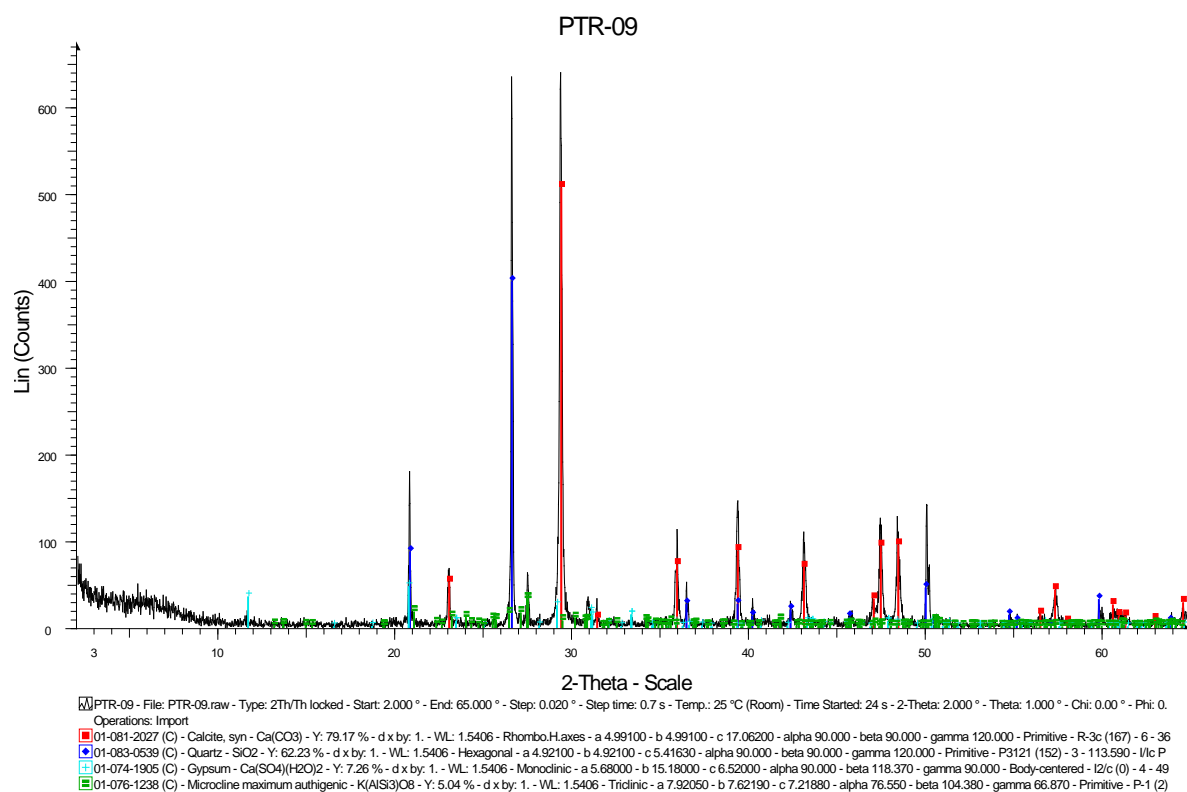


Figura 5: Difractograma de la muestra PTR9.

Conclusiones

En líneas generales las muestras analizadas presentan un buen estado de conservación, a excepción de las muestras PTR5 y PTR9, en donde la ausencia de sustitución y reemplazo de los

materiales de restauración ha generado un deterioro químico de los áridos y del conglomerante. La muestra PTR2 se ha fabricado con un árido muy lavado.

Los áridos documentados corresponden a arenas de carácter fluvial, en donde predominan los cuarzos, los feldspatos, y las micas. Los nódulos se concentran en los alrededores de los poros, en las fisuras y especialmente, en el contacto con las alteraciones de las muestras. Estas alteraciones, junto a las fisuras, generan mucha pérdida de material en los áridos en todas las muestras analizadas. La falta de adhesión con el conglomerante genera a su vez la presencia de bio-ataques y nuevas nodulaciones, lo que facilita de nuevo la acumulación de humedad y de nuevo, falta de adherencia en el conglomerante y pérdida de árido. La muestra PTR6 es la que conserva un mejor estado, pese a pertenecer a los cimientos del puente.

Como conglomerante se ha empleado una cal bien decantada en general, con un aspecto limpio (sin presencia de arcillas ni cerámicas) en la matriz de las muestras. Y un mortero de cal y yeso en las muestras procedentes del puente lateral.

Las muestras se pueden agrupar en cinco grupos composicionales: PTR1, PTR2, PTR3 y PTR4 (cal y arena con impurezas dolomíticas); PTR5 y PTR6 (cal y arena); PTR7 (muestra única, mortero de cal y arena muy rico); PTR8, PTR9 y PTR10 (cal y arena, con yeso, muy alteradas); y PTR13, PTR14, PTR15 (mortero de cal y yeso con arena).

Agradecimientos

Nuestro sincero agradecimiento a Sol López Andrés, responsable del Centro de Ayuda a la Investigación y catedrática de Cristalografía de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, así como a los arquitectos Daniel Ximénez de la Torre y Luis Aguilar Romanos, y al Excmo. Ayuntamiento de Trillo (Guadalajara), por la confianza depositada en este equipo.

Bibliografía

Alejandro Sánchez, F.J.; Enríquez Díaz, C.; Martín del Río, J.J.; Flores Alés, V. (2004). Restauración de un mosaico romano: caracterización y análisis constructivo". *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, XII (51). Sevilla, Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, 94-101.

Boschetti, C.; Corradi, A. y Baraldi, P. (2008). Raman characterization of painted mortar in Republican Roman mosaics. *Journal of Raman Spectroscopy. Special Issue: Raman Spectroscopy in Art and Archaeology*, III, 39, 8. Wiley Online Library. 1085-1090.

Chung, F. (1974). Quantitative Interpretation of X-Ray Diffraction Patterns of Mixtures. I. Matrix-Flushing. Method for Quantitative Multicomponent Analysis. *Journal of Applied Crystallography*, 519-25.

Chung, F. (1974). Quantitative Interpretation of X-Ray Diffraction Patterns of Mixtures. II. Adiabatic. Principle of A-Ray Diffraction analysis of mixture. *Journal of Applied Crystallography*, 526-31.

Doebley, C. E. y Spitzer, D. S. (1996). Guidelines and standards for testing historic mortars". Kelly, S.J. (ed.). *Standards for preservation and rehabilitation*. Filadelfia, American Society for Testing Materials, 285-293.

Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars: a review. *Cement and Concrete Research, Actas del X Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, June 21-25, 2005, University of Paisley*, 36, 8. Elsevier. 1416-1424.

Guerra García, P. (2015). *Sola Romani. Morteros hidráulicos romanos en la península Ibérica*. Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/40096/>. Último acceso 11/05/2018.

Hughes J. y Callebaut, K. (2000). Practical sampling of historical mortars. Bartos, P.; Groot, C. y Hughes, J. J. (eds.). *Proceedings of the RILEM International Workshop Historic Mortars: characteristics and tests*. Cachan, Paisley, RILEM, 17–26.

Ingham, J. (2010). *Geomaterials under the microscope*. Manson, CRC Press.

Mertens, G.; Elsen, J.; Brulet, R.; Brutsaert, A.; Deckers, M. y Fernandes, I. (2009). Quantitative composition of ancient mortars from the Notre Dame Cathedral in Tournai (Belgium). *Conférence: Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMABM), Porto. Materials Characterization, A, 60, 7*. Elsevier, 580-585.

Miriello, D. (2010): Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science*, 37, 9. Elsevier, 2207-2223.

Pérez Bodega, A. (1986). *Guía y notas para la historia de Trillo (Guadalajara)*. Trillo, Editorial Ayuntamiento de Trillo.

Estuques Maneiristas de uma Igreja de Lisboa: Caracterização Material e Técnica

Maria Teresa Geraldês Freire⁽¹⁾, António Santos Silva⁽²⁾, Maria do Rosário Veiga⁽³⁾

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil e CERIS, Portugal, mtfreire@lnec.pt

(2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, ssilva@lnec.pt

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, rveiga@lnec.pt

Resumo

A igreja do convento de S. Domingos de Benfica, em Lisboa, exibe um dos raros exemplares de estuques maneiristas da primeira metade do século XVII que sobreviveram ao terramoto de 1755.

Estudos no âmbito da História da Arte realçam a sua beleza e qualidade estética e apontam para a origem das influências por detrás da concepção do programa decorativo.

Uma intervenção recente no teto do retro-coro da igreja proporcionou a recolha de um conjunto representativo de amostras pertencentes aos diversos tipos de elementos decorativos, tendo-se procedido à sua caracterização mineralógica, química e física.

Os resultados obtidos, apresentados neste trabalho, foram comparados com um vasto conjunto de resultados de caracterização de estuques dos séculos XVIII a XX, revelando diferenças significativas entre os materiais e técnicas utilizadas na sua execução e os dos períodos subsequentes, nomeadamente o uso de argamassas de cal e mármore nas camadas de acabamento, em vez de cal e gesso, como ocorreu em Portugal a partir do séc. XVIII. A análise comparativa efetuada contribuiu, ainda, para aprofundar o modo como os materiais e as técnicas se foram adaptando à evolução das formas na arquitetura, ao longo de um período de 3 séculos.

Palavras-chave: Caracterização de materiais; Estuques maneiristas; Técnicas de cal; Revestimentos decorativos

Introdução

A igreja de Nossa Senhora do Rosário, antiga igreja do convento de S. Domingos de Benfica, nome pelo qual continua a ser conhecida, foi construída entre 1624 e 1632. Trata-se de um exemplar raro de arquitetura religiosa maneirista, sendo uma das poucas igrejas de Lisboa que não sofreu danos significativos com o terramoto de 1755.

De planta em cruz latina, tem o coro situado para além do retábulo do altar-mor, designando-se, por isso de retro-coro (Figura 1a). Tanto a igreja como o retro-coro apresentam abóbadas de berço totalmente decoradas com estuques maneiristas, constituídos por elementos almofadados mais simples, na primeira, e por cartelas com enrolamentos e bandas furadas,

alternando com medalhões quadrados, na segunda (Figura 1b). Nas paredes do retrocoro destacam-se cartelas flamengas de grandes dimensões e volumetria acentuada, também com enrolamentos e bandas furadas (Figura 1c) (Mendonça, 2009).

No interior da Igreja merecem, ainda, destaque os painéis de azulejos figurativos, o retábulo-mor, os altares de talha maneirista, esculturas e telas pintadas de elevado valor, bem como a lápide que indica a sepultura de Frei Luís de Sousa e o túmulo de João das Regras, duas figuras relevantes da História de Portugal (“Igreja Nossa Senhora do Rosário,” n.d.).



Figura 1 – Retro-coró da Igreja de S. Domingos de Benfica: (a) vista para o altar-mor, com nave da igreja por trás; (b) pormenor dos estuques maneiristas do teto; (c) cartela das paredes laterais (imagens cedidas por Marco Aurélio)

Em outubro de 2017, o teto do retro-coró sofreu uma intervenção de conservação e restauro urgente devido ao risco de colapso de alguns elementos, altura em que se recolheram as amostras em estudo. Os ensaios realizados permitiram caracterizar os materiais que constituem as diversas camadas e elementos dos painéis decorativos, bem como as técnicas utilizadas aquando da sua execução. Os resultados obtidos, bem como as diferenças encontradas relativamente aos estuques Portugueses dos séculos XVIII a XX, são apresentados neste artigo.

Trabalho experimental

Materiais

Foi recolhido um conjunto de 6 amostras, representativo dos diversos tipos de elementos decorativos pertencentes a ornatos da abóbada do retro-coró (Figura 2 e Figura 3).

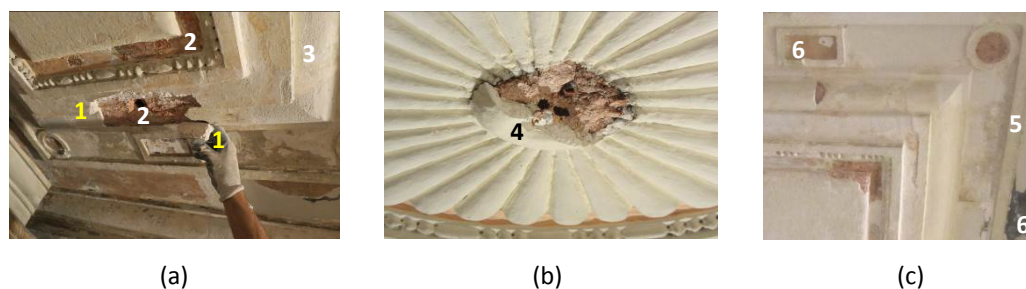


Figura 2- Locais de recolha das amostras: (a) 1, 2 e 3; (b) 4; (c) 2, 5 e 6

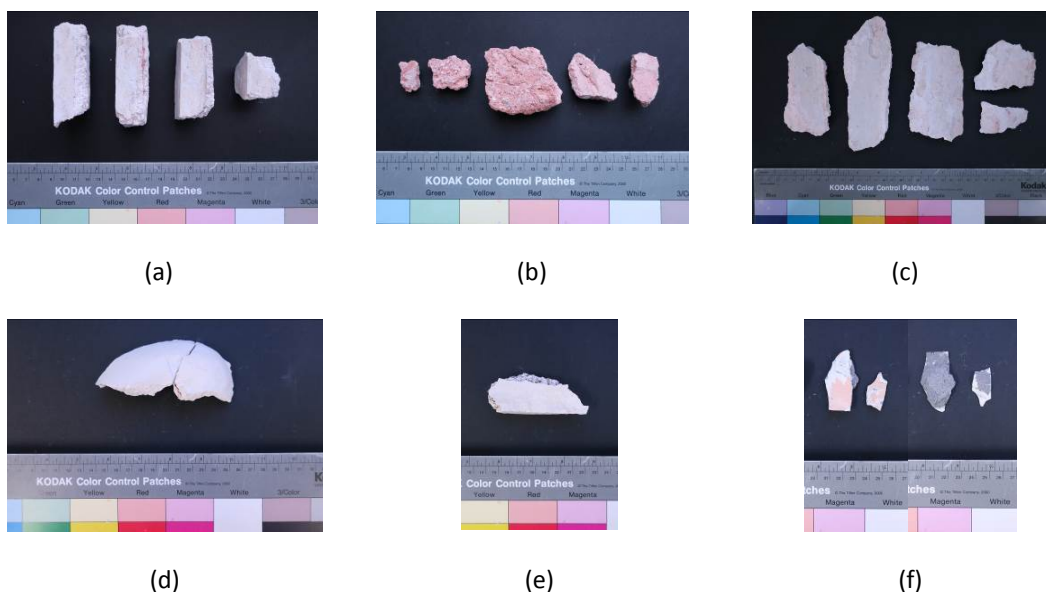


Figura 3 - Amostras recolhidas: (a) 1, vista de perfil; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, frente e tardez

No Quadro 1 é feita a descrição das amostras recolhidas e o registo do seu estado de conservação.

Métodos e técnicas de análise

A análise mineralógica por difratometria de raios-X (DRX) foi realizada em difratómetro Philips X'Pert PW1830, com fonte de radiação $K\alpha$ de cobalto, usando um varrimento entre 10 e 50° (2 θ); velocidade de varrimento de 0,05 °/s; e tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA.

As amostras foram moídas e passadas por um peneiro com abertura de malha de 106 μm , preparando-se assim amostras da fração global e amostras da fração fina, esta última mais rica em ligante e obtida através da cuidadosa separação física do agregado com recurso a um martelo de borracha. Sempre que apresentavam mais de uma camada distinta, este processo foi realizado individualmente, para cada camada.

A fração global de cada amostra foi também analisada num sistema de análise térmica simultânea, termogravimetria com análise térmica diferencial (ATG-ATD), tendo sido utilizada uma termobalança SETARAM modelo TGA92, operando em atmosfera de argón, com velocidade de aquecimento de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C, usando cadinhos de Platina-Ródio de 50 μl de capacidade.

Numa amostra previamente desagregada e separada granulometricamente (peneiros com aberturas de malha de 5,00 mm, 2,50 mm, 1,25 mm, 630 μm , 315 μm , 160 μm e 75 μm) procedeu-se à determinação do teor de agregado calcário usando um ataque ácido seletivo, que consistiu em controlar o tempo de ataque de forma a evitar a solubilização do agregado: 1 minuto para as frações até 315 μm ; 10-20 s para as frações 160 μm , 75 μm e < 75 μm .

Quadro 1: Identificação e descrição das amostras

Identificação da amostra e imagem lupa binocular	Descrição	Estado de conservação
<p>1</p>  <p>1/1</p>	<p>Friso de secção quadrilátera, moldado <i>in situ</i> (Figura 2a, Figura 3a), composto por uma argamassa de enchimento interior (1/1) e uma camada de acabamento muito fina (com cerca de 1 mm, 1/2) em duas das faces. Ambas as massas são brancas e têm agregados de cor muito clara (mármore?). Os agregados aparentam estar presentes em maior quantidade e ter maiores dimensões 1/1. Esta massa não aparenta ter sido muito apertada, apresentando várias fissuras.</p> <p>Tem muitas camadas peliculares à superfície, de cor bege, que resultam da aplicação de sucessivas caiações sobre a 1/2.</p>	Coesa
<p>2</p> 	<p>Argamassa cor de tijolo, usada no enchimento do interior dos caixotões, de frisos e de ornatos volumosos (Figura 2a, Figura 3b). São visíveis fragmentos de tijolo e nódulos de cal com alguns milímetros de diâmetro (2-7 mm).</p> <p>Tem agregados de cor clara (amarelada) e escura (uns cinzentos e outros quase pretos) (Figura 5a).</p>	Coesa
<p>3</p>  <p>3/1</p>	<p>Revestimento de acabamento de frisos e outros elementos volumosos (Figura 2a, Figura 3c), com 4-8 mm de espessura, constituído por 2 camadas (3/1 e 3/2) com as mesmas características das da amostra 1. Verificou-se que correspondiam às mesmas argamassas.</p> <p>Alguns fragmentos têm argamassa de enchimento cor de tijolo aderida ao tardo.</p>	Coesa. Tem manchas de colonização biológica e cheira a bafio.
<p>4</p> 	<p>Parte central dos ornatos das cartelas (Figura 2b, Figura 3d). A maioria destes elementos estava partida e/ou já destacada da base devido à oxidação das peças metálicas que os sustentavam.</p> <p>Massa branca, de textura fina e muito coesa. Não parece ter agregados.</p>	Muito coesa
<p>5</p>  <p>ARG-5</p>	<p>Friso de secção retangular, muito pouco volumoso (Figura 2c, Figura 3e). Constituído por uma argamassa interior pouco densa (ARG-5), bastante friável e com agregados de várias cores (pretos, avermelhados, amarelos claro e alaranjados) (Figura 5c).</p> <p>Tem uma camada de acabamento branca e fina (com cerca de 1 mm espessura), onde se deteta a presença de agregados idênticos aos das amostras 1 e 3.</p>	Camada de acabamento coesa; argamassa interior friável
<p>6</p> 	<p>Revestimento de cor negra usado como base nas superfícies lisas dos ornatos (Figura 2c, Figura 3f), criando um contraste com as volumetrias de acabamento branco, fazendo-as realçar e facilitando a sua leitura a partir do solo.</p> <p>Tem duas camadas aplicadas posteriormente: a primeira, de cor branca e a última (atualmente à vista), de cor salmão. A camada negra só é visível em zonas onde estas camadas se destacaram.</p>	Coesa

Foi usada uma solução de ácido clorídrico 1:20, ou 1:40, a frio, consoante se tratasse de frações acima, ou abaixo, de 160 μm . Após cada contacto com o ácido, seguido de filtração em cadinhos de Gooch e lavagem com água destilada quente, foi feita a avaliação da separação ligante/agregado em cada fração granulométrica, a fim de decidir sobre a necessidade da repetição do procedimento.

Nas amostras com agregado silicioso foi usada uma solução de HCl 1:3, a quente, seguida das mesmas operações de filtração e lavagem com água destilada quente.

A absorção capilar por contacto foi realizada segundo um método adaptado e validado para amostras antigas, de forma irregular e friáveis (Veiga et al., 2004) (Figura 4a). Para a execução do processo de secagem, as amostras foram colocadas com a superfície por onde se deu a absorção virada para cima, tendo-se isolado as restantes faces com uma película de plástico impermeável (Figura 4b).



(a)



(b)

Figura 4 - Ensaio de capilaridade (a) e secagem (b)

Apresentação e discussão de resultados

Análise química e mineralógica

A análise mineralógica por DRX permitiu identificar os compostos cristalinos presentes, nomeadamente do ligante e agregados. Tratando-se de amostras onde o gesso e a calcite são os principais constituintes, foi utilizada análise ATG-ATD para quantificação destes compostos. No Quadro 2 e Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos.

Tal como referido no Quadro 1, após a recolha verificou-se que as amostras 1 e 3 eram idênticas, o que se confirmou pela análise DRX e durante a observação à lupa binocular. Estas amostras foram então preparadas conjuntamente para os vários ensaios de acordo com a maior adequabilidade de cada uma aos procedimentos experimentais utilizados (forma, quantidade disponível, etc.): amostra 1 - ensaios de absorção capilar e secagem; amostra 3 - análise quantitativa (ATG-ATD, resíduo insolúvel). Ambas pertencem a revestimentos constituídos por cal e agregados calcários de elevada pureza, cuja natureza mineralógica não foi determinada. No entanto, tendo em conta a observação visual (Figura 5c) e com base na literatura (Arcolao, 1998; Builder, 1956), tratam-se muito provavelmente de partículas britadas de mármore ou alabastro calcário.

Os traços encontrados para ambas as camadas da amostra 3 são muito ricos em cal e bastante diferentes do que vem referido na literatura, onde variam entre 1:1 (Arcolao, 1998; Hannouille,

1959) e 1:2 (Arcolao, 1998; Builder, 1956). Atendendo a que estes correspondem, muito provavelmente a traços volumétricos, a diferença poderá ser ainda maior, i.e., a proporção de ligante em massa irá ser menor do que 1:1 e 1:2.

Pelo contrário, as argamassas analisadas (2 e ARG-5) são muito distintas, tanto em aspeto visual (Figura 3), como em termos de coesão: a 2 é coesa e tem um tom alaranjado, que lhe é conferido pela adição de agregados de origem cerâmica (Figura 5a); a ARG-5 é friável e apresenta agregados de diversas cores e naturezas, nomeadamente de natureza quartzítica e basáltica (Quadro 2, Figura 5c).

Quadro 2: Resultados da análise mineralógica por DRX

Amostra*		Compostos cristalinos identificados**			
		Calcite	Gesso	Quartzo	Outros
1/1	FG	++++	-	-	-
	FF	++++	-	-	-
1/2	FG	++++	-	-	-
	FF	++++	-	-	-
2	FG	++/+++	-	+/**	Microclina (+), Albite (+), Hematite (vtg)
	FF	+++/**	-	+	Microclina (trc), Albite (vtg), Hematite (vtg)
3/1	FG	++++	-	-	-
	FF	++++	-	-	-
3/2	FG	++++	-	-	-
	FF	++++	-	-	-
4	FG	++	+++	?	Anidrite (vtg)
ARG-5	FG	++/+++	-	++	Anortite (vtg), Dióxido (vtg)
	FF	++++	-	vtg	Anortite (vtg)
6	FG	+++/**	-	+	
	FF	++++	-	vtg	

* FG - Fração global; FF - Fração fina; ** Notação usada em DRX:

++++ - teor muito elevado (composto predominante)

+++ - teor elevado

++ - teor médio

+ - teor baixo

vtg - quantidade vestigial

? - dúvidas na presença

- - não detetado

Quadro 3: Resultados quantitativos da análise química e mineralógica

Amostra*		ATG-ATD - Perdas de massa (%)			Calcite (%)	Gesso (%)	RI* (%)	Ligante/ Agregado (massa)
		25-100°C	100-500°C	500-900°C				
1/1	FG	0,04	0,37	43,12	98	-	N.D.	N.D.
1/2	FG	0,15	0,99	41,95	95	-	N.D.	N.D.
2	FG	0,60	1,88	16,24	37	-	56	1/2
3/1	FG	0,01	0,50	43,35	98	-	17	1/0,25
3/2	FG	0,67	0,83	42,72	97	-	7	1/0,11
ARG-5	FG	0,44	1,34	18,23	41	-	52	1/1,67
6	FG	0,81	2,18	38,25	87	-	N.D.	N.D.
			100-300°C/ 300-500°C					Gesso/ Calcite
4	FG	0,19	15,05/0,33	11,58	26	72	N.D.	1/0,33

* RI - Resíduo insolúvel; N.D. - Não determinado

25-100 °C - Perda de massa atribuída a libertação de água livre (humidade);

100-300 °C - Perda de massa atribuída essencialmente à desidratação do gesso;

300-500 °C - Perda de massa atribuída a óxidos de ferro amorfos ou a eventuais minerais de argila

500-900 °C - Perda de massa atribuída à decomposição do carbonato de cálcio

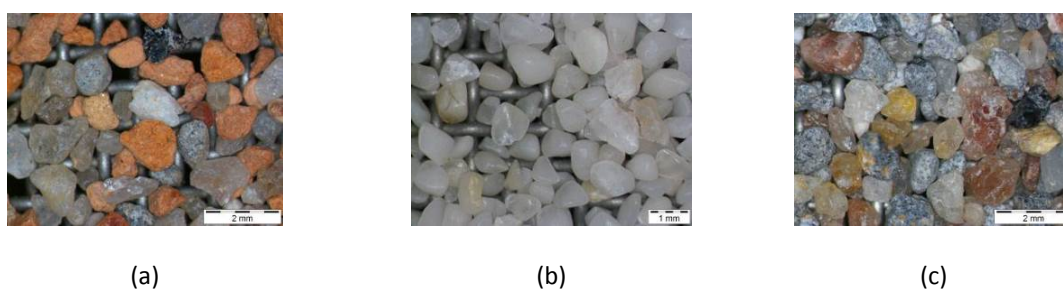


Figura 5 - Agregados das amostras 2 (a), 3/1 (b) e ARG-5 (c)

A utilização de compostos cerâmicos foi muito provavelmente intencional, podendo dever-se à conjugação de várias razões: quando possuem alguma pozolanicidade, formam compostos hidráulicos na reação com a cal hidratada, tornando as argamassas mais resistentes à humidade e em termos mecânicos; tornam as argamassas mais leves, o que é bastante favorável em elementos volumosos e colocados em sítios altos; absorvem água, que vão depois libertando aos poucos, facilitando a carbonatação da cal e as reações com o pó de tijolo (Velosa et al., 2007). A aplicação de uma argamassa deste tipo era já recomendada na preparação dos revestimentos de paredes, em geral, por Leon Battista Alberti, e não apenas em zonas húmidas (Arcolao, 1998). Neste caso, tratando-se de uma argamassa que funciona como base a elementos decorativos estucados do século XVII de elevado valor estético e qualidade de aplicação, maioritariamente localizados na abóbada de uma igreja, junto à cobertura, é natural que tenha havido uma preocupação adicional com a seleção, preparação e aplicação dos materiais. A mesma autora refere ainda que, a partir do século XIX, era comum utilizar alguma cal viva na preparação destas argamassas, vivamente recomendada por Rondelet, pois conferia uma presa mais rápida e maior resistência mecânica num espaço de tempo mais curto, bem como uma maior estabilidade dimensional e melhor resistência à humidade. A adição de “telhas bem cozidas, já usadas, moídas” é igualmente referida por Rondelet como forma de melhorar o desempenho, face à humidade, destas argamassas.

Apesar de a adição de cal viva ser referida como uma prática dos séculos XVIII e XIX, esta terá sido muito provavelmente usada na amostra 2 dada a quantidade e dimensão de nódulos de cal encontrados (Quadro 1). No entanto, existe uma forte probabilidade de que a argamassa correspondente a esta amostra seja original, pela extensão com que está aplicada. Sabe-se que a igreja de S. Domingos sofreu alguns danos com o terramoto de 1755, mas não há registos de que estes tenham exigido intervenções profundas.

A argamassa da amostra 5 foi utilizada no enchimento de frisos mais delgados (Figura 2c) e no enchimento dos elementos, também pouco volumosos, que constituem as rosáceas centrais das cartelas (Figura 2b). Em qualquer dos casos, o uso de uma argamassa menos coesa não é tão problemático e pode ter sido intencional, embora a exposição prolongada à água, como já aconteceu em alguns períodos da história desta igreja, possa ter contribuído para alguma lixiviação do ligante e ser a verdadeira causa.

A amostra 4 corresponde ao núcleo desses elementos decorativos e é a única onde foi encontrado gesso. Tratando-se de elementos moldados no local (são todos diferentes entre si), a

mistura com cal terá sido feita com o intuito de aumentar a plasticidade e trabalhabilidade da massa, durante o tempo necessário à sua execução. Existem dúvidas, no entanto, sobre se esta será uma amostra de um elemento original, uma vez que, sendo estes fixados com recurso a elementos metálicos e encontrando-se muitos deles fraturados, a grande maioria já terá sido, muito provavelmente, substituída. A ser original, seria a primeira vez que o uso de gesso em elementos decorativos anteriores ao século XVIII, não correspondentes a casos especiais (como os estuques islâmicos de Silves e Mértola, ou os painéis da Charola do Convento de Cristo), foi detetado em Portugal (Freire, et al., 2015). As proporções gesso/cal encontradas também não são habituais para elementos moldados *in situ*: 1:0,33 na 4, sendo usual encontrar-se 1:1,4 (proporções mássicas) (Freire, 2016).

Por último, a amostra 6, correspondente ao revestimento liso, com cor, que funciona como fundo para os elementos decorativos. Verifica-se que este revestimento, atualmente cor de salmão, tem uma camada anterior de cor negra (Figura 3f), muito mais contrastante com o branco, que se presume ser a original. Foi esta a camada analisada por DRX e ATG-ATD, devendo-se a sua cor à provável adição de negro de fumo, composto amorfo, não detetável na DRX.

Absorção capilar e secagem

Nas argamassas de cal, a maior parte da absorção capilar ocorre nos primeiros minutos. Este fenómeno deve-se à existência de um elevado número de poros capilares ($r > 0,05 \mu\text{m}$) (Lanas & Alvarez, 2003; Thomson et al., 2004) o que, geralmente associado a uma espessura das amostras abaixo de 2 cm, leva à sua rápida saturação. Por essa razão, os coeficientes de capilaridade têm de ser calculados caso a caso, de modo a abrangerem apenas o período em que a absorção tem maior significado (a parte mais reta das curvas). Na Figura 6, à esquerda, apresentam-se as curvas de capilaridade e secagem das amostras 1, 2 e 5, e, à direita, os troços das curvas onde os respetivos coeficientes (Ccc, D1 e D2) foram calculados. No Quadro 4 apresenta-se um resumo dos valores obtidos.

As amostras 1 e 2 têm um comportamento muito idêntico, tanto na absorção capilar, como nas duas fases de secagem, em que a primeira, D1, traduz o transporte de água líquida até à superfície da amostra e a segunda, D2, o transporte de água após o recuo da frente de secagem, abrangendo fase líquida e fase de vapor. D1 está, assim, associada a poros capilares, ou ainda de maiores dimensões, caso existam, e D2 a poros de menores dimensões. Presume-se, portanto, que ambas as amostras têm curvas de distribuição granulométrica muito idênticas. Atendendo a que a amostra 1 apresenta uma grande proporção de cal, tem elevada porosidade capilar e portanto elevados Ccc e D1. A amostra 2, que seria previsível ter poros maiores de ligação pasta/agregado (pelo menos em parte superiores à gama capilar), acaba por ter também uma proporção de poros menores, na gama capilar, devido ao pó de tijolo.

No caso da amostra 5, o coeficiente de absorção capilar é mais baixo, mas a taxa de secagem D1 é mais elevada. Este facto indicia a presença de alguns poros de dimensão superior às dos poros capilares, que facilitam a secagem da água líquida, mas não contribuem para a absorção. Pelo contrário, a difusão de vapor ocorre a uma taxa inferior do que nas amostras 1 e 2, podendo inferir-se que a amostra 5 tem menor quantidade de poros de menores dimensões. No que diz

respeito aos poros de maiores dimensões, estes resultados poderão estar relacionados com a friabilidade da amostra e com a hipótese de ter havido alguma lixiviação do ligante.

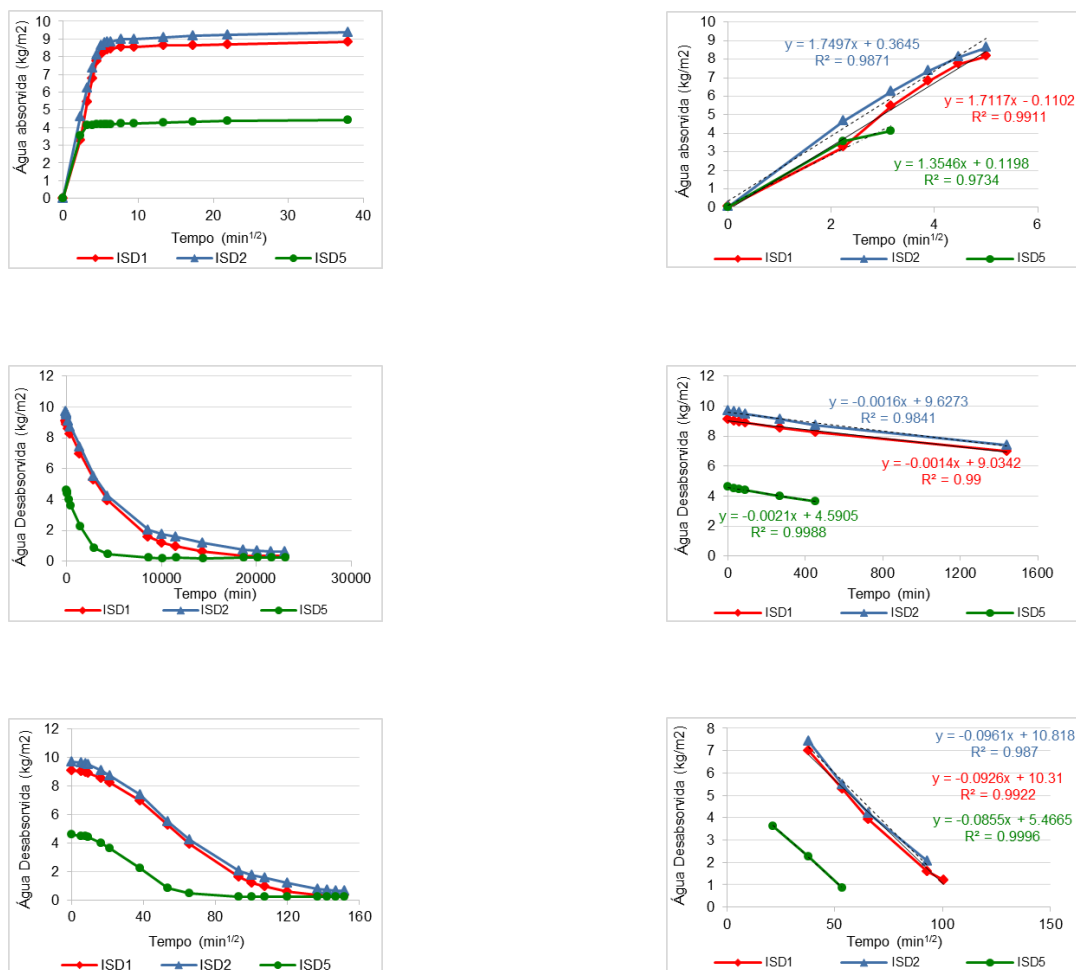


Figura 6 - Curvas de absorção capilar, secagem e cálculos dos respetivos coeficientes

Quadro 4 - Resultados dos coeficientes de absorção e secagem

Amostra	Ccc (kg/(m ² ·min ^{1/2}))	D1 (kg/(m ² ·min))	D2 (kg/(m ² ·min ^{1/2}))
1	1,72	0,0014	0,0926
2	1,75	0,0016	0,0961
5	1,35	0,0021	0,0855

Comparando os valores obtidos com os de outras amostras, verifica-se que, tanto os coeficientes de capilaridade, como os de secagem, são da mesma ordem de grandeza dos valores encontrados num estudo sobre argamassas de cal de assentamento de azulejos antigos, em especial daquelas que têm relações ligante/agregado mais próximas das encontradas para as amostras 2 e 5 (Damas et al., 2018)

Os valores dos coeficientes de capilaridade são, ainda, comparáveis com os Ccc aos 5 minutos de amostras de estuques antigos de gesso e cal, em especial com as dos elementos pré-moldados, maioritariamente constituídos apenas por gesso, sem adição de agregados ($1 < Ccc < 3 \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) (Freire, 2016).

Conclusões

O estudo de um grupo de 6 amostras de estuques decorativos maneiristas do século XVII revelou estar-se perante um conjunto de elevada qualidade de execução, onde os materiais foram cuidadosamente selecionados consoante o local de aplicação e a função.

No enchimento dos elementos decorativos de maior volumetria foi utilizada uma argamassa de cal e agregados cerâmicos, quartzíticos e feldspatos ao traço 1:2. Há, ainda, fortes indícios de que terá tido adição de cal viva durante a preparação. Este tipo de argamassas vem referido na tratadística como sendo muito resistente à humidade, constituindo uma boa base para a preparação de um revestimento de elevada qualidade.

O acabamento destes elementos, de cor branca, é constituído por 2 camadas de uma argamassa muito rica em cal, à qual foram adicionados agregados de natureza calcítica, muito puros e cristalinos, tratando-se provavelmente de mármore. Por baixo das sucessivas camadas de pintura, que aparentam ser caiações, é possível observar uma superfície extremamente polida, o que melhora o efeito estético e, simultaneamente aumenta a durabilidade dos revestimentos, que assim se tornam muito pouco porosos e menos suscetíveis à ação da humidade.

Verificou-se que o revestimento das zonas lisas dos elementos decorativos, hoje em cor de salmão, teria tido originalmente uma cor negra. O contraste com o branco das formas em que se insere permitia realçar ainda mais o efeito decorativo pretendido.

Salienta-se o facto de todos os estuques decorativos terem sido executados com argamassas de cal. A única exceção foi uma amostra de um pequeno elemento que remata o centro das rosáceas das cartelas, onde o gesso é o composto predominante. Trata-se, no entanto, de um elemento bastante vulnerável, pela sua forma de ligação ao suporte (com recurso a elementos metálicos), pondo-se a hipótese de poder não ser original.

Os resultados obtidos reforçam, assim, a ideia de que, em Portugal, até meados do século XVIII, houve um predomínio do uso de argamassas de cal em todo o tipo de aplicações. Apenas a partir do Barroco, período com grandes exigências decorativas, foi introduzido o uso do gesso, a solo (em elementos pré-moldados), ou misturado com cal, em proporções que variavam consoante o tipo de aplicações, todas elas relacionadas com a decoração ou o acabamento dos espaços interiores. Graças à ductilidade e versatilidade das massas resultantes das infinitas combinações entre estes dois ligantes e da complementaridade que exibem a diversos níveis (tempos de trabalho, plasticidade, resistências mecânicas, variações dimensionais), foi possível dispensar o uso de agregados em acabamentos finos, e alcançar formas de linhas mais puras e delicadas, de grande qualidade estética.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao estucador Marco Aurélio pela ajuda na recolha das amostras e à FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento do Projeto PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-Heritage - Database of building materials with historical and heritage interest.

Referência bibliográficas

- Arcolao, C. (1998). *Le ricette del restauro* (2nd ed., p. 284). Venezia: Marsilio Editore.
- Builder, A. (1956). *Travail du plâtre* (2ème ed., p. 138). Paris et Liège: Librairie Polytechnique, Ch. Béranger.
- Damas, A. L., Veiga, M. R., Faria, P., & Santos Silva, A. (2018). Characterisation of old azulejos setting mortars: A contribution to the conservation of this type of coatings. *Construction and Building Materials*, 171, 128–139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.103>
- Freire, M. T. (2016). *Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products*. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon.
- Freire, M. T., Santos Silva, A., Veiga, M. R., & Brito, J. de. (2015). The history of Portuguese interior plaster coatings: A mineralogical survey using XRD. *Archaeometry*, 57(Special Online-only Issue, Supplement S1), 147–165. doi:10.1111/arcm.12130
- Hannouille, E. (1959). *Pour le maçon et le plâtrier. Manuels Professionnels "Pour le..."* (2ème ed., Vol. 23, p. 174). Paris: Dunod.
- Igreja Nossa Senhora do Rosário. (n.d.). Retrieved April 19, 2018, from <http://www.paroquiasaodomingosdebenfica.pt/paroquia/patrimonio/igreja-nossa-senhora-do-rosario:173>
- Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factor affecting the mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867–1876.
- Mendonça, I. M. G. (2009). *Estuques Decorativos - A evolução das formas (séculos XVI a XIX). Principia* (1ª ed.). Lisboa: Nova Terra - Patria.
- Thomson, M., Lindqvist, J.-E., Elsen, J., & Groot, C. J. W. P. (2004). Porosity of mortars. In C. Groot, G. Ashall, & J. Hughes (Eds.), *Characterisation of old mortars with respect to their repair - Final report of RILEM TC 167-COM*. RILEM Publications S.A.R.L.
- Veiga, M. R., Magalhães, A., & Bosiljkov, V. (2004). Capillarity tests on historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results. In D. Martens & A. Vermeltoort (Eds.), *13th International Brick and Block Masonry Conference*. Amsterdam: Eindhoven University of Technology.
- Velosa, A. L., Coroado, J., Veiga, M. R., & Rocha, F. (2007). Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair. *Materials Characterization*, 58(11-12), 1208–1216. doi:10.1016/j.matchar.2007.06.017

Metodología simplificada de identificación mediante MOP de las cales hidráulicas y los cementos naturales

Cristina Mayo Corrochano⁽¹⁾ David Sanz Arauz⁽²⁾, José Ignacio Pineda Enebra⁽³⁾

(1) *Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Madrid. Miembro del grupo de investigación "Análisis e Intervención en Patrimonio Arquitectónico (AIPA), (Universidad Politécnica de Madrid, España. cristina@estudiomayo.com)*

(2) *Dr. por la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Contratado Doctor en el Departamento de Construcción y Tecnologías arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Grupo AIPA. (Universidad Politécnica de Madrid, España. david.sanz.arauz@upm.es)*

(3) *Arquitecto superior por la universidad de Alfonso X el Sabio. Estudiante del Máster Universitario en Construcción y Tecnología de los Edificios Históricos (MUCTEH) (Universidad Politécnica de Madrid, España. nachopinedaene@gmail.com)*

Resumen

Durante el desarrollo arquitectónico de las principales ciudades europeas en el siglo XIX, diversos morteros hidráulicos competían por encontrar su lugar en un mercado que históricamente había sido acaparado por los morteros tradicionales de cal.

Cientos de edificios de nuestro patrimonio arquitectónico construidos en el siglo XIX, tras más de cien años desde su construcción, necesitan intervenciones para su conservación y rehabilitación.

Para realizar estas actuaciones de forma adecuada, resulta indispensable la correcta identificación de los morteros empleados originalmente. La restauración de estos morteros con materiales no compatibles puede producir daños irreparables en los elementos originales de los edificios.

Tanto las cales hidráulicas como los cementos naturales se producen mediante la calcinación de calizas arcillosas a temperaturas inferiores a los 1200°C.

A pesar de la delgada línea que diferencia a un material de otro, sus propiedades físicas y mecánicas son notablemente diferentes.

La medición de estas propiedades físicas y mecánicas resulta difícil cuando no es posible disponer del material original suficiente del edificio para realizar los ensayos necesarios.

El objetivo de esta investigación es el desarrollo de un método sencillo, práctico y económico para la identificación y distinción entre las cales hidráulicas y los cementos naturales.

Para esta identificación se emplean técnicas de microscopía óptica. Así mismo, se ha desarrollado un estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de ambos materiales mediante el estudio de probetas en el laboratorio.

Palabras clave: Cal hidráulica; Cemento natural; Morteros históricos; Identificación; Propiedades físicas; MOP.

Introducción

Si nos remontamos en el tiempo vemos que los aglomerantes hidráulicos han sido empleados a lo largo de la historia, desde Mesopotamia hasta el Imperio Romano.

Un gran paso en la evolución de los conglomerantes tuvo lugar en Inglaterra en los primeros años de la segunda mitad del siglo XVIII. Fue John Smeaton quien, en 1756, con motivo del encargo que el parlamento inglés le hizo para la construcción de un faro en Eddystone, emprendió un estudio sistemático de los aglomerantes del momento, sus propiedades y sobre todo de los orígenes y causas de estas, con el fin de utilizar el mejor conglomerante posible en una obra situada en una zona de fuertes temporales y para satisfacer el deseo de mejorar y ampliar las posibilidades de utilización de los ya existentes.

Smeaton realizó numerosos ensayos con distintas cales procedentes de diferentes tipos de calizas. Descubrió que las cales que daban mejores resultados eran aquellas que contenían una considerable proporción de materia arcillosa en su composición. Una de las primeras conclusiones obtenidas fue que las probetas realizadas con cales hidráulicas y sumergidas en agua no sufrían ningún cambio e incrementaban su dureza con el paso del tiempo.

Mas tarde en 1796, James Parker patentó su “cemento romano”. Este se obtenía mediante la calcinación de nódulos de septaria de la isla de Sheppey, una marga natural con un alto contenido de arcillas [Hurst, 2002].

En 1824 Joseph Aspdin patenta su cemento portland y durante algunos años todos estos morteros convivieron en el tiempo. No obstante, con el tiempo el cemento portland sustituyó a los morteros que se venían utilizando hasta entonces dada la superioridad de sus prestaciones mecánicas.

Así pues, podríamos decir que el cemento natural es un paso intermedio entre una cal hidráulica y un cemento portland.

Mientras que los cementos portland se obtienen mediante la calcinación de calizas y arcillas a temperaturas superiores a los 1200°C, produciéndose la sinterización del Clinker y consecuentemente obteniendo cristales de belita (C_2S) y alita (C_3S) en ellos; en las cales hidráulicas y los cementos naturales, la materia prima se calcina a bajas temperaturas (entre 800 y 1200°C), lo que está por debajo de la temperatura de sinterización. Esto hace que en ellos la fase predominante sea la belita [Mayo, 2015]. Si bien es cierto que es posible encontrar mínimas cantidades de alita en los cementos naturales debido a puntos calientes en los hornos [Varas et al., 2005], la ausencia de estas es fundamental a la hora de diferenciar entre un cemento natural y uno portland [Mayo, 2015].

Por otro lado, la diferencia fundamental entre los cementos naturales y las cales hidráulicas es la composición de las materias primas empleadas. Mientras que las cales hidráulicas se obtienen de la calcinación de calizas arcillosas (con un contenido de arcillas entre un 5 y un 25%), el cemento natural se produce mediante la calcinación de margas (con un contenido de arcilla entre el 25 y el 40%) (Figura 1).

Aunque en teoría es clara la diferencia entre las cales hidráulicas y los cementos naturales, en la práctica no es tan fácil identificar dichas diferencias.

Durante los siglos XIX y XX, tanto las cales hidráulicas como los cementos naturales, fueron usados intensivamente en las decoraciones de cientos de fachadas. Actualmente, tras más de cien años desde su construcción, surge la necesidad de conservar todo ese patrimonio arquitectónico. Y para ello es fundamental en primer lugar una correcta identificación de estos materiales. Es por esto que surge la necesidad de realizar un estudio pormenorizado de estos materiales y establecer unos patrones identificativos que nos ayuden a diferenciar las cales hidráulicas de los cementos naturales.

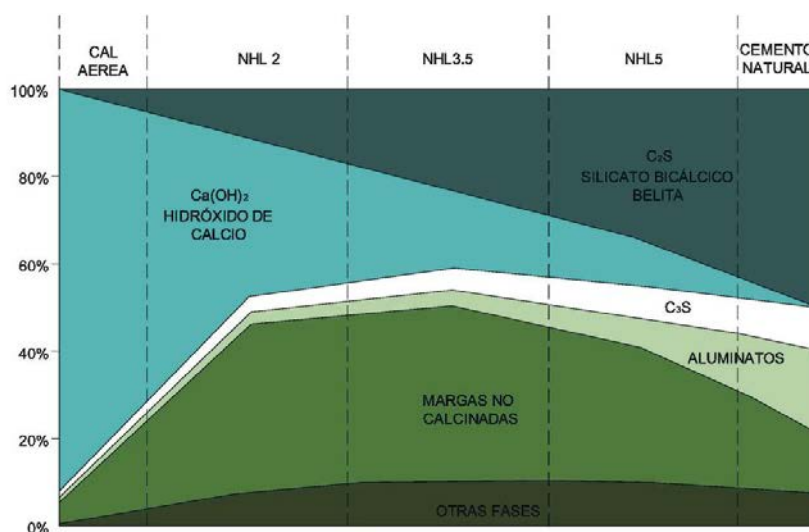


Figura 1: Tabla obtenida del libro "Ciment naturel" [Avenier C, 2007]

Materiales y métodos

En primer lugar, analizamos el polvo no hidratado de cementos naturales [UNE 80309:2006] (Collet, Tigre y Valderribas) y de cales hidráulicas NHL-3,5 y NHL-5 [UNE-EN 459-1:2016] mediante difracción de rayos X para conocer en profundidad las fases presentes en cada uno de ellos. El equipo utilizado es un difractómetro Bruker D8 Advance del CAI de Técnicas geológicas de la Universidad Complutense de Madrid; Trabaja en geometría Bragg-Bentano, provisto de una fuente de rayos-X con un ánodo de cobre de alta estabilidad y un detector de energía dispersa SOL-X. Las condiciones experimentales fueron: rango de medida de 2-65° (2θ), con un escaneado cada segundo y un ángulo para la ranura de divergencia de 0,02° (2θ). El software utilizado fue el EVA DIFFRACplus, llevando a cabo la semicuantificación por el método de Chung, a partir de los tres planos cristalográficos (hkl) de mayor intensidad de los componentes más representativos. [Chung, F; 1974° y b]

Con el fin de conocer mejor las propiedades físicas y mecánicas de las cales hidráulicas en comparación con los cementos naturales, realizamos probetas en el laboratorio de dimensiones 40x40x160mm de pasta de cemento natural Collet, cemento natural Tigre, cemento natural Valderribas. Y de cales hidráulicas NHL-3,5 y NHL-5 suministradas por Saint-Astier. Todas las probetas tienen una proporción agua/cemento de 0,5 (por recomendación del fabricante) y con unas condiciones de curado según la norma UNE-EN 12390-2:2009.

Sometemos dichas probetas a ensayos de hidráulica [UNE-EN 15801] y resistencia a compresión y flexión según norma UNE 80-116-86.

Como ya hemos dicho, el principal problema que nos encontramos es identificar los diferentes morteros empleados en el periodo de tiempo que nos ocupa, ya que la línea divisoria entre un cemento natural y una cal hidráulica, a menudo es muy delgada.

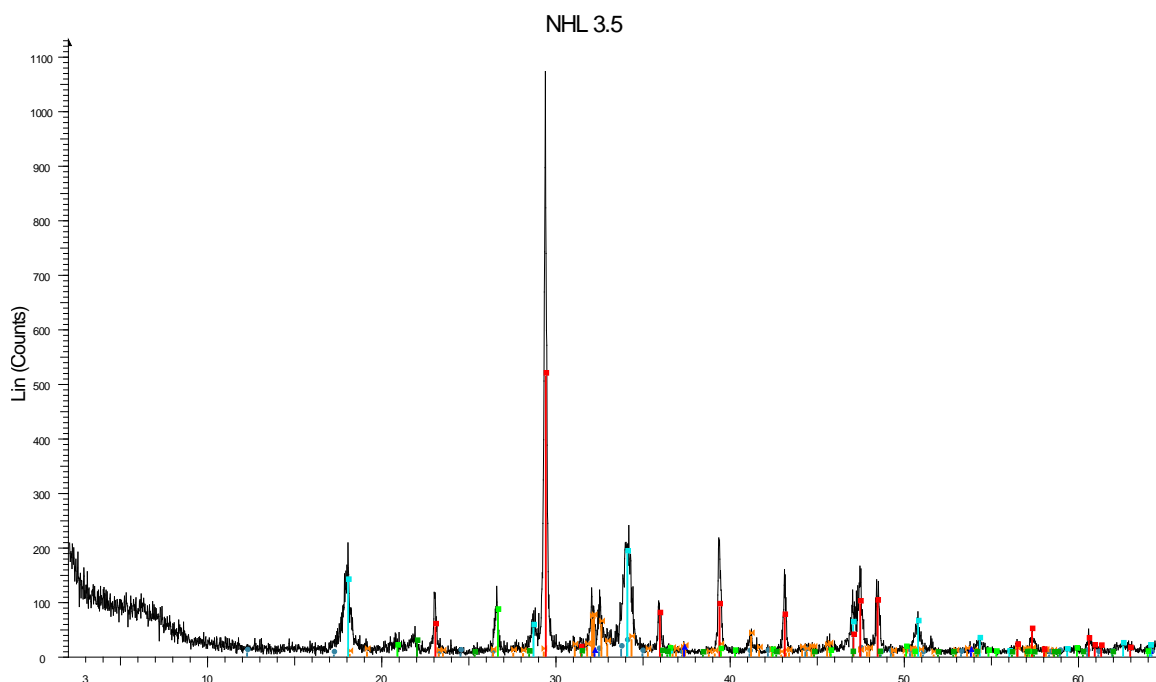
Es por esto que primero tenemos que establecer una metodología experimental que nos facilite los parámetros identificativos que nos sirvan de herramienta a la hora de clasificar todos los futuros morteros con los que nos encontremos en edificios históricos. Para ello realizamos láminas delgadas a partir de las probetas de laboratorio.

Para la caracterización de dichas probetas, y con la idea en todo momento de establecer un método de identificación de ambos materiales, empleamos microscopio digital Crenova UM012C y microscopio óptico Primotech Zeiss con el software Matscope Zeiss (iPad) para tratamiento y obtención de imágenes con las que analizamos su estructura.

Resultados y discusión

Analizando los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X observamos que las cales hidráulicas tienen un menor contenido de belitas (C_2S) que los cementos naturales y una mayor proporción de $Ca(OH)_2$ y $CaCO_3$ (Figura 2 y Figura 4).

La presencia de $CaCO_3$ en las cales hidráulicas puede ser debida a una cocción desigual de la materia prima durante el proceso de calcinación o debido a una incorrecta conservación de los sacos, lo que puede provocar la hidratación del $Ca(OH)_2$.



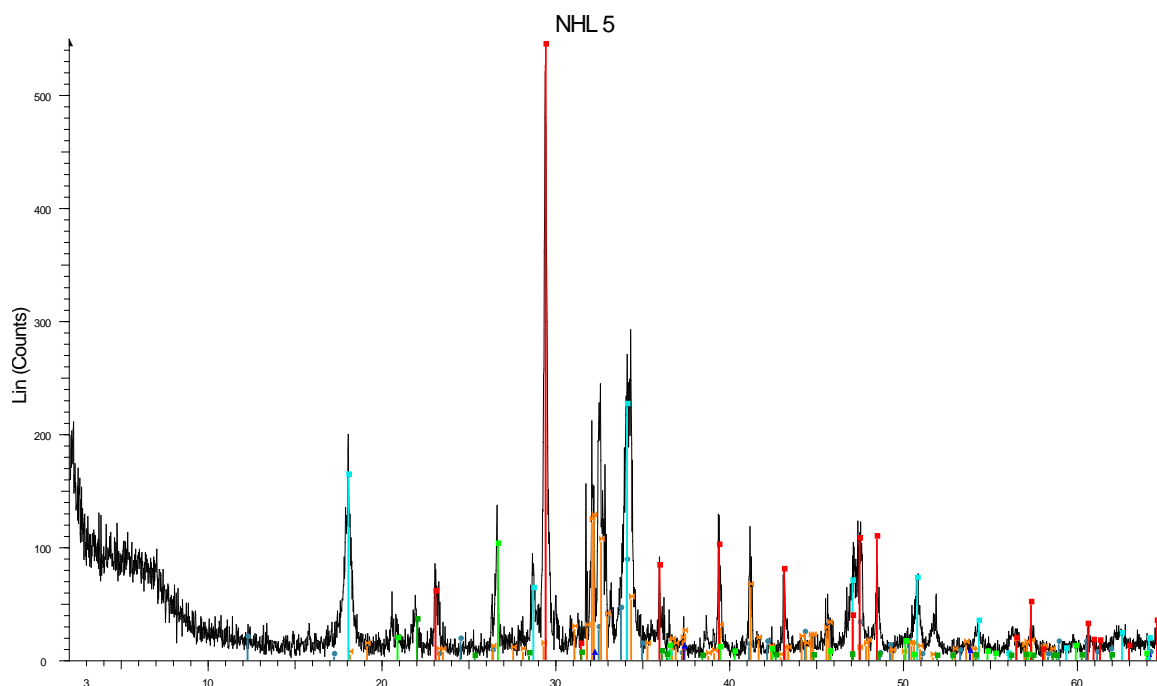
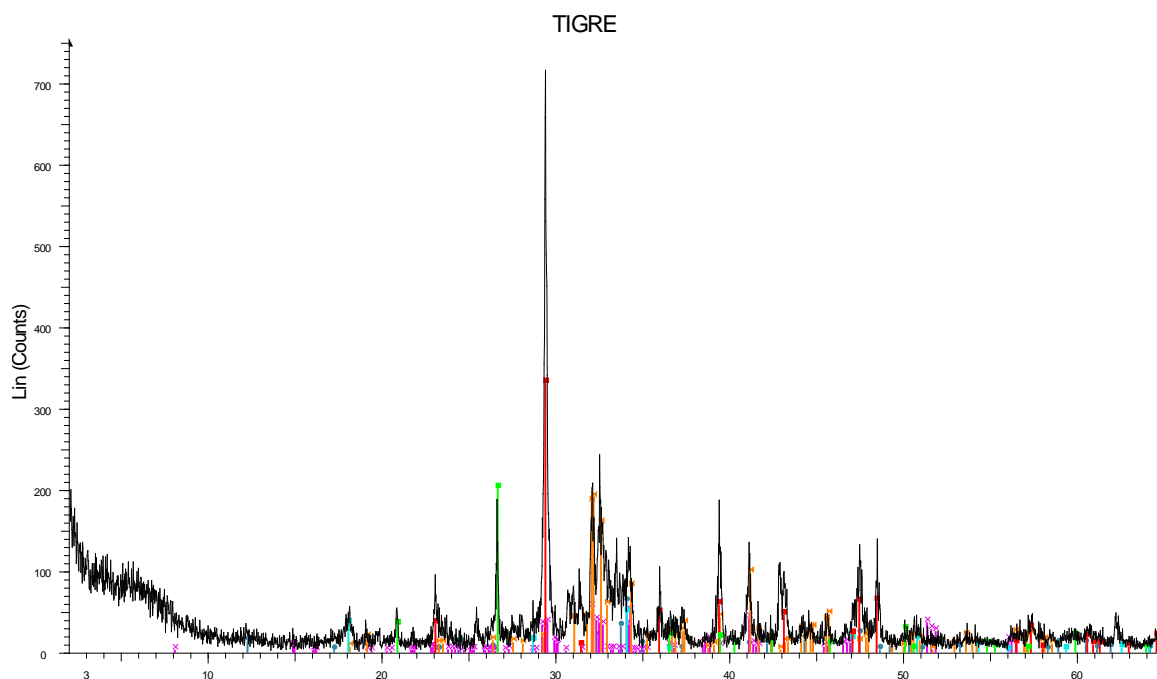


Figura 2: Difracción de rayos X de cal hidráulica NHL-3,5 y NHL-5.

- ▶ Felita (C_4AF) ▶ Belita (C_2S) ▶ Calcita ($CaCO_3$) ▶ Cristobalita (SiO_2)
- ▶ Alita (C_3S) ▶ Portlandita ($Ca(OH)_2$) ▶ Cuarzo (SiO_2) ▶ Yeelemita ($Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$)

Por otro lado, aunque la fase principal de los cementos naturales sea C_2S , como teóricamente estos se producen a unas temperaturas de calcinación inferiores a los $1200^\circ C$ (por debajo de la temperatura de sinterización), sí que observamos la presencia de un bajo porcentaje de C_3S (alitas) (Figura 3). Esto es debido a puntos calientes en los hornos durante el proceso de calcinación [Varas et al., 2005].



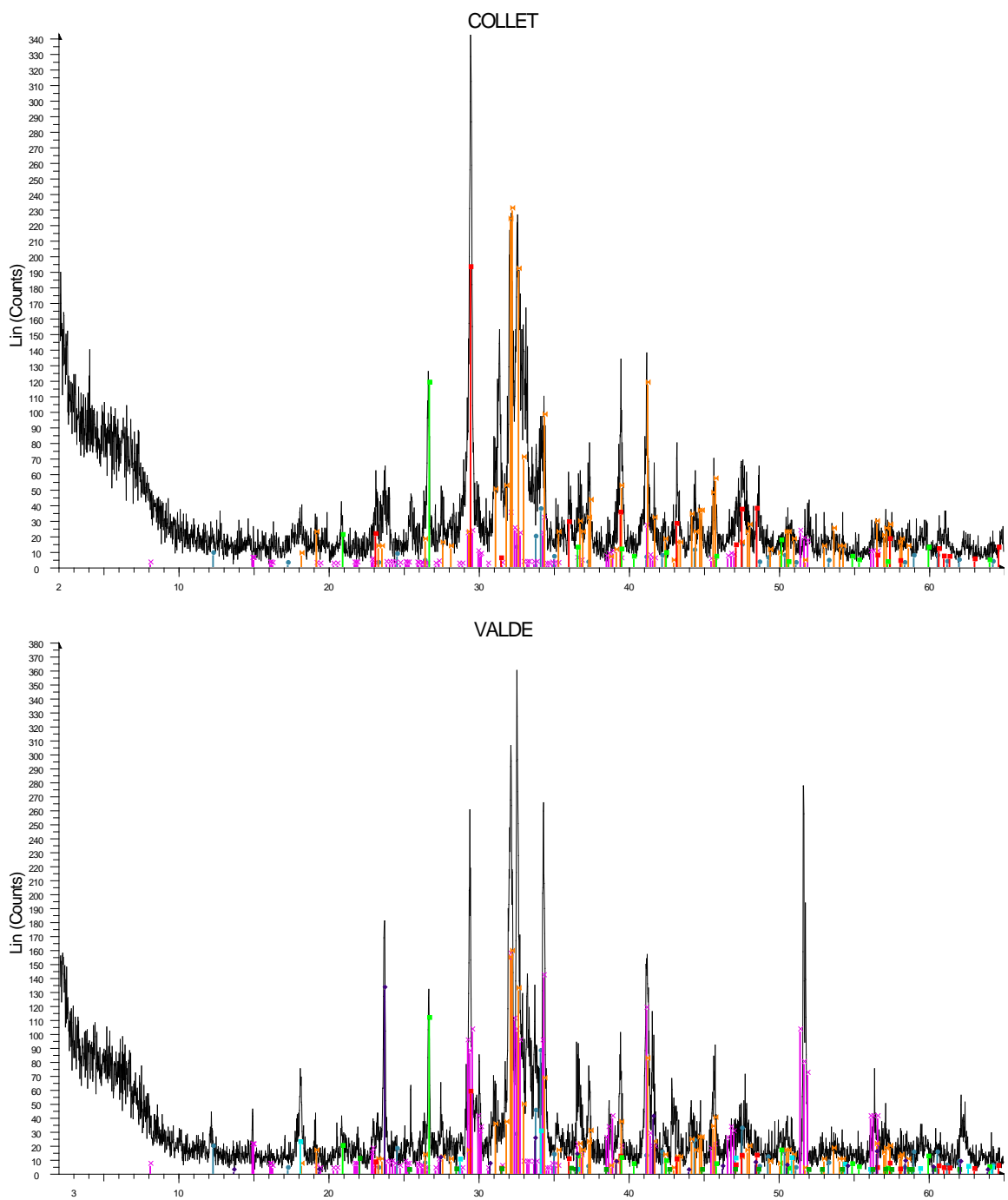


Figura 3: Difracción de rayos X de cemento natural Tigre, Collet y Valderribas.

- ▶ Felita (C_4AF) ▶ Belita (C_2S) ▶ Calcita ($Ca(CO_3)$) ▶ Cristobalita (SiO_2)
- ▶ Alita (C_3S) ▶ Portlandita ($Ca(OH)_2$) ▶ Cuarzo (SiO_2) ▶ Yeelemita ($Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$)

En el caso del cemento natural de Valderribas observamos un alto porcentaje tanto de C_2S , y lo que es más importante, de C_3S . Esto unido a la presencia de yeelemita ($Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$) aleja este cemento de lo que entendemos es un cemento natural.

Los cementos a base de sulfoaluminato de calcio (CSA) se originaron en China, alrededor de 1960, cómo una alternativa de "baja-energía" al cemento tradicional o Portland. Estos cementos

son obtenidos a partir de clínkers que incluyen un compuesto denominado yeelemita como fase cristalina primaria. Teóricamente, la elaboración de un cemento con base de yeelemita permite reducir en un 51% las emisiones de CO₂, en comparación con la elaboración del cemento 100% C₃S o Portland. [Tobón et al., 2014]

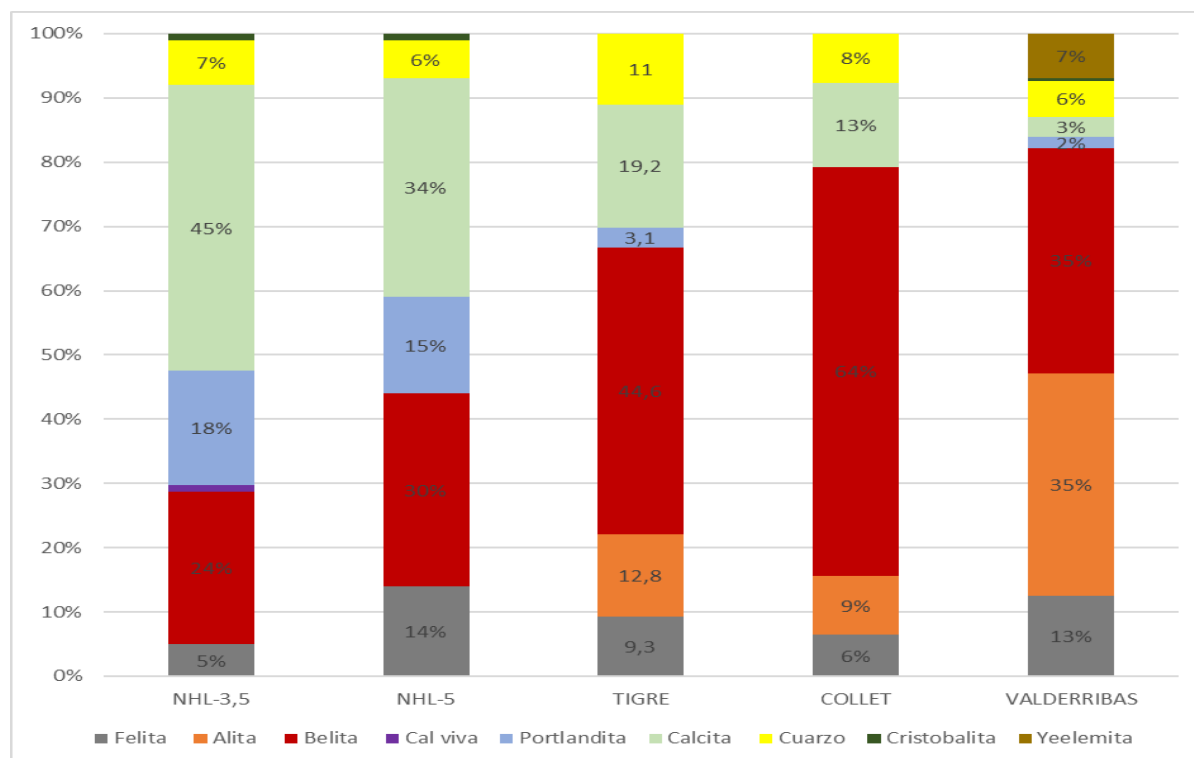


Figura 4: Fases de los cementos naturales y cales hidráulicas estudiadas.

Analizando los resultados obtenidos en los ensayos de hidráulica y resistencia mecánica de las probetas se observa que los cementos naturales, que poseen un mayor porcentaje de silicatos en la materia calcinada, tienen mayor resistencia a compresión.

Destacan por ambos extremos las cales NHL-3,5 y los cementos naturales de Valderribas. Teniendo las cales NHL-3,5 una gran porosidad y una baja resistencia a compresión (Figura 5); mientras que en el lado opuesto los cementos naturales Valderribas tienen un bajo coeficiente de absorción y una resistencia a compresión semejantes a un cemento Portland, lo que está muy por encima de las especificaciones definidas en la norma UNE 80309:2006 (Tabla 2).

Por otro lado, la diferencia no es tan clara entre los cementos naturales Collet y Tigre y las cales NHL5 (Figura 5). Los cementos naturales, teniendo una porosidad parecida a las de las cales NHL5, tienen una resistencia a compresión sensiblemente superiores, lo que las hace ideales para elementos decorativos de fachadas que requieran una mayor resistencia mecánica.

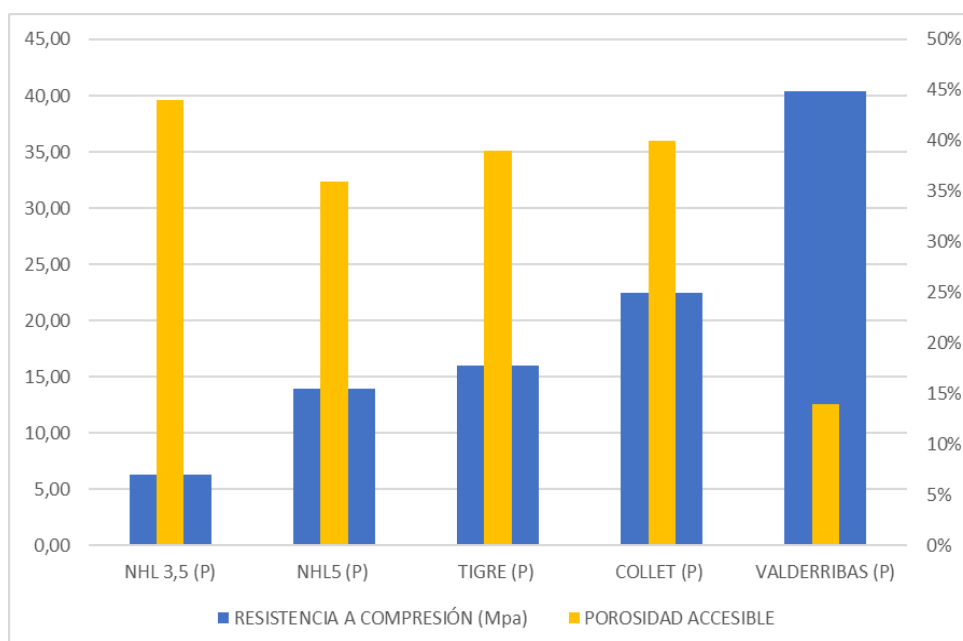


Figura 5: Porosidad y resistencia a compresión de las probetas ensayadas en el laboratorio.

Tabla 2: Propiedades físicas de las probetas.

	Resistencia compresión según norma UNE (MPa)	Resistencia compresión (MPa)	Coefficiente de absorción (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad accesible
NHL-3,5	≥3,5 a ≤10	6,28	36	1,23	44
NHL-5	≥5 a ≤15	13,95	27	1,31	36
Tigre	≥8	15,98	27	1,45	39
Collet	≥8	22,48	29	1,39	40
Valderribas	≥8	40,43	8	1,88	14

Caracterización de los morteros mediante microscopia óptica.

Al analizar en primer lugar las muestras en un microscopio estereoscópico a pocos aumentos, podemos observar fragmentos de margas calcinadas característicos de los cementos naturales en las muestras de Collet y Tigre (Figura 6), mientras que las cales hidráulicas carecen de ellos. Estos fragmentos de margas calcinadas se deben al proceso de producción de los cementos naturales. Al tener estos una mayor resistencia mecánica que las cales hidráulicas, durante el proceso de molido, pequeños fragmentos de margas calcinadas permanecen en el polvo del cemento.

En cambio, en el caso de las cales hidráulicas, al tener una menor resistencia mecánica, el molido resultante es más fino y carece de dichos fragmentos de margas. Cabe destacar la ausencia de estos fragmentos de margas calcinadas en el cemento natural de Valderribas.

A mayores ampliaciones, en un microscopio petrográfico, podemos encontrar cristales de belita no hidratada.

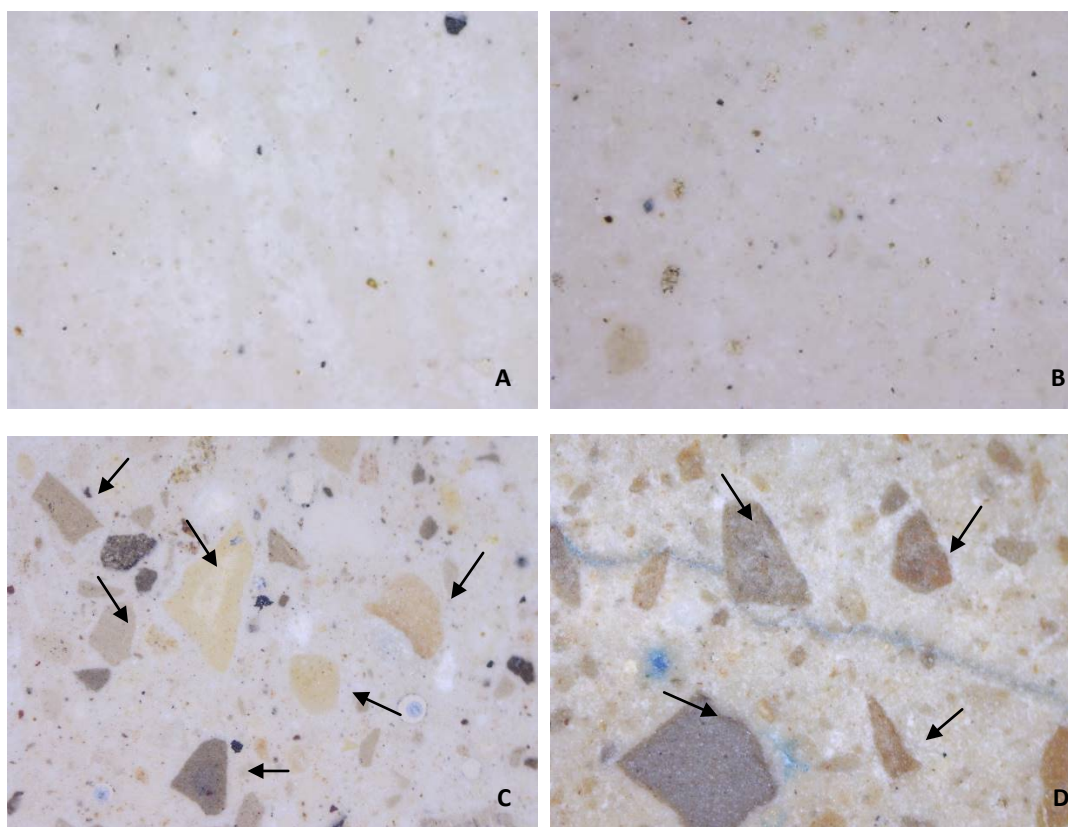


Figura 6: Imagen de microscopía óptica (50x). Ausencia de fragmentos de margas calcinadas en las muestras de NHL-3,5 (A) y NHL-5 (B). Fragmentos de margas calcinadas de las muestra de cemento natural Collet (C) y Tigre (D). Estos fragmentos se caracterizan por tener un anillo exterior hidratado.

En el caso de los cementos naturales observamos numerosas agrupaciones de belitas tanto en el interior de los fragmentos de margas calcinadas como en la matriz del cemento (Figura 7A), mientras que en el caso de las cales hidráulicas se encuentran exclusivamente en la matriz del conglomerante y su número disminuye considerablemente en comparación con los cementos naturales (Figura 7B).

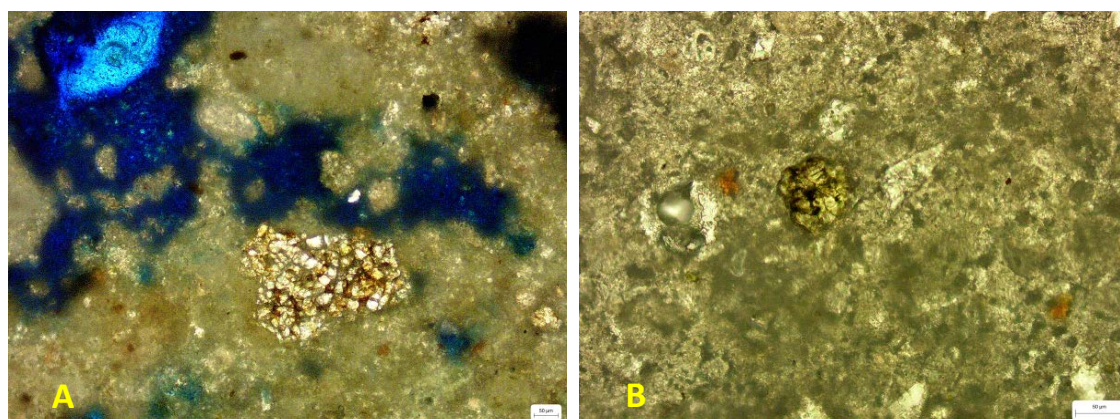


Figura 7: Imagen de microscopía óptica (100x) de la muestra de de cemento natural Tigre (A). Detalle de cristales de belita no hidratada en la matriz del cemento. Imagen de microscopía óptica (200x) de la muestra de cal hidráulica NHL5 (B). Detalle de los cristales de belita no hidratada.

Esto se debe a la diferencia en la composición de las materias primas empleadas. En los cementos naturales, al emplear margas con un contenido de arcillas superior a las empleadas en las cales hidráulicas, la cantidad de belitas (C_2S) es muy superior.

Nuevamente el caso del cemento de Valderribas es excepcional, ya que en este caso encontramos numerosas agrupaciones de belitas en la matriz del cemento, pero no así en fragmentos de margas calcinadas ya que carece de ellas.

Se observan también numerosos nódulos de cal en las muestras NHL3,5 y NHL5 (Figura 8), mientras que estos nódulos son inexistentes en las muestras de cemento natural. Esto se debe a que los aluminatos y los silicatos presentes en las cales hidráulicas, no se encuentran en proporción suficiente para saturar toda la cal.

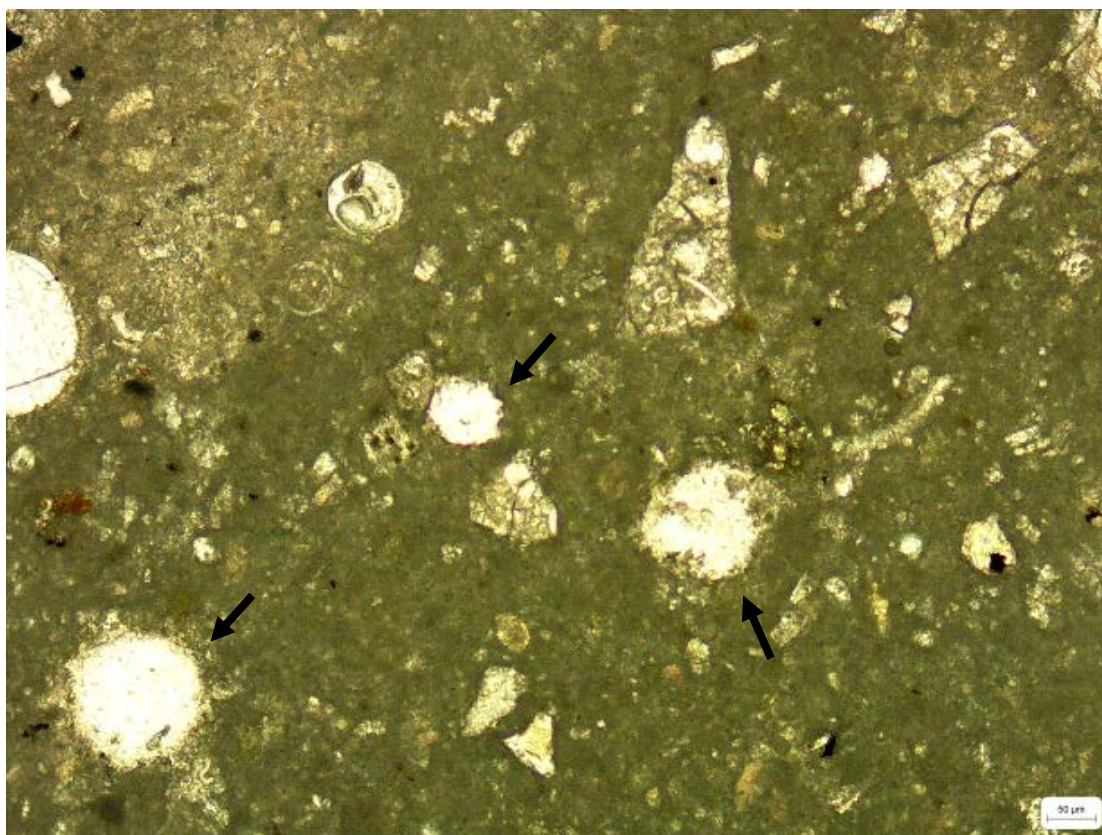


Figura 8: Imagen de microscopía óptica (100x) de lámina delgada pulida, muestra de cal hidráulica NHL3,5. Detalle de los nódulos de cal.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la DRX, estos nódulos de cal probablemente sean o $Ca(OH)_2$ no hidratado o bien $Ca(CO_3)$ debido a una cocción desigual de la materia prima durante el proceso de calcinación. Para poder concretar su composición exacta sería necesario una ATD-TG.

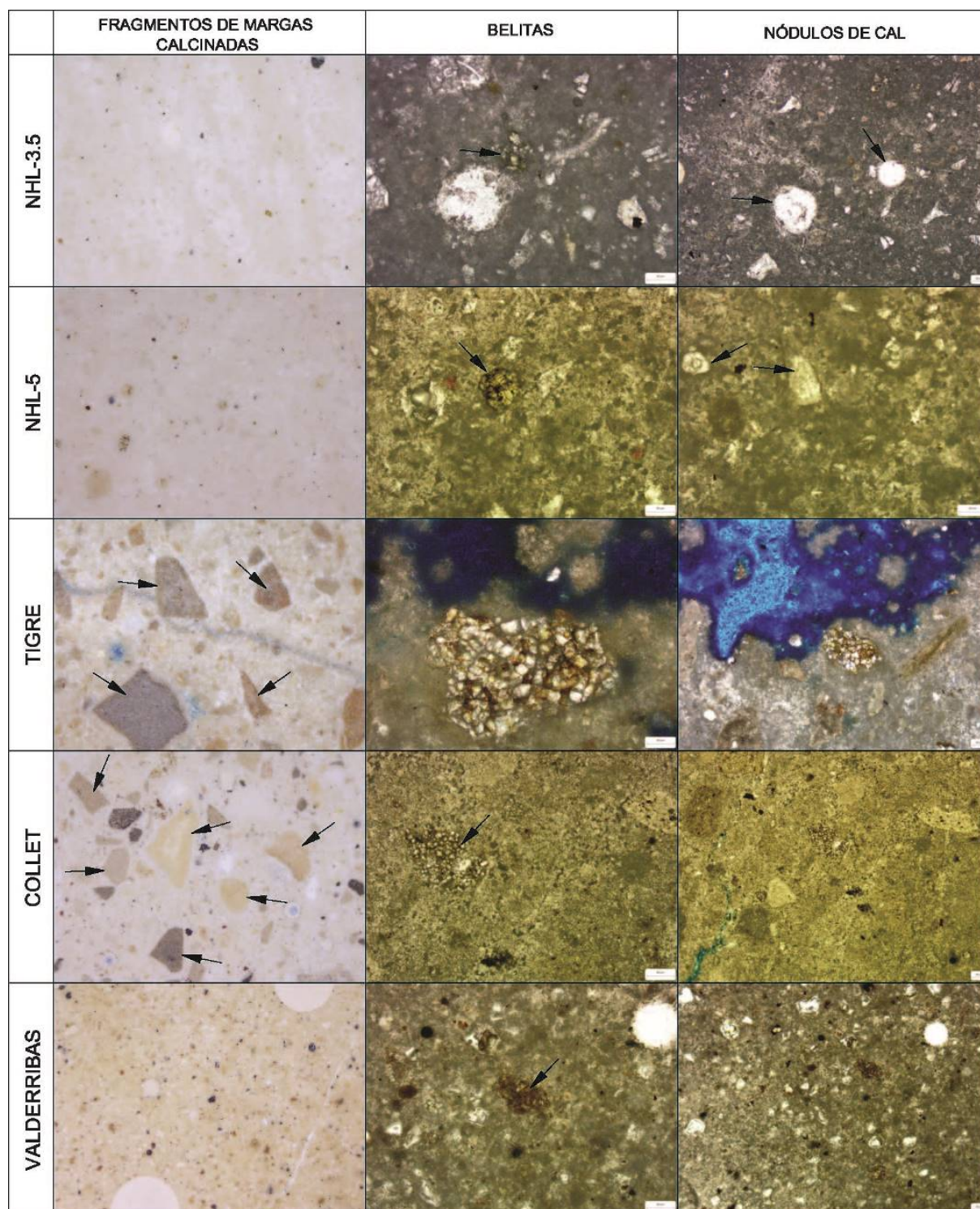


Figura 9: Comparativa de las fases encontradas en cales hidráulicas y cementos naturales mediante imágenes de microscopía óptica.

Conclusiones

1. Se observa que las cales hidráulicas tienen un menor contenido de belitas (C_2S) que los cementos naturales y una mayor proporción de $Ca(OH)_2$ y $Ca(CO_3)$.

Por otro lado, aunque la fase principal de los cementos naturales sea C_2S , sí que observamos la presencia de un bajo porcentaje de C_3S en ellos debido a puntos calientes en los hornos durante el proceso de calcinación.

2. Podemos establecer los patrones identificativos que diferencian los morteros de cemento natural y los de cales hidráulicas:
 - Al analizar las láminas delgadas en un microscopio estereoscópico se puede observar la estructura característica de los cementos naturales. Ésta es una combinación de fragmentos de margas infra calcinadas, sobre calcinadas, y calcinadas a las temperaturas óptimas propias del proceso de calcinación y molienda de estos cementos. Por el contrario, las cales hidráulicas NHL-3,5 y NHL5 no presentan estos fragmentos y tienen una estructura más homogénea.
 - A mayores ampliaciones en el microscopio petrográfico se pueden observar abundantes cristales de belita no hidratada en el interior de las margas calcinadas y en la matriz del cemento (en el caso de los cementos naturales), mientras que en las cales hidráulicas estos se encuentran exclusivamente en la matriz de conglomerante y en cantidades muy inferiores.
 - Se pueden observar nódulos de cal en las muestras NHL-3,5 y NHL-5, mientras que los cementos naturales carecen de estos nódulos.
3. Este trabajo sirve de punto de partida a un estudio comparativo más amplio en el que se incluyas otras técnicas para completar los análisis realizados como SEM, FRX o ATD-TG. Así mismo, aplicar estas técnicas a los cementos Portland históricos, material que durante algunos años convivió con las cales hidráulicas y los cementos naturales.

Bibliografía

Hurst, L. (2002). The properties and uses of roman cement. *Construction History*. Volumen 18, pag 21-35.

Mayo Corrochano, C. (2015). 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. Madrid.

Avenier, C., Sommain, D., Rosier, B. (2007). *Ciment naturel*. Grenoble Cedex. Ediciones Glénat.

Tobón, J., Torres Giraldo, C., Solarte Berrio, A., Zuluaga Londoño, D. (2014). Formulación de cemento en base a sulfatoaluminio con proporción particular de sistemas yelemíticos. Patente WO2016088083A1.

Varas, M., Alvarez de Buergo, M., & Fort, R. (2005). Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research*. Volumen 35.

Chung, F. (1974a) Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures II. Matrixflushing method for quantitative multicomponent analysis. *Journal of Applied Crystallography*. Volumen 7, pag 519-525.

Chung, F. (1974a) Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures I. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixtures. *Journal of Applied Crystallography*. Volumen 7, pag 526-531.

Desafios atuais na análise e na replicabilidade de argamassas históricas à base de cal aérea

Victória Reis⁽¹⁾, Mateus Antônio Oliveira⁽²⁾, Ananda Bispo⁽³⁾, Rafael A. Maia⁽⁴⁾

(1) Mestranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, reisvictoria.vdr@gmail.com

(2) Professor, Universidade Federal do Pará, Brasil, mateusengcivil@gmail.com

(3) Graduanda, Universidade Federal do Pará, Brasil, anandabispo_@hotmail.com

(4) Universidade Federal do Pará, Brasil, rafaelalves_maia@hotmail.com

Resumo

Os edifícios históricos são parte importante da identidade cultural da sociedade. Diferentes civilizações ao longo da história utilizaram argamassas à base de cal aérea para construções em alvenarias. A argamassa é reconhecida como a principal causa das deformações e movimentos nesse tipo de estrutura, o que justifica a necessidade de uma análise detalhada do papel da argamassa no âmbito do comportamento estrutural de construções históricas em alvenaria. O conhecimento sobre os materiais e as composições/traços utilizados no passado pode ser considerado ainda escasso, tanto a nível internacional quanto no contexto brasileiro, considerando a importância de se reproduzir precisamente argamassas compatíveis e entender o comportamento das já utilizadas. Este trabalho tem como objetivo verificar, por meio de uma detalhada revisão bibliográfica, os materiais empregues nos edifícios históricos.

Palavras-chave: Cal aérea; Argamassas históricas; Alvenaria; Patrimônio construído; Restauro; Conservação.

Introdução

O patrimônio construído possui importância cultural, social, arqueológica, estética, política e arquitetônica, sendo sua preservação vital tanto para a sociedade quanto para as gerações futuras (Warren, 2000). Além disso, tais construções apresentam um considerável potencial econômico, visto serem relevantes ao turismo local (Lourenço *et al.* 2006, Adriano *et al.* 2009). A conservação aliada ao estudo de estruturas antigas é um desafio visto a complexidade das construções históricas, uma vez que, além dos fatores estruturais e de serviço, tem-se a identidade arquitetônica a ser mantida (Oliveira, 2002).

Para que sejam classificadas como pertencentes do patrimônio construído, as estruturas devem fazer parte da herança histórica da arte de construir de um determinado período e local (Oliveira, 2002). Vale a pena mencionar que a significância cultural não se restringe aos aspectos arquitetônicos, mas também aos fatores construtivos, materiais e técnicas utilizadas (Friedman, 2010).

A cal aérea é um dos materiais de construção mais antigos, sendo um dos primeiros materiais a ser utilizado em argamassas aplicadas em juntas de paredes, revestimentos exteriores e na preparação de argamassas. A cal foi utilizada por diversas civilizações antigas, como por exemplo os Gregos (séc. VII a.C. a II a.C.), e mais tarde pelos Romanos (séc. III a.C. a V d.C.), que, nas grandes construções que empreenderam por todo o seu Império, expandiram e aperfeiçoaram as argamassas de cal com o uso de pozolana (Elsen, 2006). A cal aérea continuou a ser o ligante quase único em argamassas de alvenaria e de revestimento até que a cal hidráulica e o cimento fossem inventados respectivamente nos séculos XVIII e XIX (Elsen, 2006). No Brasil não foi diferente, uma vez que as técnicas construtivas que os portugueses trouxeram para o país eram similares às práticas do resto da Europa ocidental (Braga, 2003).

Há no cenário latino-americano e principalmente no brasileiro uma grande lacuna de conhecimento e estudos que abordem a temática das argamassas à base de cal aérea. Inúmeras construções estão em elevado estado de degradação e necessitam de monitoramento e restauro.

No Brasil, a existência de grandes conjuntos civis em alvenaria de cal e pedra, desde a segunda metade do séc. XVI pode ser atestada por ruínas como as da Torre de Garcia D'Ávila, construída perto de Salvador (Tatuapera), o Forte dos Reis Magos (Natal, RN), Forte de Nossa Senhora dos Remédios (Fernando de Noronha – PE) e Igreja da Matriz (Igreja Nossa Senhora dos Remédios (Paraty, RJ) (Braga, 2003) e Igreja de Santo Alexandre (Loureiro et al. 2015).

Outro fator importante que justifica o estudo desse tipo de argamassa está relacionado ao restauro e preservação de construções de históricas (Oliveira, 2016). De acordo com Faria *et al.* (2008) as intervenções devem apresentar a necessária compatibilidade com as alvenarias antigas (Crocì, 1998), uma vez que a utilização de materiais com propriedades diferentes pode comprometer a estrutura (Crocì, 1998, Matta, 2012). Nesse sentido, a busca pela caracterização das cales tornou-se um imperativo, visto que muitos problemas de incompatibilidade entre o existente e o restauro têm trazido prejuízos ao patrimônio histórico.

Nesse sentido, esse trabalho visa apresentar de forma geral conceitos e estudos que estão focados nesse campo de estudo, considerando aspectos relacionados à durabilidade e simulação do material bem como de estruturas construídas com o mesmo.

Contextualização

O uso de materiais ligantes nas construções é muito antigo, sendo o primeiro registro datado por volta de 12000 anos a.C. em Israel, por meio da reação natural de calcário e xisto, resultando em uma combustão espontânea e posteriormente em depósitos de compostos cimentantes (Kirca, 2004). Depois de outros registros de ocorrência natural, o uso de tais materiais passou a ser feito intencionalmente, sendo os povos da Assíria e Babilônia os pioneiros no uso de argamassa como ligante entre as rochas e tijolos artesanais de suas construções (Kirca, 2004). Os egípcios aprimoraram a tecnologia da fabricação de argamassa utilizando a cal na construção das pirâmides. No entanto, os gregos e romanos se destacaram na aprimoração da técnica fabricando estruturas de notável durabilidade (Kirca, 2004).

Diversos materiais foram utilizados na fabricação de argamassas ao longo da história (Oliveira, 2016). A manufatura da argamassa em edificações antigas consistia, primeiramente, em procurar por uma fonte de material bruto, como por exemplo o calcário/carbonato de cálcio. A tecnologia de extração formal da cal começou com a construção das pirâmides do Egito e posteriormente com a era da construção de Roma (Erdogan, 2002). A escolha do melhor material bruto era um processo de “tentativa e erro” e de registros empíricos, sendo a localização, transporte e mão de obra fatores também considerados para a escolha da fonte (Krumnacher, 2001).

Após a extração, tinha-se a etapa de calcinação, cuja função era converter o material bruto em cal viva por meio do aquecimento da massa rochosa em determinada temperatura. Ao calcinar, a água e o dióxido de carbono são liberados do material bruto. Os trabalhadores da época costumavam quebrar a rocha em pedaços menores de modo a aumentar a superfície de contato, queimando a rocha de calcário completamente e evitando comprometer o material, o qual quando queimado em pedaços grandes permaneciam inertes (Krumnacher, 2001). O ciclo da cal calcítica pode ser visto na Figura 1.

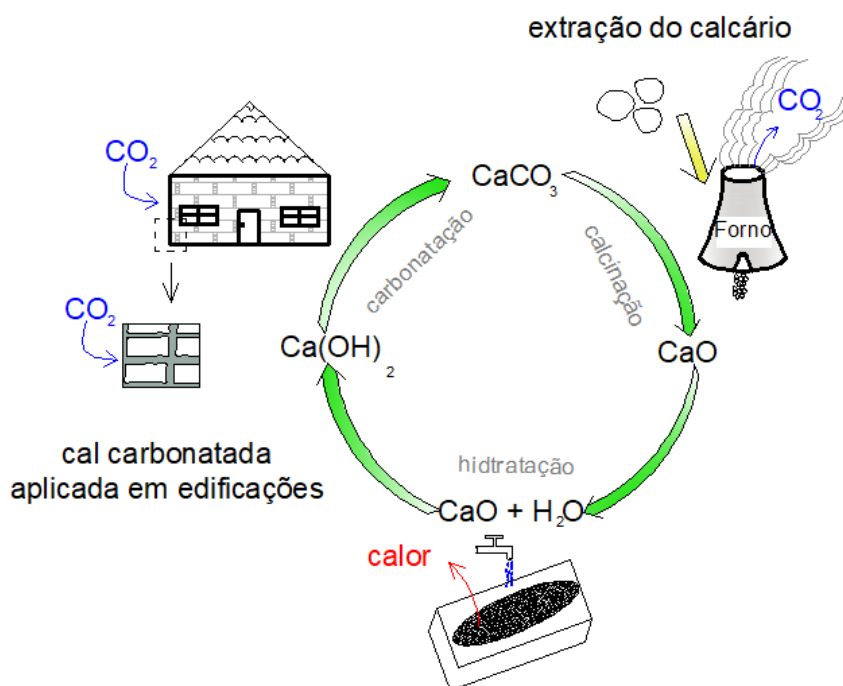


Figura 1 – Ciclo da cal calcítica

A hidratação ocorre com a mistura de água e formação de uma pasta de cal, tal etapa é fundamental para uso da cal na construção civil (Erdogan, 2002). Em Roma havia três formas de hidratar as massas de cal viva. A primeira era depositar água em uma proporção de 1/3 de água em relação à massa de cal, considerada a mais eficiente. A segunda consistia simplesmente em imergir a massa de cal em água por um determinado período definido empiricamente por “tentativa e erro”. E a terceira, resumia-se em expor a cal virgem ao ar de modo a absorver a umidade do ambiente (Krumnacher 2001, McKee 1971).

Quanto ao traço para criar a argamassa para união de rocha ou tijolo, os trabalhadores adicionavam agregado natural à mistura. Logo, a proporção da mistura era indispensável para o bom funcionamento do sistema construtivo idealizado. De acordo com McKee (1971), na Roma antiga havia três procedimentos de mistura para a formação da argamassa. O primeiro era a mistura seca de cal hidratada em pó, agregado natural e água. O segundo era adicionar à pasta de cal ainda úmida areia e água caso necessário. Por fim, o terceiro era análogo ao primeiro, porém com a utilização da cal ainda quente. Além disso, é importante mencionar que evitava-se ao máximo a exposição da argamassa ao ar para impedir a carbonatação e o seu correspondente endurecimento, sendo por isso aconselhada a mistura em áreas subterrâneas. Após tais processos, a cal era armazenada por pelo menos 3 anos antes da sua utilização (Nicholson, 1850).

Reprodução e durabilidade

O emprego de argamassa consiste em funcionar como um agente de ligação entre as unidades sólidas da alvenaria, nivelar superfícies desiguais, prover proteção à penetração de agentes agressivos e distribuir cargas ao longo da estrutura. Caso seja bem feita, tais funções são cumpridas amenizando as irregularidades dos blocos e reparando deformações plásticas durante a vida da edificação (Gimbert, 2008). Para que possam ser restauradas, as paredes de alvenaria de edificações históricas dependem dos diversos materiais e técnicas utilizadas no período de sua construção (rochas, tijolos, pozolanas, argamassas, etc.), da simulação do ambiente e de dados de possíveis intervenções prévias. No entanto, durante as últimas décadas, devido à grande mudança na forma de construir impulsionada pela indústria do cimento, tais materiais e técnicas tradicionais acabaram caindo em desuso, causando inclusive danos em edificações históricas em certas intervenções, por conta da incompatibilidade dos materiais cimentícios com as estruturas antigas (Moropoulou et al., 2005).

Poluição atmosférica e chuva ácida são notoriamente algumas das causas mais comuns da degradação de construções históricas (Lanas and Alvarez, 2003, Lanas et al. 2005, Price, 1996, Pérez Bernal and Bello López, 2004). No que se refere às causas físicas de degradação, o principal mecanismo é a presença de água e seu comportamento na alvenaria como evaporação, movimentações de fluxo por capilaridade, gelo-degelo, entre outros. Quanto aos ataques químicos, tem-se o ataque por sulfatos, reação álcalis-agregado, entre outros (Moropoulou et al. 2005, Collepardi, 1990).

A transferência dos poluentes da atmosfera para a superfície das estruturas de alvenaria pode ser dividida em dois grupos: depósito “seco” e depósito “úmido” (Lewis and McConchie, 1994). O depósito “seco” ocorre quanto há a absorção direta de gases e gases aerossol, enquanto o depósito “úmido”, além dos já citados, inclui também gotículas formadoras da chuva através da precipitação (Lewis and McConchie, 1994).

A fim de simular o dano proveniente de depósito ácido, é necessário conhecer a maneira como as taxas de decomposição se relacionam quantitativamente com fatores como concentração de poluentes e características meteorológicas (Lewis and McConchie, 1994).

A formulação matemática usada para medir tais parâmetros é chamada “Função dano” (Lewis and McConchie, 1994). A deterioração de estruturas reais, fora de um ambiente com condições conhecidas e controladas, se torna complexa quando se leva em conta os inúmeros mecanismos e circunstâncias ocorrendo simultaneamente. Além disso, os materiais utilizados são frequentemente desconhecidos (Moriconi et al. 1994).

Durabilidade é um dos aspectos mais críticos para análise e reprodução de argamassas históricas (Lanas et al. 2005, Lanas et al. 2006). Diversos estudos testaram amostras de argamassas sob diferentes condições ambientais. Os aspectos de durabilidades testados foram exposição à atmosfera urbana (Zappia et al. 1994, Boutin and Bromblet, 2000a, Boutin and Bromblet, 2000b) e poluentes (SO₂) (Sabbioni et al. 2002, Sabbioni et al. 2001, Martínez-Ramírez et al. 2002), intemperismo (Laycock, 2002) e ciclos de congelamento e descongelamento (Klemm and Klemm, 1997, Shao et al. 1997).

Como já mencionado, para uma conservação e restauração adequadas, o conhecimento dos materiais é essencial. Existe um número considerável de técnicas para caracterização de argamassas (Jedrzejska, 1960, Frizot, 1981, Dupas, 1981, Cliver, 1974, Moropoulou et al. 1995). No caso de edificações históricas haverá a dificuldade do número limitado de amostras coletadas, visto que muitas vezes é proibida a sua extração por restrições dos responsáveis. Somado a isso, o diagnóstico de uma estrutura antiga requer mais cuidados do que os de uma estrutura de concreto, devido às extensas exposições ao longo dos anos a ambientes, em sua maioria, desconhecidos (Moriconi et al. 1994, Binda and Saisi, 2009).

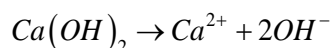
Algumas pesquisas recentes se encarregaram das situações com cal aérea (Cultrone et al. 2005, Collepari, 1990). Ademais, a literatura expõe o problema de degradação e restauro de paredes de alvenaria em edificações históricas (Elert et al. 2002, Cazalla et al. 2000, Collepari, 1990, Lawrence, 2006). Intervenções de restauro podem ocasionar erros e até mesmo causar aceleração da ruína de edificações antigas. No entanto, a compatibilidade dos materiais a longo prazo ainda não é totalmente entendida (Martinez and Carro, 2007, Torgal et al. 2012, Sasse and Sneath, 1997). A avaliação de compatibilidade entre os materiais é, em sua maioria, baseada em resultados feitos em ambiente laboratorial, o qual difere muito da realidade (Lawrence, 2006). Tal avaliação não pode ser considerada um caminho confiável para estimar compatibilidade desses sistemas construtivos.

A composição das argamassas varia de acordo com os tipos e quantidades de agregado, ligante e adições. Análises da composição de argamassas tradicionais indicam um traço rico, com quantidades de ligante entre 1:1 e 1:2,5 (razão ligante: agregado, em volume) assim como aparência esbranquiçada e nódulos de ligante, indicando que ocorriam adições de material à mistura conforme necessidade (Lawrence, 2006, Forster, 2004b, Forster, 2004a). Tais “nódulos” apareciam com aparência de pó seco, aglomerados de cal, precipitação da cal ou inclusões ainda quentes da cal. Algumas adições orgânicas e inorgânicas também foram usadas na preparação das argamassas ao longo da sua história. Na pesquisa desenvolvida por Gimbert (2008), o autor listou diversos materiais pouco usuais como cevada, cerveja, sangue, manteiga e outros derivados do leite, algodão, urina, cabelos, entre outros.

O processo de carbonatação

A carbonatação duma argamassa de alvenaria espessa pode levar séculos até ser completa (Cowper 1998; Ferretti e Bažant 2006; Oliveira 2015). Na frente de carbonatação, ocorrem ao longo dos anos modificações na distribuição interna de tensões nos elementos estruturais (Oliveira 2016; Oliveira, Azenha et al. 2017). Focando-se no processo de carbonatação, o CO₂ difunde-se através da cal e dissolve-se na água formando o ácido carbônico (Lawrence 2006; Lawrence, Mays et al. 2007; Oliveira 2016). A taxa de carbonatação depende de diversos fatores, como a concentração de CO₂, a pressão do ar, o teor de umidade da argamassa, a umidade ambiente, temperatura, entre outros (Moorehead 1986; Van Balen e Van Gemert 1994; van Zijl, de Borst et al. 2001; Van Gerven, Cizer et al. 2009; Pesce 2014; Oliveira 2016; Oliveira, Azenha et al. 2016; Oliveira, Azenha et al. 2017) Outro fator relevante diz respeito à idade de argamassa (Cazalla, Nvarro et al. 2000; Elert, Carlos Rodriguez-Nvarro et al. 2002). Durante o processo de carbonatação, existem cinco estágios principais desenvolvidos (Lawrence 2006; Lawrence, Mays et al. 2006; Andrejkovicova, Ferraz et al. 2012; Oliveira 2016; Oliveira, Azenha et al. 2017):

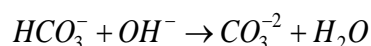
1. Difusão do CO₂ através dos poros da argamassa;
2. Dissolução do CO₂ na água presente dos poros;



3. Dissolução do Ca(OH)₂ na água dos poros:



4. Equilíbrio químico do CO₂ dissolvido na água dos poros:



5. Precipitação do CaCO₃

O processo de carbonatação afeta diretamente as características da argamassa, uma vez que a microestrutura do material é alterada com a precipitação do CaCO₃, como mostrado acima. Fatores como a porosidade, a permeabilidade e a difusibilidade de fluidos são diretamente afetadas durante a evolução do fenômeno (Houst, Sadouki et al. 1993; Houst e Wittmann 1994; Houst 1996; 2003; Lawrence 2006; Lawrence, Mays et al. 2007). A distribuição do tamanho dos poros também sofre alterações (Lawrence 2006; Izaguirre Lanas et al. 2010, Oliveira, 2016).

No tocante à correlação entre a carbonatação carbonatação (Heriques, Rato et al. 2004; Lawrence 2006; Gimbert 2008; Verstryngge, Schueremans et. al. 2009) e propriedades mecânicas, diferentes conclusões foram obtidas, mas todas indicam o aumento da resistência e do módulo de elasticidade com o progresso da Arizzi, Martínez et. Al. 2011; Arizzi e Cultrone 2013; Scanell, Lawrence et al. 2014; Oliveira 2015; Oliveira, Azenha et al. 2016).

No que tange à modelagem matemática da previsão da carbonatação, modelos de diferentes complexidades são apresentados na literatura (Oliveira, 2016).

Diferentes técnicas de medição utilizadas para a avaliação do fenómeno (fenolftaleína, análise termogravimétrica entre outras) (Oliveira, 2016).

Estudos de reprodução

Na pesquisa desenvolvida por Moropoulou et al. (2005), os autores estudaram argamassas para restauro com composição química similar de ligantes, agregados e adições em argamassas antigas. Entre os materiais testados, estavam pasta de cal, cal em pó e cal hidráulica. Várias misturas foram testadas no laboratório e suas propriedades químicas e mecânicas foram investigadas. O tempo de cura preciso foi estimado por meio do tempo de endurecimento e da estabilidade física e química do sistema. Segundo aqueles autores, as amostras apresentaram taxas de endurecimento muito lentas, com exceção das argamassas com cal hidráulica em sua composição e com adição de pozolanas. Quanto ao comportamento mecânico, as argamassas que mostraram melhor desempenho foram as com o pó de cal. Além disso, Moropoulou et al. (2005) referem a necessidade de estudar outros fatores como o módulo de elasticidade.

Em estudos recentes, alguns autores testaram como a variação do traço afeta as propriedades das argamassas. O autor Teutonico et al. (1993), utilizou traços em termos de volume de 1:2,5 e 1:3, enquanto Baronio et al. (1999), inicialmente tentaram um traço de 1:5 cujos resultados foram mal sucedidos e, por conta disso, utilizaram o traço 1:3. Lanas e Alvarez (2003) por sua vez, tentaram diminuir essa proporção para 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4, obtendo resultados interessantes no que diz respeito à durabilidade. Lawrence (2006), repetiu alguns traços utilizados por Lanas e Alvarez (2003) e Válek e Matas (2010) variaram os traços de 1:0,9 a 1:3 (mistura mais comum). Margalha et al. (2011), diferente das outras referências citadas, adotaram o traço em termos de massa sendo as proporções com melhores resultados 1:13 (usual) e 1:5 (rico). Além disso, o autor fez análises de tempos de cura, variando-os em 1, 7, 45 e 90 dias e obtendo resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão e à flexão, suscetibilidade à fissuração e absorção de água.

Recentemente, Oliveira (2016) também utilizou o traço de 1:3, estudando a evolução de diferentes propriedades das argamassas como a secagem, a carbonatação e as propriedades mecânicas. Considerando que as argamassas de cal aérea provaram ao longo dos séculos ser compatíveis e suportarem severas condições mecânicas e ambientais, os materiais para a restauração devem ser capazes de replicar o comportamento de materiais históricos o mais próximo possível (Oliveira, 2016).

Acidentes Estruturais em Construções Históricas

O comportamento mecânico de estruturas antigas de alvenaria é complexo e depende de muitos fatores incluindo a idade, a composição da argamassa, o tipo de ligante, as condições ambientais e outros (Brooks e Bakar, 2004). Danos e colapsos de monumentos ao longo dos últimos anos produziram registros observando as medidas dos movimentos internos em alvenaria, principalmente nos casos em que se sabe que a estabilidade da fundação permanece intacta (Gimbert, 2008, Anzani et al. 2005, Anzani e Binda, 2013).

A influência do tempo no comportamento estrutural e na deformação de alvenarias históricas tornou-se ainda mais clara e importante após o súbito fracasso da Torre Cívica de Pavia em 17 de março de 1989 (Anzani e Binda, 2013, Oliveira, 2016) (ver Figura 2). Outros exemplos de acidentes indicam aspectos estruturais e comportamentos semelhantes ao caso citado, em que os danos poderiam ser potencialmente induzidos por comportamentos dependentes do tempo (Anzani e Binda, 2013, Gimbert, 2008), em sinergia com a complexa distribuição de tensões.

Diversos casos de ruptura de alvenarias históricas podem ser visualizados na literatura, por exemplo, em Oliveira (2016) e Anzani e Binda (2013).



Figura 2 – Torre Cívica de Pavia – Antes e depois do colapso (adaptado de Oliveira 2016)

No que tange à argamassa de cal aérea, a complexidade é ainda maior uma vez que as propriedades mecânicas evoluem lentamente, dado que estão diretamente relacionadas ao processo de carbonatação (Gimbert 2008; Anzani et al. 2005; Anzani e Binda, 2013), que como mostrado anteriormente acontece de forma lenta.

Conclusões

Notoriamente, as argamassas de cal aérea, são conhecidas como as mais compatíveis para a aplicação em edifícios antigos, cuja alvenaria e revestimentos foram baseados nesse material. No intuito de se obter o conhecimento necessário para o uso na conservação e reabilitação, muitos estudos científicos e técnicos já foram desenvolvidos. Atualmente já se faz possível acessar diversas informações básicas para a execução e aplicação de argamassas de cal. Há ainda lacunas de conhecimento que merecem atenção, como por exemplo no tocante à explícita modelagem multi-física do material e do comportamento a longas idades, entretanto é consenso geral a importância de se utilizar materiais compatíveis na restauração de construções antigas.

Especificamente no tocante ao cenário brasileiro, inúmeras construções estão em elevado estado de degradação e a omissão do poder público bem como a pouca atenção da sociedade para esses casos caracterizam o cenário. Nesse sentido, esse trabalho é parte de um estudo que se inicia no Brasil, cujo objetivo principal é aprimorar e disseminar os conhecimentos, visando atender a demanda social, arquitetônica, cultural, econômica e histórica da melhor preservação das construções históricas.

Referências bibliográficas

- Adriano, P. Santos Silva, A. Veiga, R. Mirão, J. and Candeias, A. E. (2009). "Microscopic characterisation of old mortars from the Santa Maria Church in Évora." *Materials Characterization*, 60 (7), 610-620.
- Andrejkovicova, S. E. Ferraz, et al. (2012). "Air Lime Mortars with Incorporation of Sepiolite and Synthetic Zeolite Pellets." 9 (1), 79-91
- Anzani, A. Binda, L. and A. T. (2005). "Application of a dam–age model to the study of the long term behaviour of ancient towers." In: 1st Canadian Conference on Effective Design of Structures, 2005, Ontario, Canada.
- Anzani, A. and Binda, L. (2013). Evolution of the crack–pattern as a visible effect of long term damage. Available: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/ICF11/paper/viewFile/10598/9946> [Accessed 12-11-2013].
- Arizzi, A. and G. Cultrone (2013). "The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 46(4), 507-520.
- Arizzi, A. J. Martínez Martínez, et al. (2011). "Mechanical Evolution of Lime Mortars During the Carbonation Process." *Key Engineering Materials* 465, 483-486.
- Baronio, G. Binda, L. and Saisi, A. (1999). "Mechanical and physical behaviour of lime mortars reproduced after the characterisation of historic mortar." In: C. Groot and J. J. Hughes P. Bartos, ed. *International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, 1999, Paisley, Scotland. RILEM, 307-325.
- Binda, L. and Saisi, A. (2009). "Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures " In: *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering June 30th – July 3rd 2009, Nantes, France*.
- Boutin, F. and Bromblet, P. (2000a). "Durability of materials used in the replacement of sculptures in historical monuments." In: *CANMET/ACI International conference on durability of concrete, June 4-9, 2000, Barcelone, Spain*. 647-661.
- Boutin, F. and Bromblet, P. (2000b). "Evaluation of materials used in the replacement of sculptures in historical monuments, Weathering of natural stone: causes, mechanism and measurement of stone damage." In: *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 2000, Venice, Italy*, 31–39.
- Braga, M. (2003). "Conservação e Restauro, Arquitetura, Livro 03." 1 Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Editora Rio
- Brooks, J. J. and Bakar, B. H. A. (2004). "Shrinkage and creep of masonry mortar." *Materials and Structures*, 37 (3), 177-183.
- Cazalla, O. C. Navarro, et al. (2000). " Aging of lime putty: Effects on traditional lime mortar carbonation." *Journal of American Ceramic Society* 83, 1070–1076.
- Colleparidi, M. (1990). "Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings." *Materials and Structures*, 23 (2), 81-102.
- Cowper, A. D. (1998). *Lime and lime mortars*, Shaftsbury: Donhead Publishing Ltd.
- Cliver, E. B. (1974). "Tests for the Analysis of Mortar Samples." *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 6, 68-73.
- Croci, G. (1998). "The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage." *Computational Mechanics Publications*.

- Cultrone, G. Sebastián, E. and Huertas, M. O. (2005). "Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes." *Cement and Concrete Research*, 35 (12), 2278-2289.
- Dupas, M. (1981). "Methodes d'analyse chimique appliques a l'etude de l'alteration et de la conservation des materiaux pierreux." In: *Centro conservazione sculture all'aperto*, ed. The conservation of stone, 1981, Bologna, 45-464.
- Elert, K. Carlos Rodriguez-Navarro, et al. (2002). "Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings." *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works* 47(1), 62-75.
- Elsen, J. (2006). "Microscopy of historic mortars-a review." *Cement and Concrete Research*, 36 (8), 1416-1424.
- Erdogan, T.y. 2002. *Materials of Construction*. Ankara: METU Press.
- Faria, P., Henriques, F. and Rato, V. (2008). "Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation." *Journal of Cultural Heritage*, 9 (3), 338-346.
- Ferretti, D. and Z. P. Bažant (2006). "Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect." *Cement and Concrete Research* 36(7): 1379-1388.
- Friedman, D. (2010). *Historical Building Construction: Design, Materials, and Technology.* Second Edition. W. W. Norton & Company.
- Forster, A. M. (2004b). "The Scottish Experience of Lime Mortars, Renders and Harling." *International Journal for Restoration*, 10 (6), 637-647.
- Forster, A. (2004a). "Hot-Lime Mortars: A Current Perspective." *Journal of Architectural Conservation*, 10 (3), 7-27.
- Frizot, M. (1981). "Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. Mortiers, ciments et coulis utilises dans la conservation des batiments historiques. ." In: *Symposium*, 3-6 Nov 1981, Rome.
- Gimbert, S. J. (2008). *A Combined Empirical and Computational Approach to Creep in Replicas of Historic Mortar*, Pennsylvania State University at University Park.
- Henriques, F. M. A. V. M. Rato, et al. (2004). *The influence of grain size distribution on the performance of mortars. Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone.* e. D. Kwiatkowski and R. Lifvendahl. Stockholm: ICOMOS: 1001-1008.
- Houst, Y. F. (1996). "The role of moisture in the carbonation of cementitious materials." *International Journal for Restoration of Buildings Monuments* 2, 49-66.
- Houst, Y. F. H. Sadouki, et al. (1993). *Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO₂ and O₂. Interfaces in Cementitious composites.* R. P. P. 18. Toulouse, London, etc: E & F SPON, 279-288.
- Houst, Y. F. and F. H. Wittmann (1994). "Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste." *Cement and Concrete Research* 24(6), 1165-1176.
- Izaguirre, A. J. Lanás, et al. (2010). "Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment." *Cement and Concrete Research* 40(7), 1081-1095.
- Jedrzejewska, H. (1960). "Old Mortars in Poland: A New Method of Investigation." *Studies in Conservation*, 5 (4), 132-138.
- Kirca, O. and Erdem, T. K. (2004). "An experimental study on the construction materials of the Ankara Citadel." In: C. Modena, P. B. Lourenco and P. Roca, eds. *4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, 2004, Padova, Italy. Taylor & Francis, 223-230.

- Klemm, A. J. and Klemm, P. (1997). "The effects of the alternate freezing and thawing cycles on the pore structure of cementitious composites modified by MHEC and PVA." *Building and Environment*, 32 (6), 509-512.
- Krumnacher, P.J. 200 I. Lime and Cement Technology: Transition form Traditional to Standardized Treatment Methods, MSc's Thesis in Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. McKee, H.J. 197 1. Early American Masonry Materials in Walls, Floors and Ceiling: Notes on Prototypes, Sources, Preparation and Manner of Use. NY.
- Lanas, J. and J. I. Alvarez (2003). "Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior." *Cement and Concrete Research* 33(11), 1867-1876.
- Lanas, J. Sirera, R. and Alvarez, J. I. (2005). "Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments." *Thermochimica Acta*, 429 (2), 219-226.
- Lanas, J. Sirera, R. and Alvarez, J. I. (2006). "Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions" *Cement and Concrete Research*, 36 (5), 961-970.
- Lawrence, R. M. T. J. Mays, et al. (2007). "Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars." *Cement and Concrete Research* 37(7), 1059-1069.
- Lawrence, R. M. H. (2006). A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars. Department of Architecture and Civil Engineering. Bath, University of Bath. Doctor of Philosophy, 316.
- Lawrence, R. M. H. T. J. Mays, et al. (2006). "Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis." *Thermochimica Acta* 444(2), 179-189.
- Laycock, E. A. (2002). "Ten years of frost testing at Sheffield Hallam University." *Construction and Building Materials*, 16 (4), 195-205
- Lourenço, P. B. Luso, E. and Almeida, M. G. (2006). "Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal." *Building and Environment*, 41 (2), 223-234.
- Loureiro, A. M. S. Angélica, R. S. Sanjad, T. A. B. C. Oliveira, M. M. and Costa, M. L. (2015). "The salt efflorescence in the Church of Santo Alexandre, Belém - PA." *Ambiente Construído*, 3 (15), 71-84.
- Lewis, D. W. and McConchie, D. (1994). "Analytical sedimentology." 2. New York:Chapman & Hall.
- Matta, S. L. (2012). "Caracterização de Argamassa Antiga: Estudo de caso: Casa Amarela — Unidade Municipal de Educação Infantil — UMEI Timbiras." *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Margalha, G. Veiga, R. Silva, A. S. and de Brito, J. (2011). "Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method." *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 796-804.
- Martinez, M. C. I. and Carro, G. A. (2007). "Ancient building requirements and the evaluation of different lime-cement mortars compositions." In: 2 Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, 22 - 23 November 2007, Lisbon, Portugal.
- Martínez-Ramírez, S. Zamard A. Thompson G. E and E. M. B. (2002). "Organic and inorganic concrete under SO₂ pollutant exposure " *Building and Environment*, 37 (10), 933-93.
- Moorehead, D. R. (1986). "Cementation by the carbonation of hydrated lime." *Cement and Concrete Research* 16(5), 700-708.
- Moriconi, G. Castellano, M. G. and Collepardi, M. (1994). "Mortar deterioration of the masonry walls in historic buildings. A case history: Vanvitelli's Mole in Ancona." *Materials and Structures*, 27 (7), 408-414.

- Moropoulou, A. Bakolas, A. Moundoulas, P. Aggelakopoulou, E. and Anagnostopoulou, S. (2005). "Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries." *Cement and Concrete Composites*, 27 (2), 289-294.
- Moropoulou, A. Bakolas, A. and Bisbikou, K. (1995). "Characterization of ancient –Byzantine and later historic mortars by thermal and X–ray diffraction techniques." *Thermochimica Acta*, 269-270, 779–795.
- Nicholson, P. 1850. *Encyc/opaedia of Architecture: A Dictionary of the Science and Practice of Architecture, Building, Carpentry, ele. From the Earliest Ages to the Present Time.*, Vol.2. NY: Johnson Fry Co.
- Oliveira, M. A. (2016). *A Multi–Physics Approach Applied to Masonry Structures with Non–Hydraulic Lime Mortars*. Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Portugal, Universidade do Minho. PhD Thesis, 345.
- Oliveira, M. A. M. Azenha, et al. (2016). Study of the evolution of carbonation in aerial lime mortars V Fical - FICAL – FORUM IBÉRICO DA CAL. Lisbon, 10.
- Oliveira, M. A. M. Azenha, et al. (2017). "Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar." *Construction and Building Materials* 148, 38-48.
- Oliveira, D. V. C. (2002). "Experimental and Numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading." PhD thesis, University of Minho.
- Pacheco Torgal, F. Miraldo, S. Labrincha, J. A. and De Brito, J. (2012). "An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC." *Construction and Building Materials*, 36 (0), 141-150.
- Pesce, G. L. (2014). *Study of carbonation in novel lime based materials*. Department of Architecture and Civil Engineering. Bath, England, University of Bath. Doctor of Philosophy,.
- Pérez Bernal, J. L. and Bello López, M. A. (2004). "Dióxido de azufre. Química atmosférica y destrucción del patrimonio (in Spanish)." Seville: Fundación El Monte
- Price, C. A. (1996). "Stone conservation: an overview of current research." Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Sabbioni, C. Zappia, G. Riontino, C. Blanco-Varela, M. T. Aguilera, J. Puertas, F. Balen, K. V. and Toumbakari, E. E. (2001). "Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars." *Atmospheric Environment*, 35 (3), 539-548.
- Sabbioni, C. Bonazza, A. and Zappia, G. (2002). "Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal." *Journal of Cultural Heritage*, 3 (1), 83-88.
- Sasse, H. R. and Snethlage, R. (1997). "Methods for the evaluation of stone conservation treatments." In: N. S. and Snethlage Baer, R. ed. *Saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures*, 1997, Chichester. John Wiley & Sons, 223-243.
- Scannell, S. M. Lawrence, et al. (2014). "Impact of Aggregate Type on Air Lime Mortar Properties." *Energy Procedia* 62(0), 81-90.
- Shao, Y. Lynsdale, C. J. Lawrence, C. D. and Sharp, J. H. (1997). "Deterioration of heatcured mortars due to the combined effect of delayed ettringite formation and freeze/thaw cycles." *Cement and Concrete Research*, 27 (11), 1761-1771.
- Teutonico, J. M. McCaig, I. Burns, C. and Ashurst, J. (1993). "The Smeaton Project: Factors Affecting the Properties of Lime-Based Mortars." *APT Bulletin*, 25 (3/4), 32-49.
- Válek, J. and Matas, T. (2010). "Experimental study of hot mixed mortars in comparison with lime putty and hydrate mortars." In: C. Groot and J.J. Hughes J. Válek, ed. *2nd Conference on Historic Mortars - HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop*, 2010, Prague. RILEM Publications SARL.

- Van Balen, K. and D. Van Gemert (1994). "Modelling lime mortar carbonation." *Materials and Structures* 27(27), 393-398.
- Van Gerven, T. O. Cizer, et al. (2009). *Mineral Carbonation at K.U.Leuven. 1st International Slag Valorisation Symposium. Leuven, Belgium, 6-7/4/2009*, 12 p.
- Van Zijl, G. P. A. G. R. de Borst, et al. (2001). "The role of crack rate dependence in the long-term behaviour of cementitious materials." *International Journal of Solids and Structures* 38(30–31), 5063-5079.
- Verstrynge, E. L. Schueremans, et al. (2009). "Monitoring and predicting masonry's creep failure with the acoustic emission technique." *NDT & E International* 42(6), 518-523.
- Warren, M. (2000). "Economic Analysis for Property and Business." First Edition. Butterworth-Heinemann, Routledge.
- Zappia, G. Sabbioni, C. Pauri, M. G. and Gobbi, G. (1994). "Mortar damage due to airborne sulfur compounds in a simulation chamber." *Materials and Structures*, 27 (8), 469-473.



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

**Cal en restauración /
Nanocales y aditivos**

Aditivos de origen natural: su influencia en la reactividad y propiedades de morteros de cal aérea e hidráulica

Dafne Bandín Martínez^(1,2), Ester De Lara Jareño, Anna Arizzi^(1,2), Eduardo Sebastián Pardo^(1,2).

(1) Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002, Granada

(2) Tesela Materiales, Innovación y Patrimonio SL, CTT. Oficina Transferencia Tecnológica (OTRI), C/Gran Vía de colón, 48, 5º 2, 18010, Granada

Resumen

Estudios previos han demostrado que las cales industriales tienen peor plasticidad cuando están mezcladas con agua en comparación con cales en pasta fabricadas de forma artesanal, lo que se traduce en una mayor retracción. En las últimas décadas se han estudiado una gran cantidad de aditivos plastificantes con el objetivo de mejorar la plasticidad de estas cales industriales. En este estudio, se ha investigado por primera vez la influencia del uso de aditivos de origen natural (polisacáridos de cadena larga) en la plasticidad y reactividad de pastas de cales fabricadas industrialmente. En la primera etapa del estudio, se ha evaluado la evolución de la mineralogía de mezclas aditivo-cal durante el proceso de fraguado y se ha observado que estos aditivos no retrasan las reacciones de carbonatación e hidratación de la cal. En la segunda etapa se han elaborado morteros que se han caracterizado en estado fresco y endurecido, para evaluar las características mineralógicas, las propiedades texturales y físico-mecánicas y la durabilidad de estos morteros, las cuales no se ven modificadas por la presencia de aditivo. El hialuronato de sodio ha demostrado inducir una mejora en la plasticidad de las pastas de cal aunque esto no refleja una reducción de la retracción de los morteros. Por ello, es necesario investigar el comportamiento de morteros elaborados con dosificaciones más altas del mismo aditivo.

Palabras clave: Cal; Aditivos; Plasticidad; Carbonatación; Fraguado.

Introducción

El empleo de la cal como material aglomerante en la fabricación de morteros ha sido una constante a lo largo de la historia y su uso se ha transmitido a numerosas civilizaciones y expandido a través de diversas áreas geográficas [Moropoulou et al., 2005]. Además, en los últimos años se ha generado una corriente de revalorización de dicho material, debido en parte a la compatibilidad característica de los morteros de cal con los elementos de fábrica y a las prestaciones que estos ofrecen: favorecen la transpiración de la piedra, aumentan la resistencia mecánica con el tiempo, en tanto que el proceso de carbonatación se da de forma lenta y gradual desde el exterior al interior, no generan eflorescencias salinas, se pueden aplicar a una gran variedad de soportes gracias a su elasticidad y además, son óptimos aislantes térmicos, hídricos y acústicos [Ancade, 2011]. De hecho, existen numerosas publicaciones sobre las ventajas del empleo de la cal como material constructivo, fundamentalmente para morteros de restauración [Luque et al., 2010; Aalil et al., 2017].

Asimismo, diversos estudios han demostrado las ventajas del uso de pastas de cal artesanales o “cales añejas” en comparación con las cales en pasta obtenidas a partir de cales en polvo industriales, tanto por la mejora de sus propiedades mecánicas en el tiempo [Cazalla et al., 2000] como por la mejora de sus propiedades reológicas y plásticas en estado fresco [Ruíz-Agudo y Rodríguez-Navarro, 2010; Navrátilová et al. 2017]. Recientemente, también se está experimentando de forma global, un profuso y creciente interés por el empleo de materiales ecológicos, de origen natural, capaces de degradarse y no generar residuos tóxicos, que mantengan una relación sostenible con el entorno. En este sentido, varios científicos han investigado las ventajas e inconvenientes del uso de aditivos naturales en morteros a base de cal [Izaguirre et al., 2011; Ventolà et al., 2011; Khalid et al., 2018], e incluso, el uso de aditivos en materiales de construcción supone una práctica muy frecuente y apreciada por dicho sector [Hendricks, 2009].

Este estudio se enfoca únicamente en aditivos naturales capaces de aumentar la plasticidad de los morteros en estado fresco, elaborados a partir de cal en polvo, de forma que mejore su trabajabilidad y se reduzca la retracción durante su endurecimiento. Este suceso está íntimamente relacionado con la capacidad de retención de agua tanto de la cal como del árido, la superficie específica y el grado de aglomeración de las partículas [Rodríguez-Navarro et al., 2005]. De hecho, numerosos estudios revelan que el empleo de polisacáridos mejora las capacidades plásticas y gelificantes, en términos de reología y viscosidad del fluido [Vieira et al., 2004; Kulicke et al. 2008; Morais et al., 2013]. Los aditivos aplicados en el presente estudio para reducir la contracción sufrida por los morteros a base de cal han sido tres polisacáridos naturales, conocidos como Agar-Agar, Alginato sódico y Hialuronato sódico, en tanto que sus propiedades de hidrogel apoyan el propósito de usarlos como plastificantes y aditivos reductores de la retracción en morteros a base de cal [Oerther et al., 1999; Park y Lee, 2011; Fakhari et al., 2013].

Este estudio es parte de un trabajo de investigación más amplio en el que se estudia la influencia del empleo de diversos aditivos polisacáridos en la reactividad y plasticidad de morteros de cal. Asimismo se evalúa el proceso de carbonatación de las pastas de aditivo-cal a 7,15 y 28 días de fraguado, la trabajabilidad de los morteros en estado fresco, la retracción experimentada tras 28 días de endurecimiento y, finalmente, el estudio petrofísico de dichos morteros mediante caracterización mineralógica y textural de los mismos, determinación de sus propiedades hídricas y físico-mecánicas y evaluación de su durabilidad frente a ataque de sales y ciclos de hielo- deshielo.

Dado que esta comunicación no puede abarcar la totalidad del trabajo, se presenta el estudio del proceso de endurecimiento y fraguado de pastas de cal preparadas con dos aglomerantes (cal aérea y cal hidráulica) y tres aditivos (Agar-agar, AA; alginato sódico, AL; y, hialuronato de sodio, HA), pero solo se proporcionan los resultados del estudio realizado sobre los morteros preparados con uno de los tres aditivos, el hialuronato de sodio (HA).

Procedimiento experimental y Metodología de estudio

Materias primas

Para la elaboración de las pastas de cal se han usado las siguientes materias primas: cal aérea hidratada en polvo (CL90-S, fabricada por ANCASA, Sevilla) y cal hidráulica natural (NHL3.5, fabricada por SOCLI, Italcementi Group) [UNE-EN 459-1, 2011]; agar-agar granular (AA), proporcionado por Merck KGaA; alginato de sodio (AL) y hialuronato de sodio (HA), ambos en forma de polvo y proporcionados por Shangai International'CO Ltd.

Elaboración y estudio de pastas aditivo- cal

Se han elaborado 3 réplicas de cada una de las muestras de aditivo-cal y así como de la muestra de referencia. Una vez pesados en seco los dos tipos de cales empleadas, así como los aditivos propuestos (AA, AL, HA), se preparó la suspensión de aditivo en agua, y sin dejarla reposar, para evitar la formación de estructuras coloidales, se le añade instantánea y gradualmente la cal en polvo. Es importante resaltar que para la preparación y criterios de dosificación de las distintas pastas aditivo-cal se ha tenido en cuenta el comportamiento reológico de las diferentes mezclas aditivo-cal en función del proceso de preparación adoptado (mezcla y disolución), la proporción de aditivo-cal y la cantidad de agua. Previamente a este estudio, de hecho, se realizaron 70 medidas reológicas sobre suspensiones de cal y aditivo preparadas con distintos procedimientos de mezcla y distintas concentraciones cal:aditivo:agua. Se observó que los valores más altos de viscosidad se alcanzan en las suspensiones preparadas pre-mezclando el aditivo con agua antes de la adición de la cal (tanto para CL90S como para NHL3.5)⁵.

La concentración de aditivo en agua (% masa) de las suspensiones de cal aérea han sido 0,020, 0,035 y 0,006 para AA, AL y HA, con una proporción cal:agua de 1:1,3 en peso. Mientras que, las suspensiones de cal hidráulica, se han preparado con dos proporciones distintas tanto de cal como de aditivo en agua: una de 1:0,7 cal:agua en peso con una concentración de aditivo en agua (% masa) de 0,035, 0,035 y 0,006 para AA, AL y HA, respectivamente; y otra, de 1:0,8 cal:agua en peso con una concentración de aditivo en agua (% masa) de 0,020 para HA.

Con objeto de conocer en profundidad el proceso de carbonatación y fraguado de las diferentes mezclas aditivo-cal, se ha procedido a la caracterización mineralógica y textural de las mismas a 7, 15 y 28 días de curado. En primer lugar, se ha identificado y semi-cuantificado las fases minerales presentes en las muestras mediante análisis por difracción de Rayos X (DRX), con un difractómetro de polvo Panalytical X'Pert PRO MPD, con rendija automática. Las condiciones experimentales han sido: radiación Cu K α ($\lambda \approx 1.5405 \text{ \AA}$); Voltaje de 40 kV; intensidad de corriente de 40 mA; área explorada entre $2\theta = 3-70^\circ$; velocidad del goniómetro de $0.01^\circ 2\theta/s$. Para la interpretación de los resultados se ha usado el software X Powder[®] [Martín Ramos, 2004], y la base de datos P2D2.

A continuación, se caracterizaron texturalmente las muestras mediante Microscopía Electrónica de Barrido de alta resolución por Emisión de Campo en un equipo AURIGA (FIB-FESEM) de Carl

⁵ Arizzi A., Banfill P. Artículo en revisión.

Zeiss SMT, para observar la morfología de las fases minerales presentes en las mezclas aditivo-cal tras 28 días de curado, es decir, las diferencias de forma y tamaño de las partículas tanto cristalinas como amorfas involucradas en las reacciones de carbonatación e hidratación, así como la textura y el grado de adhesión entre las partículas de aditivo y las de cal. Las muestras se metalizaron con carbono antes de la observación.

Elaboración y estudio de los morteros

La preparación de los morteros se ha llevado a cabo con las mismas cales empleadas para la elaboración de las pastas anteriores y un árido silíceo normalizado CEN según [UNE-EN 196-1, 2005] con una distribución granulométrica, ϕ : 0,08 – 2 mm, en una proporción cal-árido 1:2 en volumen, y una proporción cal-agua, 1:1,3 en peso para la cal aérea y 1:0,8 en peso para la cal hidráulica. El polisacárido seleccionado ha sido el Hialuronato sódico, con una concentración en agua (% masa) de 0,006 para el mortero de cal aérea y 0,020 para el de cal hidráulica. Las probetas se elaboraron según los estándares europeos de la construcción, conforme a normativa [UNE-EN 1015-2,1999]. En total, se prepararon 6 réplicas o probetas prismáticas de 4x4x16 cm para cada uno de los morteros y se curaron durante 28 días a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ y HR = $60 \pm 5\%$ para morteros de cal aérea y HR = $90 \pm 5\%$ para morteros de cal hidráulica.

El estudio de los morteros se ha llevado a cabo en dos etapas. En la primera etapa se determina la consistencia del mortero en estado fresco mediante el cálculo de su densidad aparente según [UNE-EN 1015-6, 1999] y ensayo de escurrimiento en mesa de sacudidas conforme a [UNE-EN 1015-3, 1999]. La última etapa engloba el estudio de los morteros tras 28 días de curado. Durante esta última fase se diferenció entre zona interna y zona externa de cada una de las probetas, para así poder estimar las diferencias existentes respecto a la profundidad de la carbonatación/hidratación de las diferentes muestras de mortero. La retracción por secado o reducción volumétrica experimentada por las probetas de mortero durante el proceso de endurecimiento se determinó midiendo la variación de tamaño de cada una de ellas en las tres direcciones del espacio.

El estudio mineralógico mediante DRX, se hizo en las mismas condiciones de trabajo descritas anteriormente. El estudio del sistema poroso mediante porosimetría de intrusión de mercurio (PIM) para un rango de tamaño de poro de 0.001- 360 μm , ha permitido conocer la porosidad total abierta, la distribución del tamaño de poro y las densidades, real y de bulk, de cada tipo de mortero. Las muestras se secaron en estufa a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 8 horas previamente a su análisis en un porosímetro Micromeritics Autopore III 9410.

Para estudiar el comportamiento hídrico de cada mortero se llevaron a cabo ensayos de capilaridad, absorción libre y desorción de agua. Las muestras se secaron en estufa a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 8 horas previamente al análisis. El ensayo de capilaridad se realizó sobre tres probetas de 4x4x16 cm según [UNE-EN 1925, 1999], controlando la variación de masa y altura del frente capilar de cada probeta en el tiempo. El coeficiente de capilaridad (C_c) se ha obtenido a partir de la pendiente de la curva que representa la variación en peso por unidad de superficie en función de la raíz cuadrada del tiempo. Los ensayos de absorción libre y desorción de agua, conforme a [UNE- EN 13755, 2002] y [NORMAL 29/88, 1988], respectivamente, se han llevado a cabo sobre tres probetas de 4x4x4 cm, registrando la variación de masa de cada probeta en el tiempo. El

coeficiente de absorción (C_a), se define como la pendiente de la curva que representa la variación en peso en función de la raíz cuadrada del tiempo (durante los 4 primeros minutos de ensayo). A partir del ensayo de desorción se ha calculado el Índice de secado (I_d).

Tabla 1: Composición mineralógica semi-cuantitativa de las diferentes muestras de estudio. Leyenda: Port: portlandita; Cal: calcita; Arag: aragonito; Vat: vaterita; Qtz: cuarzo; C_2S y C_3S : Silicatos di- y tricálcicos; n.d.: no detectado; tr: $\leq 3\%$; *: 4–11%; **: 11–25%; ***: 26-49%; +: 50–65%; ++:66-98%.

MUESTRA	t. carbonatación (días)	Composición mineralógica (%)						
		Port	Cal	Arag	Vat	Qtz	C_2S	C_3S
CL90-S	7	++	**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	28	+	***	*	*	n.d.	n.d.	n.d.
CLAA213	7	++	**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	28	+	***	*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CLAL3513	7	++	**	tr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	28	+	***	*	*	n.d.	n.d.	n.d.
CLHA0613	7	++	**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	28	+	***	*	*	n.d.	n.d.	n.d.
NHL3.507	7	***	**	n.d.	n.d.	tr	**	**
	28	***	**	n.d.	n.d.	tr	**	***
NHLAA3507	7	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	**
	28	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	***
NHLAL3507	7	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	***
	28	***	**	n.d.	n.d.	*	***	***
NHLHA0607	7	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	**
	28	***	*	n.d.	n.d.	*	**	**
NHL3.508	7	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	**
	28	***	**	n.d.	n.d.	*	**	**
NHLHA208	7	***	*	n.d.	n.d.	tr	**	**
	28	***	**	n.d.	n.d.	tr	**	**

La resistencia mecánica de los morteros, a flexión y a compresión se ha medido en una prensa hidráulica INCOTECNIC-Matest, siguiendo la norma [UNE-EN 1015-11, 2000]. La resistencia a flexión se mide sobre tres probetas de mortero de 4x4x16cm; las dos mitades obtenidas tras la ruptura de cada probeta tras el ensayo de flexión, se utilizan para el ensayo de compresión. Tras la ruptura a flexión, se mide el borde de carbonatación de las probetas por tratamiento con una disolución de fenolftaleína al 2% en Etanol, aplicada mediante un spray vaporizador. La medida de la velocidad de propagación de los ultrasonidos supone un ensayo no destructivo relacionado con las propiedades elásticas del mortero. A su vez también se relaciona con las propiedades mecánicas y el grado de compactación de dichos morteros. Usando un equipo Controls 58-E 4800 con transductores de 24-150 KHz, se ha analizado el tiempo que tarda una onda primaria P en atravesar la probeta en cada una de las tres direcciones del espacio (una perpendicular y dos paralelas al plano de compactación). Una vez conocidas las dimensiones de la probeta, se puede calcular la velocidad de propagación (V_p) mediante la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{S(m)}{t(s)} \tag{1}$$

Previamente a los ensayos de durabilidad, las probetas se mantuvieron en horno a 40°C, 48 horas para el ensayo de cristalización de sales y a 90°C, 12 horas para el de hielo-deshielo, para eliminar la humedad. Una vez fuera del horno, se registró su masa. El ensayo de cristalización de sales según [UNE-EN 12370, 1999] conlleva la inmersión de las probetas en una solución salina de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 14% a 20°C, durante 4 horas. A continuación, se introducen en el horno a 100°C durante 16 horas. Finalmente, se retiran del horno y se dejan enfriar en un desecador durante 4 horas. Estos tres pasos constituyen un ciclo. Cada ciclo se repite 10 veces. Para el ensayo de hielo-deshielo conforme a [UNE-EN 14614-5, 2012] se sumergen las probetas en agua (20°C, 48 horas). Cada ciclo del ensayo, de un total de 30, consiste en introducir las probetas en el congelador (-15°C, 8 horas), y sumergirlas en agua para descongelarlas (20°C, 16 horas). En cada ciclo, para ambos ensayos, se pesan y fotografían las probetas antes de sumergirlas.

Resultados y discusión

Estudio de las pastas de Aditivo- Cal

Los resultados del análisis mineralógico de DRX, se han indicado en la Tabla 1 (Solo se presentan resultados a 7 y 28 días dado que a 15 días aún no se observan diferencias apreciables). En todas las muestras, tanto de cal aérea como hidráulica se ha dado una carbonatación parcial de las mismas: La proporción de calcita ha aumentado con el tiempo, debido a la carbonatación (reacción de la portlandita con el CO_2 atmosférico). En el caso de las muestras con cal aérea, además, se han encontrado cantidades inferiores al 10% de los polimorfos cristalinos del CaCO_3 , aragonito y vaterita, fundamentalmente a 28 días de curado. Mientras que, en las muestras de cal hidráulica, además de portlandita y calcita, se han obtenido cantidades considerables de silicatos di- y tricálcicos (C2S+C3S ~40%) y una cantidad mínima de cuarzo.

La observación de las mismas muestras al SEM (Figura 1) ha permitido la identificación de la portlandita, en forma de plaquetas hexagonales de alrededor de 1 μm de tamaño, de superficie lisa.

En ocasiones, se han encontrado partículas esferulíticas de vaterita recubriendo la superficie de los cristales de portlandita (Figura 1a), cuya textura varía de lisa a globular. Se han observado también partículas esféricas inferiores a 100 nm que, por su morfología y tamaño, recuerdan las partículas de carbonato cálcico amorfo (ACC, indicadas por una flecha en la Figura 1a). También se han reconocido cristales de calcita escalenoédricos (Figura 1b), y, posiblemente, aragonito (Figura 1c) en forma de cristales prismáticos finos y alargados (Schmidt et al., 2010, Cizer et al., 2012; Wu y Zeng, 2017).

Comparando las imágenes de SEM, se han encontrado tamaños de partículas similares y pocas variaciones en la morfología de las fases minerales presentes entre las muestras control y las elaboradas con aditivos, tales como un mayor crecimiento de aragonito en las mezclas con aditivos, facilitado por la presencia de una fase de naturaleza orgánica. En las muestras de cal hidráulica además se ha observado la morfología característica en forma de finas agujas de las fases hidratadas (CSH, silicatos cálcicos hidratados, Figura 3d) formadas durante el fraguado de la cal hidráulica.

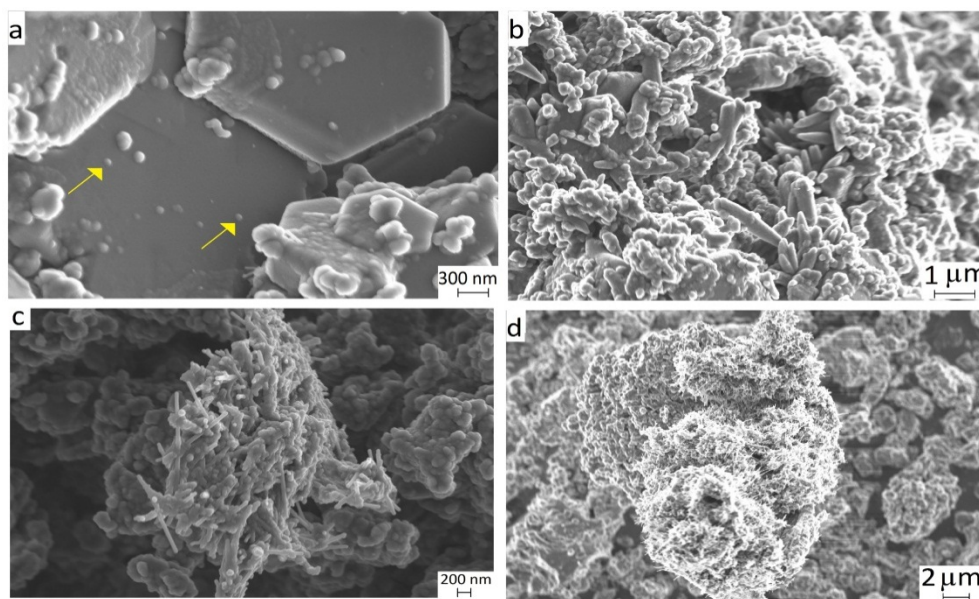


Figura 1: Imágenes SEM. a) Muestra CLAA213_28D: morfología portlandita (plaquetas hexagonales, textura lisa) con partículas ACC indicadas por una flecha y partículas esferulíticas de calcita o vaterita sobre superficie portlandita; b) Muestra CLAL3513_28D: morfología escalenoédrica de la calcita; c) Muestra CLHA0613_28D: morfología prismática fina y alargada de calcita o aragonito; d) Muestra NHL3.507_28D: silicatos cálcicos hidratados (CSH) procedentes de la hidratación de los silicatos cálcicos propios de la cal hidráulica.

Estudio de los morteros en estado fresco y tras 28 días de curado

Consistencia del mortero en estado fresco.

Los valores de densidad aparente y escurrimiento en mesa de sacudidas para cada una de las muestras de mortero se ofrecen en la Tabla 2. Si se comparan dichos valores, se observa que al añadir HA a la cal aérea la densidad aparente disminuye y el mortero es ligeramente más plástico. En los morteros de cal hidráulica no se destacan cambios significativos en la densidad aparente pero sí se mide un mayor escurrimiento en presencia de aditivo.

Retracción por secado de los morteros tras 28 días de curado.

Los valores de retracción en volumen (en %), se presentan en la Tabla 2. La presencia de aditivo no mejora los valores de retracción respecto a las muestras control.

Tabla 2: Valores de densidad aparente (D_a) y escurrimiento de los morteros en estado fresco. Valores de retracción de secado, porosidad abierta (P_a), densidad real (D_r) y densidad aparente (D_a) de los morteros tras 28 días de curado.

Muestra	Estado Fresco		Curado 28 días			
	D_a , g/cm ³	Ecurr., mm	Retracción, %	P_a , %	D_r , g/cm ³	D_a , g/cm ³
CL_B	2,36	140	1,5	28	2,7	1,95
CLHA	2,06	137	1,8	39	2,7	1,66
NHL_B	2,13	132	0,3	26	2,7	2,02
NHLHA	2,13	137	0,9	25	2,7	2,01

Caracterización mineralógica y estudio del sistema poroso.

Las fases identificadas han sido las propias de la naturaleza de las materias primas empleadas: cuarzo, calcita y portlandita y, en el caso de los morteros de cal hidráulica, también silicatos di- y tricálcicos. El contenido en cuarzo se debe al uso de un árido silíceo normalizado.

Al comparar los valores de porosidad abierta, densidad real y densidad aparente (Tabla 2) de las muestras con y sin aditivo, se deduce que la presencia de aditivo modifica el volumen poroso de los morteros de cal aérea, sin modificar apenas la porosidad de los morteros de cal hidráulica. Estas modificaciones están en consonancia con los cambios inducidos por el aditivo en las propiedades en estado fresco de los morteros. No se obtienen, sin embargo, importantes cambios en la distribución de tamaño de poros de los morteros, que presentan una distribución porosimétrica bimodal, con dos familias de poros (Figura 4). La primera familia está compuesta por poros con un radio de acceso entre 0,1 y 1 μm , valores característicos e indicativos de la componente aérea de la cal. La segunda familia de poros, de mayor volumen en los morteros de cal aérea, presenta un radio de acceso entre 3 y 20 μm , con el pico centrado a 10 μm en las muestras control, y a 30 μm en las muestras con aditivo. Dado que la dosificación cal:árido es la misma para todos los morteros, esta segunda familia de poros podría estar relacionada bien con el contenido en agua de amasado, mayor en las muestras de cal aérea (1:1.3 en peso) respecto a las de cal hidráulica (1:0.8), pues a mayor cantidad de agua de amasado, mayor cantidad de agua a evaporar durante el secado y mayor porosidad generada, o bien por la presencia del aditivo. La influencia del aditivo sobre la distribución de tamaño de poros se refleja, de hecho, en un mayor volumen de los poros con un radio de acceso de alrededor de 30 μm . De nuevo, es un cambio que se genera solo en los morteros de cal aérea.

En las muestras de cal hidráulica se observan también pequeños picos con un radio de acceso de poro inferior a 0,1 μm , debidos a la porosidad generada por las fases hidratadas (Arandigoyen y Álvarez, 2006).

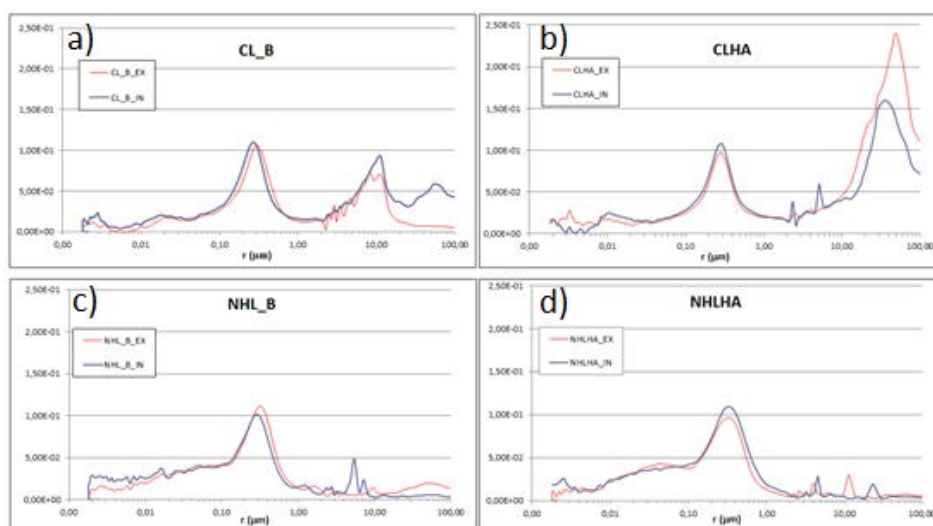


Figura 4: Curvas porosimétricas de las muestras tomadas de la zona externa e interna de las probetas de mortero: a) CL_B, b) CLHA, c) NHL_B, d) NHLHA. Representación del radio de acceso de poro (r , μm) en función del volumen incremental ($dV/d\log r$, cm^3/g).

Ensayos hídricos y propiedades físico-mecánicas.

En la Tabla 3, se pueden observar los parámetros hídricos (C_c , C_a e I_d), los valores de resistencia mecánica (R_f , R_c), velocidad de propagación (V_p), y el borde de carbonatación de los morteros de estudio. Las curvas de capilaridad (de variación en peso y de variación en altura), absorción libre y desorción de agua (Figura 5) indican un comportamiento hídrico similar para las muestras con y sin aditivo, sólo CLHA ha dado lugar a una absorción por capilaridad más rápida en los primeros minutos del ensayo. Una vez alcanzada la saturación, la cantidad de agua absorbida ha sido similar en todos los morteros (alrededor de un 10%). Los morteros de cal hidráulica (NHL) presentan valores más altos de velocidad de propagación de los ultrasonidos y resistencia a flexión y compresión debido a su mayor compacidad y menor porosidad, consecuencia de la formación de fases hidratadas, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante PIM (tabla 2). Sin embargo, si se evalúa el comportamiento en función de la presencia de aditivo, no hay modificaciones apreciables respecto a las muestras control. El borde de carbonatación es de aproximadamente 0.8 cm tanto en CL_B como en CLHA, mientras que en los morteros NHL_B, y NHLHA no está definido, debido a que la presencia de fases hidratadas enmascara la carbonatación.

Tabla 3: Valores de coeficiente de capilaridad (C_c), absorción libre (C_a), índice de secado (I_d). Velocidad de propagación de las ondas P (V_p), resistencias a flexión (R_f) y a compresión (R_c) y borde de carbonatación de los morteros de estudio tras 28 días de curado.

Muestra	C_c , %peso·cm ⁻¹	C_a , %peso·cm ⁻¹	I_d , %	V_p , m·s ⁻¹	R_f , MPa	R_c , MPa	Borde, cm
CL_B	0,66	6,05	0,11	943	0,07	0,73	0,8
CLHA	0,71	5,68	0,11	990	0,07	0,78	0,8
NHL_B	0,62	5,54	0,11	1648	0,32	2,35	-
NHLHA	0,68	5,89	0,11	1587	0,28	2,16	-

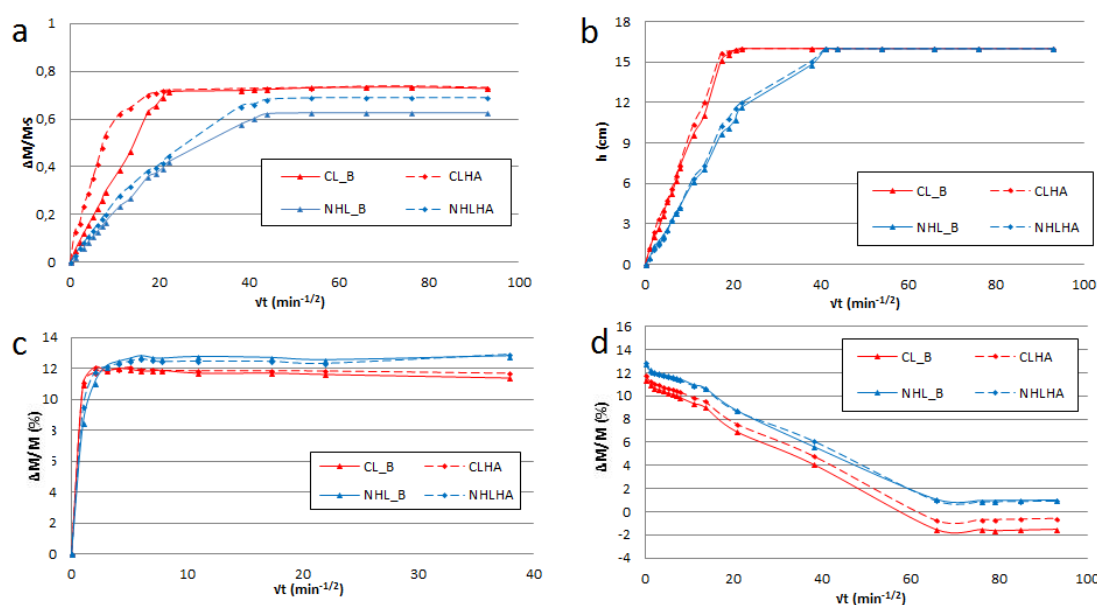


Figura 5: a) Curva de absorción capilar para cada uno de los morteros de estudio, representación de la variación en peso por unidad de superficie, b) curva de absorción capilar, representación de la variación de altura, c) curva de absorción hídrica, d) curva de desorción o secado.

Ensayos de durabilidad

Al evaluar el comportamiento de las probetas frente a la cristalización de sales (Figura 6.1), se ha podido comprobar que las probetas que contienen cal aérea son más vulnerables, ya en el ciclo 3, aparece un claro deterioro en las aristas (mayor en CL_B que en CLHA), mientras que en los morteros hidráulicos los desprendimientos en las aristas o caras de las probetas son leves o superficiales y aparecen hacia la mitad del ensayo. En los últimos ciclos, la alteración de NHLHA es mayor que en el control, llegando incluso a disgregarse. También se contempla cierta deformación en la cara en contacto con la bandeja por acumulación de sales en el fondo del recipiente.

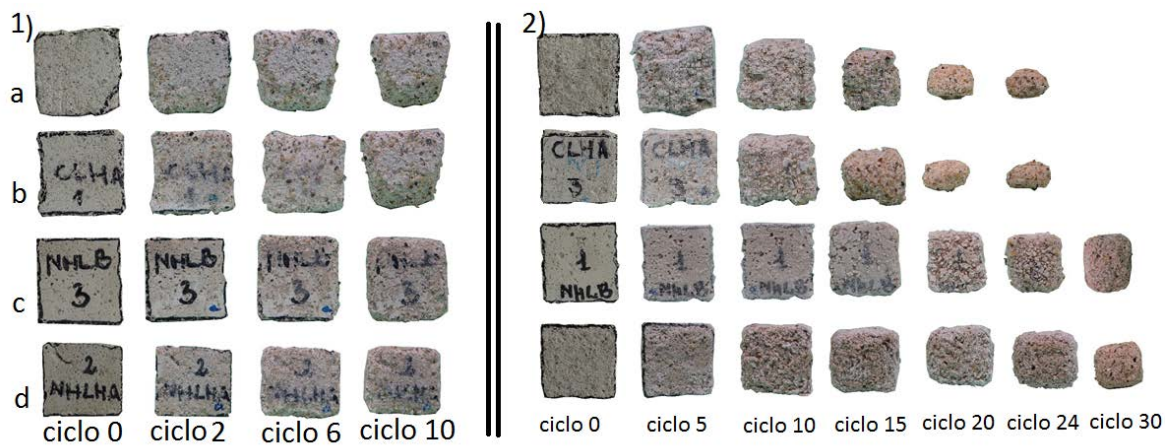


Figura 6: Fotografías de la evolución de las probetas (a) CL_B, b) CLHA, c) NHL_B, d) NHLHA) durante ensayo de durabilidad. 1) Ensayo de cristalización de sales, estado inicial (ciclo 0), ciclos 2, 6 y 10. 2) Ensayo hielo-deshielo, estado inicial, ciclos 5, 10, 15, 20, 24, 30.

A lo largo del ensayo de hielo-deshielo (Figura 6.2), se manifiesta un claro desgaste en la probeta en lados y aristas, siendo este más acusado y precoz en los morteros de cal aérea que en los de cal hidráulica.

El aditivo no promueve mejoras de la durabilidad, aunque en los morteros de cal aérea reduce la cantidad de material perdido durante los ensayos.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado que, a pesar de las propiedades visco-elásticas del hialuronato de sodio y de su eficacia en la mejora de las propiedades reológicas de pastas de cal, este polisacárido no puede considerarse un aditivo adecuado para la reducción de la retracción experimentada por los morteros de cal, al menos en las dosificaciones aquí empleadas. Sin embargo, se ha podido demostrar que los tres polisacáridos aquí estudiados (Agar-Agar, alginato y hialuronato sódicos) no retrasan los procesos de endurecimiento y fraguado de cal aérea e hidráulica, aspecto que es importante tener en cuenta cuando se emplean sustancias orgánicas de origen natural en la elaboración de morteros de cal.

En este sentido, se propone el estudio de morteros elaborados con las mismas cales pero con dosificaciones más altas en hialuronato sódico, con el objetivo de optimizar sus propiedades en estado fresco.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa Nacional “Juan de la Cierva incorporación” (convocatoria JDC2015, Ministerio Español de Economía y Competitividad) y en parte por la empresa Tesela, Materiales, Innovación y Patrimonio SL (Spin-Off de la Universidad de Granada).

Bibliografía

Aalil, I.; Beck, K.; Brunetaud, X.; Badreddine, D.; Cherkaoui, K.; Chaaba, A.; Al-Mukhtar, M. (2017). *Restoration mortars for the Volubilis calcarenite stone*. *Procedia Structural Integrity*, 5, 1123-1128

Ancade. (2011) *Guía práctica para los morteros con cal*. Jornada Técnica sobre Morteros con Cal, Cádiz.

Arandigoyen, M.; Alvarez, J.I. (2006). *Blended pastes of cement and lime: pore structure and capillary porosity*. *Applied Surface Science*. 252, 8077-8085.

Cazalla, O.; Rodríguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Cultrone, G.; De la Torre, M.G. (2000). *Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation*. *Journal of American Ceramic Society*. 83-5, 1070-1076.

Cizer, O.; Rodríguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E.; Elsen, J.; Van Gemert, D.; Van Balen, K. (2012). *Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime*. *Journal of Materials Science*, 47, 6151-6165.

Fakhari, A.; Phan, Q.; Thakkar, S.V.; Middaugh, C.R.; Berkland, C. (2013). *Hyaluronic Acid Nanoparticles Titrate the Viscoelastic Properties of Viscosupplements* *Langmuir*, 29, 5123–5131.

Hendrickx, R. (2009). *The adequate measurement of the workability of masonry mortars*. PhD Thesis, Katholieke Universiteit of Leuven, Belgium.

Izaguirre, A.; Lanas, J.; Álvarez, J.I. (2011). *Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents*. *Cement and Concrete Composite*. 33, 309-318.

Khalid, A.; Goura, Ravi.; R.; Thirumalini, S. (2018). *Revamping the traditional air lime mortar using the natural polymer - Areca nut for restoration application*. *Construction and Building Materials*, 164, 255-264.

Kulicke, W.M.; Meyer, F.; Bingöl, A.; Lohmann, D. (2008). *ViscoElastic Properties of Sodium Hyaluronate Solutions*. *AIP Conference Proceedings* 1027, 585.

Lanas, J.; Álvarez, J.I. (2004). *Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior*. *Cement and Concrete Research*. 34, 1291–2201.

Luque A., Cultrone G., Sebastián E. (2010). *The Use of Lime Mortars in Restoration Work on Architectural Heritage*. Springer, Dordrecht. *Materials. Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. 197-207.

- Martin Ramos, J.D. (2004) *XPowder. A software package for powder X-ray diffraction analysis*. Dep. Leg. M-11719.
- Morais, D.S.; Rodrigues, M.A.; Silva, T.I.; Lopes, M.A.; Santos, M.; Santos, J.D.; Botelho, C.M. (2013). *Development and characterization of novel alginate-based hydrogels as vehicles for bone substitutes*. Carbohydrate polymers, 95, 134-142.
- Mouropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnosto, S. (2005). *Composite material in ancient structure*. Cement and Concrete Composites. 27, 295-300.
- Navrátilová, E.; Tihlaříková, E.; Neděla, V.; Rovnaníková, P.; Pavlík, J. (2017). *Effect of the preparation of lime putties on their properties*. Scientific Reports. 7, 17260.
- Normal 29/88. (1988). *Método de ensayo para piedra natural. Determinación del índice de secado*. Roma, CNR-ICR.
- Oerther, S.; Payan, E.; Lopicque, F.; Presle, N.; Hubert, P.; Muller, S.; Netter, P. (1999). *Hyaluronate-alginate combination for the preparation of new biomaterials: investigation of the behavior in aqueous solutions*. Biochimica et Biophysica Acta. 1426, 185-194.
- Oerther, S.; Le Gall, H.; Payan, E.; Lopicque, F.; Presle, N.; Hubert, P.; Dexheimer, J.; Netter, P.; Lopicque, F. (1999). *Hyaluronate-alginate Gel as a Novel Biomaterial: Mechanical Properties and Formation Mechanism*. Biotechnology and Bioengineering. 63 (2).
- Park, H.; Lee, K.Y. (2011). *Alginate /hyaluronate hydrogels for cartilage regeneration*. Abstracts of the Journal of Controlled Release. 152, e192-e269.
- Renaud, M.; Belgacem, M.N.; Rinaudo, M. (2005). *Rheological behaviour of polysaccharide aqueous solutions*. Polymer. 46, 12348-12358.
- Rodríguez-Navarro, C.; Ruiz Agudo, E.; Ortega-Huertas, M.; Hansen E. (2005). *Nanostructure and Irreversible Colloidal Behavior of Ca(OH)₂: Implications in Cultural Heritage Conservation*. Langmuir. 21 (24), 10948–10957
- Rodríguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E.; Luque, A.; Rodríguez-Navarro, A.B.; Ortega-Huertas, M. (2009). *Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystal*. American Mineralogist. 94 (4), 578–593.
- Ruiz-Agudo, E.; Rodríguez-Navarro, C. (2010). *Microstructure and Rheology of lime putty*. Langmuir. 26 (6), 3868-3877.
- Schmidt, M.; Stumpf, T.; Walther, C.; Geckeis, H.; Fanghänel, T. (2010). *Phase transformation in CaCO₃ polymorphs: A spectroscopic, microscopic and diffraction study*. Journal of Colloid and Interface Science. 351, 50–56.
- Sonebi, M. (2006). *Rheological properties of grouts with viscosity modifying agent as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash*. Cement and Concrete Research. 36, 1609-1618.
- UNE-EN 196-1. (2000). *Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la resistencia mecánica, a una edad determinada de una muestra de cemento*. Madrid, AENOR.
- UNE-EN 459-1. (2011). *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*. Madrid, AENOR.
- UNE-EN 1015-2. (1999). *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 1015-3. (2000). *Método de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco por la mesa de sacudida*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 1015-6. (1999). *Método de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 1015-11. (2002). *Método de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión de morteros endurecidos*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 1925. (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 12370. (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 13755. (2008). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de absorción de agua a presión atmosférica*. Madrid, AENOR.

UNE-EN 14617-5. (2012). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al hielo y al deshielo*. Madrid, AENOR.

Ventola, L.; Vendrell, M.; Giraldez, P.; Merino, L. (2011). *Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics*. Construction and Building Materials. 25, 3313-3318.

Vieira, M.C.; Klemm, D.; Einfeldt, L.; Albrecht, G. (2005). *Dispersing agents for cement based on modified polysaccharides*. Cement and Concrete Research. 35, 883-890.

Wu, J.; Zeng, R.J. (2017). *Biomimetic Regulation of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation Involving Immobilization of *Sporosarcina pasteurii* by Sodium Alginate*. Crystal Growth Design, 17, 1854–1862

Estudio del comportamiento en estado endurecido de morteros de cal aérea con metacaolín y superplastificantes

Adrián Duran, Jesús Fidel González-Sánchez, Íñigo Navarro-Blasco, Rafael Sirera,
José M. Fernández, José I. Álvarez

*Grupo de investigación MIMED (Heritage, materials and environment), Departamento de Química,
Universidad de Navarra, mimed@unav.es*

Resumen

Este trabajo estudia las interacciones que se producen cuando se adicionan separadamente dos superplastificantes (PNS –sulfonato de polinaftaleno- y LS –lignosulfonato-) a un conglomerante aéreo y a uno hidráulico formado por cal aérea a la que se le ha añadido metacaolín (MK) como material puzolánico, y los efectos que dichas adiciones tienen en las propiedades de los sistemas. Los morteros se fabricaron con árido calcáreo. Se efectuaron ensayos de durabilidad en morteros con la composición citada, sometiéndolos a ciclos de hielo-deshielo y a ciclos de cristalización de sales (ataque por sulfatos). Aunque se realizaron algunas medidas con las pastas en estado fresco, la mayoría de los experimentos (resistencia a compresión y a flexión, TG-ATD, FTIR-ATR, porosimetría de intrusión de mercurio) se realizaron tras períodos de fraguado del mortero de 7, 28, 91, 182 y 365 días.

Se detectaron fases silicatadas y silicoaluminatadas, a pesar de que las experiencias se realizaron a temperatura ambiente y con un bajo porcentaje de material puzolánico ($\leq 20\%$). La presencia de LS impidió el proceso de carbonatación lo que, a su vez, provocó un decrecimiento en los valores de resistencia mecánica cuando se trataba de morteros hidráulicos. Los sistemas con LS mostraron mayor porosidad y un mayor tamaño medio de poro. La durabilidad (ciclos hielo-deshielo) de los morteros mejoró notablemente tras la incorporación de metacaolín y empeoró tras la adición de LS (morteros hidráulicos).

Palabras clave: Cal; Metacaolín; Superplastificantes; Estado endurecido; Durabilidad.

Introducción

Los morteros de cal desempeñan un papel importante en los procedimientos de conservación y restauración gracias a su alta compatibilidad con las materias primas empleadas en las edificaciones que componen el patrimonio arquitectónico [Duran et al., 2012; Amenta et al., 2017; Borsoi et al., 2017]. Los morteros de inyección y de relleno basados en cal tienen una compatibilidad adecuada con soportes antiguos, pero pueden necesitar varias adiciones para proporcionar una fluidez adecuada para llenar todas las grietas y vacíos [Azeiteiro et al., 2014; Bras y Henriques, 2012; Baltazar et al., 2014]. En este artículo se investigan morteros modificados con adiciones de metacaolín (MK), utilizado como aditivo puzolánico, y dos aditivos superplastificantes (SP), el poli-naftalensulfonato (PNS) y el lignosulfonato (LS).

El metacaolín ha sido usado como adición puzolánica para mortero y hormigón. El MK generalmente se procesa por calcinación de una arcilla [Sabir et al., 2001], que reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2 , CH) produciendo fases de silicato de calcio, silicoaluminato hidratado y aluminato hidratado, (CSH , C_2ASH_8 y C_4AH_{13}) [Vejmelkova et al., 2012; Frías et al., 2002]. Tanto el efecto de relleno de MK como la producción de nuevas fases hidratadas contribuyen a la mejora de varias propiedades de morteros y pastas a base de cal aérea, como su tiempo de fraguado o resistencia a la compresión, y también reducen el microfisurado [Navarro-Blasco et al., 2014].

El PNS y el LS son dos SPs utilizados para materiales de construcción, con grupos hidrofílicos (grupos sulfónicos en ambos, y también, metoxi- e hidroxilo en LS) y partes hidrófobas (naftaleno para PNS y alquilbenceno para LS) [Pérez-Nicolás et al., 2016]. Los mecanismos de interacción de estos SPs están relacionados con las fuerzas electrostáticas y estéricas y también con la adsorción en las superficies [Zapata et al., 2013; Ng y Justness, 2016; Hallal et al., 2010; Pérez-Nicolás et al., 2016; Navarro-Blasco et al., 2014]. El PNS ha sido descrito como un agente reductor de agua más eficiente que el LS [Ouyang et al., 2006], aunque el LS muestra un mejor efecto plastificante que PNS en algunos sistemas [Pérez-Nicolás et al., 2016]. Muchos trabajos han abordado el efecto de PNS y LS en sistemas de cemento [Zhang y Kong, 2015; Danner et al., 2015; Ng y Justnes, 2016; Ng y Justnes, 2015; Shi et al., 2016; Hallal et al., 2010; Topçu y Atesin, 2016; Arel y Aydin, 2017], pero pocos artículos los han estudiado en morteros a base de cal [Pérez-Nicolás et al., 2016].

Cada uno de los componentes que forman parte de los morteros estudiados (es decir, cal, metacaolín, superplastificantes), así como sus proporciones relativas, afectan a las propiedades en estado fresco así como a la microestructura y propiedades mecánicas de los morteros endurecidos [Amenta et al., 2017]. En este trabajo, estudiamos la interacción en morteros entre dos SPs (PNS y LS) y cal aérea, a veces modificados con la adición de MK como material puzolánico. Se estudian las interacciones de PNS y LS y se evalúan las propiedades en estado principalmente endurecido. Además, se estudia la resistencia mecánica a largo plazo, así como la durabilidad de los morteros MK-cal con PNS y LS frente a condiciones de envejecimiento acelerado por ciclos de congelación-descongelación y por ataque de sulfato de magnesio.

Sección Experimental

Materiales

Se utilizó cal apagada clase CL 90-S (ECOBAT; CALINSA) en forma de polvo para hacer pastas y morteros. El aditivo puzolánico fue metacaolín (MK) en diferentes porcentajes en peso (0, 6, 10 y 20% en peso) con respecto al peso de la cal. El MK empleado (METAVER) tiene una superficie específica de $20 \text{ m} \cdot \text{g}^{-1}$ y un tamaño de partícula promedio de $4.5 \mu\text{m}$ [Navarro-Blasco et al., 2014]. Se agregaron dos superplastificantes diferentes [caracterizados en Pérez-Nicolás et al., 2016]: poli-naftalensulfonato (PNS) y lignosulfonato (LS) (FOSROC), en porcentajes de 0,25, 0,5, 0,75 y 1% en peso con respecto al peso de la cal.

Métodos

Los experimentos de sorción para ambos SPs (PNS y LS) se realizaron en pastas individuales (1 g de cal por 25 ml de agua) y en sistemas de cal-MK (5 g de cal y aditivo puzolánico a 6, 10 y 20% en peso con respecto a la cal en 25 ml de agua); todos ellos en reactores discontinuos. Las mezclas se agitaron durante 1 hora y, a continuación, se centrifugaron a 8000 g durante 15 minutos. Después de esto, el sobrenadante se recogió y se filtró a través de filtros de PTFE de 0,45 μm . La cantidad de ambos SP adsorbidos sobre las partículas se determinó mediante la diferencia entre la concentración inicialmente añadida y la concentración restante final de SP, cuantificada mediante espectrofotometría ultravioleta-visible (máximos a $\lambda = 296 \text{ nm}$ para PNS y a $\lambda = 285 \text{ nm}$ para LS). El modelo de Freundlich se utilizó para ajustar matemáticamente los datos de adsorción.

Se prepararon muestras prismáticas con dimensiones de 160x40x40 mm. Las muestras se curaron a 20°C y 60% HR. Las resistencias a la flexión se determinaron por triplicado a bajas velocidades de carga (Ibertest STIB-200, 10 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$). Posteriormente, se realizaron experimentos de resistencia a la compresión, también por triplicado, en los dos fragmentos resultantes de las pruebas de flexión, a una velocidad de carga de aprox. 50 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$.

Los restantes experimentos se llevaron a cabo sobre fragmentos de las muestras. Para el análisis térmico, utilizamos un TG-sDTA 851 Mettler Toledo: crisoles de alúmina, 25-1000 °C, con una rampa de 10°C·min⁻¹ y atmósfera de aire estática. Los experimentos de reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) se hicieron en un aparato Shimadzu IRAffinity-1S. Los experimentos de difracción de rayos X (DRX) se realizaron en un difractorómetro Bruker D8 Advance con radiación Cu K α 1, de 2° a 80° (2 θ), 1 s por paso y un tamaño de paso de 0,04°. Se utilizó un aparato Micromeritics AutoPore IV 9500, entre 0.0015 y 207 MPa, para porosimetría de intrusión de mercurio (MIP).

Para los ensayos de durabilidad, las muestras prismáticas de morteros se sometieron a: (i) Ciclos de hielo/deshielo: los ciclos consistieron en la inmersión en agua de las muestras durante 24 h; a continuación, la congelación a -10°C durante 24 h. (ii) Ciclos de cristalización de sales: ataque por sulfatos. Las muestras se sumergieron completamente en una solución acuosa saturada de MgSO₄ a 20°C y HR del 95% durante 24 h. Después, las muestras se secaron en un horno a 65°C durante 24 horas y se sumergieron en agua 24 horas a 20°C y 95% de HR y se secaron nuevamente. Para evaluar el grado de afectación de las muestras después de los ciclos se consideraron dos parámetros [Duran et al., 2014; Lanás et al., 2006]: (i) resistencia a la compresión después de 7, 14 y 28 ciclos, cuando la integridad de las muestras lo permitió; (ii) evaluación cualitativa basada en la apariencia visual después de cada ciclo (desde grado 0, muestras sin evidencia de descomposición, hasta grado 5, muestras completamente destruidas).

Resultados y discusión

Resistencia mecánica a compresión

La carbonatación tiene una influencia significativa en el proceso de endurecimiento a lo largo del tiempo en sistemas basados en cal [Rodríguez-Navarro et al., 2005; Gameiro et al., 2014; Fernández et al., 2013]. En consecuencia, para casi todas las muestras, los valores más altos de

resistencia a la compresión se obtuvieron a los 365 días (Figura 1). Para los morteros de cal sin adiciones, la presencia de las dosis más altas de SP causó una caída en los valores de resistencia a la compresión (Figura 1), muy posiblemente debido al impedimento del proceso de carbonatación causado por los SPs. La disminución fue más alta para los morteros PNS-cal debido a la mayor adsorción de este SP (Tabla 1).

La reacción puzolánica que tiene lugar entre partículas de CH y MK reactivo, formando C-S-H, C-S-A-H y C-A-H, fue responsable de la mejora observada en la resistencia mecánica en presencia del compuesto puzolánico [El-Gamal et al., 2017; Abbas et al., 2010] (Figura 1). En general, los valores de resistencia a compresión fueron más altos para los morteros PNS-MK-cal que para los morteros LS-MK-cal (Figura 1). El valor promedio es de 2.7 MPa para muestras de PNS frente a 1.7 MPa para muestras de LS.

Tabla 1. Datos obtenidos en los ensayos de isothermas de adsorción

	Modelo Langmuir			Modelo Freundlich		
	q_m	b	R^2	K	$1/n$	R^2
Cal-0% MK-PNS	51,23	0,00011	0,7738	0,01210	0,8658	0,9757
Cal-6% MK-PNS	46,92	0,00011	0,8019	0,01215	0,8582	0,9768
Cal-10% MK-PNS	43,35	0,00012	0,8469	0,01247	0,8490	0,9775
Cal-20% MK-PNS	44,69	0,00010	0,7458	0,00986	0,8708	0,9766
Cal-0% MK-LS	32,10	0,00016	0,9509	0,01983	0,7812	0,9775
Cal-6% MK-LS	28,73	0,00018	0,9242	0,01837	0,7830	0,9735
Cal-10% MK-LS	31,48	0,00015	0,9647	0,01582	0,7977	0,9825
Cal-20% MK-LS	29,05	0,00015	0,9400	0,01346	0,8076	0,9809

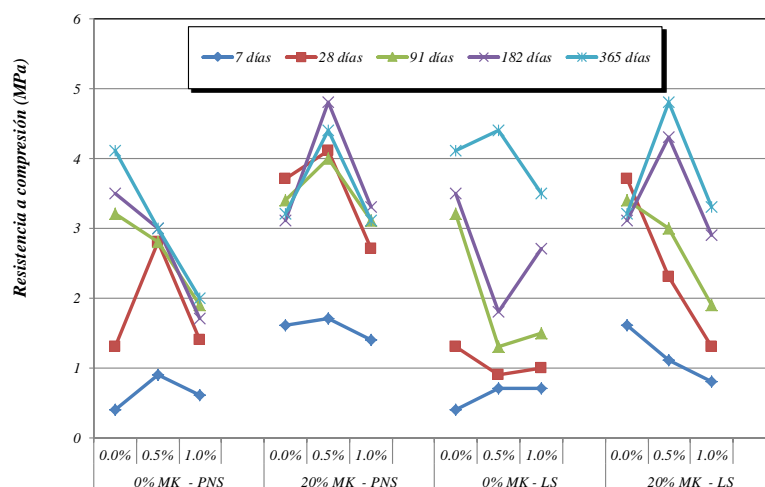


Figura 1. Resistencia a compresión (Mpa).

Evaluación por TG-DTA, FTIR-ATR y DRX

La tasa de carbonatación y la reacción puzolánica en los diferentes tiempos de curado de los morteros SP-MK-cal fue evaluada mediante TG-DTA, FTIR-ATR y DRX. La Tabla 2 representa los porcentajes de Ca(OH)_2 y CaCO_3 calculados a partir de TG [Lanas et al., 2005]. También se recogen los valores de pérdida de masa entre 25-300°C que se asignan a los procesos de deshidratación de CSH, CSAH y CAH derivados de la reacción puzolánica [Gameiro et al., 2012; Santos Silva et al., 2014; Singh et al., 2015] y también a la deshidratación residual del agua adsorbida.

La adición de 20% de MK (muestra MK4) en comparación con la muestra de solo cal (muestra MK1) provocó la reducción en el contenido de Ca(OH)_2 y el aumento en la cantidad de fases de CSH, CAH y CSAH generadas por la reacción puzolánica: la pérdida de masa aumentó notablemente en el rango de temperatura mencionado (Tabla 2). También es imperativo indicar que los eventos térmicos relacionados con la presencia de compuestos derivados de la reacción puzolánica parecen ocurrir en las primeras etapas del curado (7 y 28 días) (Tabla 2). La cantidad de CaCO_3 permaneció constante comparando MK1 y MK4, a excepción de la muestra estudiada tras 365 días de curado, en que fue más alta para MK4 (Tabla 2). Los mayores porcentajes de CaCO_3 se encontraron a los 91 días para MK4 y a los 365 días para MK1 y MK9. De todos estos resultados, podemos concluir que, en general, la reacción puzolánica es dominante a los 7 y 28 días, y los procesos de carbonatación a largos tiempos de curado. Este hecho podría representar una ventaja práctica en los materiales utilizados como morteros de inyección o de relleno que estarán en contacto con el agua [Gameiro et al., 2014; Santos Silva et al., 2014].

Tabla 2. Porcentajes de Ca(OH)_2 y CaCO_3 calculados a partir de datos de TG

Ca(OH)₂	7 días	28 días	91 días	182 días	365 días
MK1 (cal)	12,3	7,1	2,9	4,1	3,4
MK4 (cal + 20% MK)	4,7	2,2	1,1	0,7	1,2
MK9 (0%MK, 1%PNS)	8,7	7,3	4,4	3,6	2,8
MK12 (20%MK, 1%PNS)	5,5	6,9	1,9	1,5	1,6
MK17 (0%MK, 1%LS)	13,2	12,7	17,7	11,3	5,6
MK20 (20%MK, 1%LS)	10,6	9,3	11,9	1,9	7,4
CaCO₃	7 días	28 días	91 días	182 días	365 días
MK1 (cal)	82,2	88,2	93,1	91,6	94,8
MK4 (cal + 20% MK)	85,3	89,1	92,5	90,8	90,9
MK9 (0%MK, 1%PNS)	86,9	88,6	91,8	94,7	96,4
MK12 (20%MK, 1%PNS)	85,7	82,6	89,5	88,8	90,6
MK17 (0%MK, 1%LS)	80,8	80,9	75,4	86,7	88,3
MK20 (20%MK, 1%LS)	81,3	80,9	78,9	89,1	85,8

La tasa de carbonatación fue menor, en general, para los morteros de cal que contenían MK y LS en comparación con aquellos con MK y PNS (Tabla 2). La presencia de LS obstaculizó el proceso de carbonatación, lo que resulta en mayores cantidades de Ca(OH)_2 sin reaccionar y menores cantidades de CaCO_3 . Para los porcentajes más altos de MK (20%), la formación de compuestos

Debido a la menor cantidad de aditivo puzolánico incorporado en nuestras muestras y al proceso de curado a temperatura ambiente y con baja humedad relativa, la identificación por difracción de rayos X de las fases de aluminato cristalino y/o silicato en los difractogramas resultó ser casi imposible. No obstante, la formación de compuestos CSH, CSAH y CAH parece verse favorecida cuando el PNS estaba presente en comparación con LS y, por lo tanto, se encontraron valores más altos de resistencia a la compresión para MK12 que para MK20 (2,7 MPa frente a 1,3 MPa a 28 días y 3,3 MPa vs. 2,3 MPa a 182 días). La pérdida de masa entre 25 y 300 °C, que corresponde a los procesos de deshidratación de las fases hidratadas de silicato y/o silicoaluminato, es mayor para las muestras con PNS (-0,99% en muestras curadas durante 28 días y -0,93% tras 182 días) que para muestras con LS (-0,70% tras 28 días y -0,76% tras 182 días) (Tabla 2). La deshidratación de compuestos puzolánicos hidratados fue más evidente en muestras que contienen MK y PNS (MK12) que en aquellas muestras que contienen MK y LS (MK20).

Porosidad

El consumo de CH y el aumento en la cantidad de fases C-S-H, C-S-A-H y C-A-H generaron un refinamiento en la estructura de poros, que se estudió mediante porosimetría de intrusión de mercurio. La adición de MK a los morteros de cal redujo el diámetro medio del tamaño de poro de 0,83 μm a 0,56 μm tras 91 días de curado (Figura 3), debido a la reacción puzolánica y también al efecto de relleno del MK. El efecto de relleno del MK fue estudiado por Dinakar et al., 2013 en el cemento Portland ordinario y tras la adición de otros compuestos puzolánicos como NS [Duran et al., 2014; Pérez-Nicolás et al., 2016]. La formación de nuevas fases por reacción puzolánica también podría contribuir a la reducción del tamaño de poro. El resultado descrito aquí coincide con el aumento en la resistencia a la compresión observado para los morteros MK4.

La adición de PNS a morteros con el mayor porcentaje de MK (20%) no provocó cambios con respecto al diámetro medio de poro, pero el área bajo la curva fue mayor para la dosis más alta de SP (1% en peso) (Figura 3), que representa valores de porosidad más altos en los experimentos después de 91 días de curado y, por lo tanto, valores de resistencia a la compresión menores que los reportados para los morteros MK-cal (3,1 MPa para MK20 vs. 3,4 MPa para MK4) (Figura 3). El área bajo la curva fue menor para las muestras de cal que contenían los porcentajes de MK más altos (20%) y 0,5% de PNS (MK8), proporcionando así valores de resistencia a la compresión más altos (4 MPa).

El diámetro medio de poro aumentó de 0,56 μm para el mortero MK-cal (MK4) a 0,68 μm para MK-cal-0,5% en peso LS (MK16) o a 0,83 μm para MK-cal-1% LS (MK20) (Figura 3) a los 91 días de curado, lo que explica los valores más deficientes de la resistencia a la compresión (3,4 MPa MK4, 3 MPa MK16, 1,3 MPa MK20). Resultó evidente el incremento en el diámetro de tamaño de poro principal y también en el área bajo la curva para morteros LS, proporcionando consecuentemente menor resistencia mecánica.

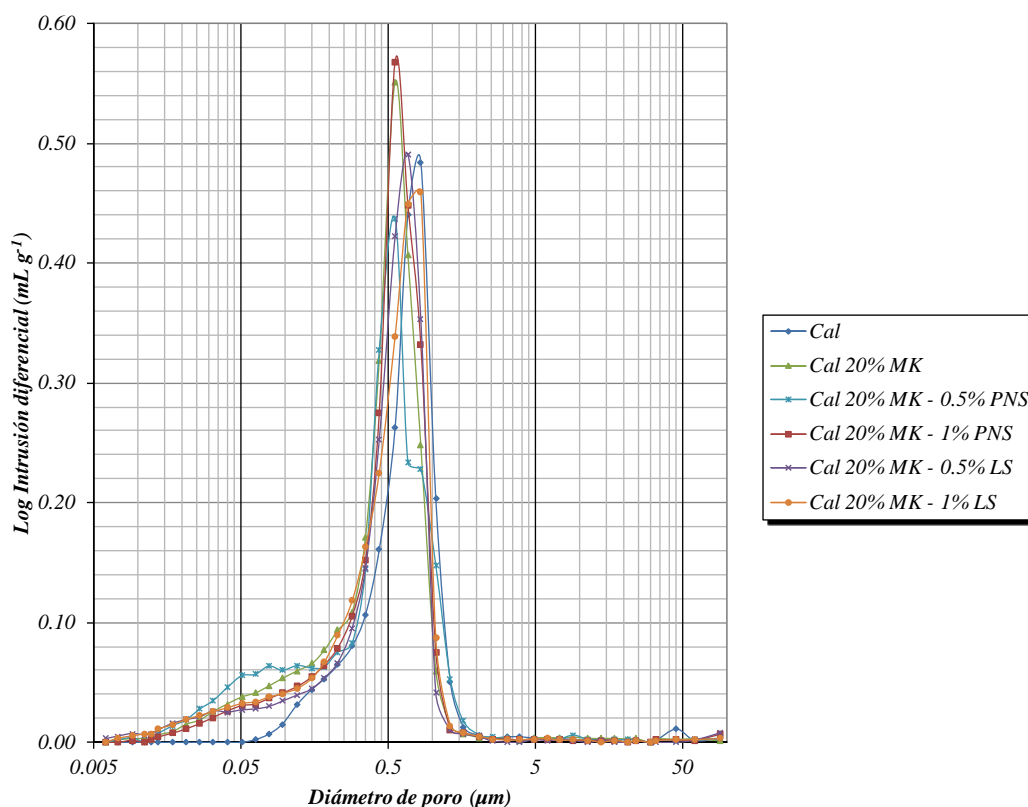


Figura 3. Distribución de tamaños de poro en muestras de morteros tras 91 días de curado

Se observó una mayor población de poros en el rango de poro 0,1-0,01 μm para los morteros con PNS. Los poros en ese rango se han atribuido a los poros de CSH [Drouet et al., 2015]. De nuevo, este resultado se correspondió con los del análisis térmico, en los que la formación de fases C-S-H, C-S-A-H y C-A-H se favoreció cuando estaba presente PNS.

Ensayos de durabilidad

Ensayos de hielo-deshielo

Las muestras del grupo control sometidas a la prueba de resistencia a las heladas (ciclos F-T, Freezing-Thawing, de congelación-descongelación) sufrieron una grave descomposición; de hecho fueron destruidas por completo después de un solo ciclo. Este resultado coincide con los datos previos de Izaguirre et al., 2010. La incorporación de MK claramente mejoró la durabilidad de los morteros frente a estos ciclos F-T, de una manera proporcional. Se pudo observar que las muestras con un 20% de MK soportaron hasta 24 ciclos F-T con deterioros severos sólo en el último ciclo. Nunes y Slizkova, 2016, han asignado este comportamiento favorable de los morteros que comprenden cal + MK al hecho de que la reacción puzolánica se mejora en condiciones húmedas.

Estos resultados están relacionados con la porosidad y la distribución del tamaño de poro. La clara reducción del diámetro medio de poro observada para los morteros de cal-MK en comparación con las muestras de cal sin adición puzolánica redujo la absorción de agua líquida, evitando su posterior congelación y daño por expansión y, en consecuencia, aumentando la durabilidad de este tipo de morteros.

Los valores de resistencia a la compresión (después de 7 y 14 ciclos F-T) se mantuvieron en cifras significativas para las muestras con las mayores adiciones de MK (20% en peso) (valores entre 1,5 y 2,5 MPa). Por el contrario, la resistencia a la flexión se vio afectada significativamente. Las fisuras observadas en MK4 aparecieron principalmente en las caras laterales. La resistencia a la compresión es paralela a las grietas longitudinales por lo que no se ve afectada. Sin embargo, la resistencia a la flexión se ve significativamente afectada por las grietas mencionadas, de acuerdo con el trabajo de Nunes y Slizkova, 2016.

La presencia de PNS en la muestra cal-MK fue ligeramente perjudicial para la durabilidad de las muestras, es decir, morteros con un 1%PNS y 20%MK (MK12) sufrieron destrucción total después de 19 ciclos F-T, y aquellos con 0,5%PNS y 20% MK (MK8) después de 20 ciclos. Contrariamente a lo descrito con PNS, el uso de LS provocó una durabilidad mucha menor de los morteros de cal-MK, con destrucción total después de sólo 10 y 12 ciclos FT cuando se añadieron, respectivamente, 0,5% y 1% de LS (muestras MK16 y MK20). A partir de estos últimos resultados, podríamos concluir que un uso combinado de LS y MK en morteros de cal aérea no desarrolla una resistencia adecuada contra los ciclos de hielo-deshielo, por lo que debería estudiarse un ajuste de la dosis. En la Figura 4 se ven imágenes de las muestras MK8 (con PNS) y MK16 (con LS) después de 10 ciclos F-T para ambos SPs.

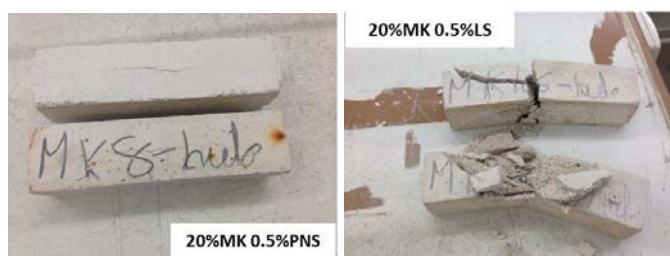


Figura 4. Comparativa de resistencia en muestras con PNS y LS tras 10 ciclos

Con respecto a la influencia de los SPs, las mayores variaciones en el tamaño medio de poro de las muestras fueron aquellas en las que se utilizó LS, aumentando notablemente los tamaños de poro (Figura 3) y consecuentemente proporcionando una mayor absorción de agua líquida. Por este hecho, la durabilidad de los morteros LS-MK-cal frente a ciclos hielo-deshielo fue la más baja.

Resistencia a la cristalización de sales: ataque por sulfatos

También se estudió la resistencia al ataque por sulfatos ($MgSO_4$). La mayor cantidad de MK no sólo no mejoró la durabilidad de los morteros sino que la empeoró. Las muestras con 6% de MK

(MK2) permanecieron hasta 27 ciclos con un grado intermedio de degradación (grado 3); sin embargo, las muestras con 10% de MK (MK3) sólo resistieron 12 ciclos antes de la destrucción, y las muestras con 20% (MK4) presentaron los menores valores de durabilidad con destrucción total después de 6 ciclos. Este resultado sugirió la presencia de compuestos de sulfato en las superficies [Duran et al., 2014; Izaguirre et al., 2010; Skaropoulou et al., 2009]. En el caso de morteros con PNS y MK, la mayor resistencia al ataque por sulfatos se observó cuando la cantidad de MK era intermedia (10%), para 0,5% de SP (MK7). En el caso de la adición de LS en el mortero MK-cal, se observó un comportamiento lineal: cuanto mayor era la cantidad de MK, mayor era el número de ciclos que la muestra toleraba en todos los porcentajes de SP. La Figura 5 representa las imágenes correspondientes a muestras con un 6% de MK y el mayor contenido en SP después de 5 ciclos de sulfato. Se observaron desintegraciones y pérdidas severas de una parte de los morteros en esta etapa.



Figura 5. Comparativa en muestras con PNS y LS tras 5 ciclos de cristalización de sales

Estos resultados tienen sentido al considerar la diferente velocidad de reacción y la formación de fases C-S-H. Como se menciona en las pruebas de porosidad, la formación de fases C-S-H, C-S-A-H y C-A-H se favoreció cuando estaba presente PNS. Cuando en la cal que contiene PNS se agregó un alto porcentaje de MK (MK8 y MK12), se favoreció la formación de fases de silicato y muy posiblemente de taumasita, fuertemente expansiva ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), que ha sido reportado como un importante mecanismo de degradación [Duran et al., 2014; Skaropoulou et al., 2009].

La mejora de la resistencia de los morteros de cal después de la adición de compuestos puzolánicos como MK se menciona también en artículos que tratan sobre el comportamiento de los morteros de cemento [Skaropoulou et al., 2009].

Conclusiones

El estudio del comportamiento en estado endurecido de morteros de cal aérea modificados con metakaolín (6,10 y 20%) y con superplastificantes (PNS o LS, 0,5 y 1%) mostró que las resistencias a compresión se incrementaban en función de la adición del componente puzolánico en la mezcla. Un exceso de aditivo superplastificante (1%) generó una menor resistencia a compresión, mientras que una adición del 0,5% favoreció, frecuentemente, las resistencias mecánicas, especialmente si se consideran largos tiempos de curado (1 año) y en particular para muestras con MK. Los ensayos de análisis térmico y de FTIR-ATR permitieron advertir que la carbonatación de la cal aérea se ve dificultada en presencia de LS, pudiendo asociarse a la

complejación de Ca^{2+} referida en la literatura para este aditivo químico. Las pérdidas de masa asociadas al agua unida a componentes hidráulicos se relacionaron con una mayor extensión de la reacción puzolánica en presencia del PNS.

Debe señalarse que las condiciones medioambientales elegidas para el curado (20°C y 60% HR) no favorecieron la formación de cantidades destacadas de fases hidráulicas. La microestructura de los morteros preparados mostró un menor tamaño medio de poro al añadir MK. Los aditivos químicos influyeron de manera diferente: se observó mayor tamaño de poro medio y mayor porosidad para muestras con LS, justificando así las peores resistencias mecánicas de estos materiales. La durabilidad también se relacionó con la estructura porosa: frente a ciclos de hielo/deshielo, los morteros presentaron mejor durabilidad al añadir MK. El PNS no resultó perjudicial en sistemas de cal+MK, todo lo contrario que LS.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MINECO (MAT2015-70728-P) y la Fundación "la Caixa". D. Jesús Fidel González-Sánchez agradece a la Asociación de Amigos de la Universidad de Navarra la concesión de la beca predoctoral.

Bibliografía

- Abbas, R., Abo-El-Enein, S.A., Ezzat, E-S., (2010) *Properties and durability of metakaolinblendedcements: mortar and concrete*, *Materiales de Construcción*, 60 (300), 33-49
- Amenta, M., Karatasios, I., Maravelaki-Kalaitzaki, P., Kilikoglou, V., (2017) *The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars*, *Construction and Building Materials*, 153, 527-534
- Arel, H.S., Aydin, E., (2017) *Effects of Ca-, Mg-, K-, and Na-lignosulfonates on the behaviour of fresh concrete*, *Construction and Building Materials*, 157, 1084-1091
- Azeiteiro, L.C., Velosa, A., Paiva, H., Mantas, P.Q., Ferreira, V.M., Veiga, R., (2014) *Development of grouts for consolidation of old renders*, *Construction and Building Materials*, 50, 352-360
- Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Jorne, F., Cidade, M.T., (2014) *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*, *Construction and Building Materials*, 50, 584-597
- Borsoi, G., Lubelli, B., Van Hees, R., Veiga, R., Silva, A.S., (2017) *Evaluation of the effectiveness and compatibility of nanolimeconsolidants with improved properties*, *Construction and Building Materials*, 142, 385-394
- Bras, A., Henriques, F.M.A., (2012) *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*, *Construction and Building Materials*, 26, 135-144
- Danner, T., Justnes, H., Geiker, M., Lauten, R.A., (2015) *Phase changes during the early hydration of Portland cement with Ca-lignosulfonates*, *Cement and Concrete Research*, 69, 50-60

- Dinakar, P., Sahoo, P.K., Sriram, G., (2013) *Effect of metakaolin content on the properties of high strength concrete*, International Journal of Concrete Structures and Materials, 7 (3), 215-223
- Drouet, E., Poyet, S., Torrenti, J.-M., (2015) *Temperature influence on water transport in hardened cement pastes*, Cement and Concrete Research, 76, 37-50
- Duran, A., Robador, M.D., Perez-Rodriguez, J.L., (2012) *Degradation of two historic buildings in Northern Spain by formation of oxalate and sulphate-based compounds*, International Journal of Architectural Heritage, 6, 342-358
- Duran, A., Navarro-Blasco, I., Fernandez, J.M., Alvarez, J.I., (2014) *Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars*, Construction and Building Materials, 58, 147-158
- El-Gamal, S.M.A., Amin, M.S., Ramadan, M., (2017) *Hydration characteristics and compressive strength of hardened cement pastes containing nano-metakaolin*, HRB Journal, 13 (1), 114-121
- Fernández, J.M., Duran, A., Navarro-Blasco, I., Lanás, J., Sirera, R., Alvarez, J.I., (2013) *Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars*, Cement and Concrete Research, 43, 12-24
- Frías Rojas, M., Cabrera, J. (2002) *The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems*, Cement and Concrete Research, 32, 133-138
- Frías Rojas, M., (2006) *Study of hydrated phases present in a MK-lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction*, Cement and Concrete Research, 36, 827-831
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., Velosa, A., (2012) *Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing*, ThermochimicaActa, 535, 36-41
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Faria, P., Grilo, J., Branco, T., Veiga, R., Velosa, A., (2014) *Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio*, Cement and Concrete Composites, 45, 264-271
- Hallal, A., Kadri, E.H., Ezziane, K., Kadri, A., Khelafi, H., (2010) *Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste*, Construction and Building Materials, 24, 1418-1423
- Izaguirre, A., Lanás, J., Alvarez, J.I., (2010) *Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment*, Cement and Concrete Research, 40 (7), 1081-1095
- Lanás, J., Sirera, R., Alvarez, J.I., (2005) *Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments*, ThermochimicaActa, 429 (2), 219-226
- Lanás, J., Sirera, R., Alvarez, J.I., (2006) *Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions*, Cement and Concrete Research, 36 (5), 961-970
- Navarro-Blasco, I., Perez-Nicolas, M., Fenrandez, J.M., Duran, A., Sirera, R., Alvarez, J.I., (2014) *Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanicreactives*, Construction and Building Materials, 73, 1-12

- Ng, S., Justness, H., (2016) *Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash*, Cement and Concrete Composites, 65, 41-54
- Nunes, C., Slizkova, Z., (2016) *Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture*, Construction and Building Materials, 114, 896-905
- Ouyang, X., Qiu, X., Chen, P., (2006) *Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate-a potentially useful water reducer*, Colloids Surface A, 282-283, 489-497
- Pérez-Nicolás, M., Duran, A., Navarro-Blasco, I., Fernandez, J.M., Sirera, R., Alvarez, J.I., (2016) *Study on the effectiveness of PNS and LS superplasticizers in aire lime-based mortars*, Cement and Concrete Research, 82, 11-22
- Rodríguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Ortega-Huertas, M., Hansen, E., (2005) *Nanostructure and irreversible colloidal behavior of Ca(OH)₂: Implications in cultural heritage conservation*, Langmuir, 21, 10948-10957
- Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., (2001) *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*, Cement and Concrete Composites, 23, 441-454
- Santos Silva, A., Gameiro, A., Grilo, J., Veiga, R., Velosa, A., (2014) *Long-term behavior of lime-metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition*, Applied Clay Science, 88-89, 49-55
- Shi, C., He, T-S., Zhang, G., Wang, X., Hu, Y., (2016) *Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete*, Construction and Building Materials, 108, 48-55
- Singh, L.P., Bhattacharyya, S.K., Shah, S.P., Mishra, G., Ahalawat, S., Sharma, U., (2015) *Studies on early stage hydration of tricalcium silicate incorporating silica nanoparticles: part I*, Construction and Building Materials, 74, 278-286
- Skaropoulou, A., Tsivilis, S., Kakali, G., Sharp, J.H., Swamy, R.N., (2009) *Long-term behaviour of Portland limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack*, Cement and Concrete Composites, 31 (9), 628-636
- Topçu, I.B., Atesin, O., (2016) *Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties*, Construction and Building Materials, 120, 189-197
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Kersner, Z., Rovnanikova, P, Cerny, R., (2012) *Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings*, Construction and Building Materials, 31, 22-28
- Zapata, L.E., Portela, G., Suarez, O.M., Carrasquillo, O., (2013) *Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions*, Construction and Building Materials, 41, 708-716
- Zhang, Y., Kong, X., (2015) *Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes*, Cement and Concrete Research, 69, 1-9

Protocolos de intervención en la restauración del Edificio catalogado del Puerto de Barcelona

Cristina Thió⁽¹⁾ Jordi Julià⁽²⁾, Júlia Gómez⁽³⁾

(1) *Licenciada en BBAA-Conservación y Restauración por la UAB; España, cthio@chroma.es*

(2) *Arquitecto por la UPC; España, abeba@coac.net*

(3) *Dra. Arquitecta y Máster en restauración y rehabilitación de edificios por la UPC; España, iso@chroma.es*

Resumen

En la actualidad se está llevando a cabo la restauración del edificio de la Junta de Obras del Puerto de Barcelona situado en la emblemática plaza del monumento a Colón. Se trata de un edificio aislado de planta rectangular de estilo ecléctico construido entre 1903 y 1907. Obra del ingeniero de caminos Juli Valdés, está catalogado como nivel C (Bien de Interés Urbanístico). En su origen albergó los servicios de correos, aduanas y acogidas de los pasajeros que llegaban a la ciudad condal. Años más tarde, después de los bombardeos sufridos durante la guerra civil, sus interiores sufrieron graves desperfectos y mutilaciones. Si bien éstos no fueron valorados nunca en su justa medida, son espacios de gran interés y de relevancia patrimonial debido a sus grandes salas diáfanas constituidas por arcadas de piezas prefabricadas de piedra artificial y de revestimientos de estuco de cal aérea pigmentados al fresco. Al tratarse de espacios realizados con elementos repetitivos, pero con gran variedad de lagunas y desperfectos, su restauración ha conllevado la redacción de protocolos de intervención concretos. Ello ha permitido sistematizar y facilitar el proceso de recuperación, preservando al máximo la obra existente y reconstruyendo el mínimo en cada caso con los materiales originales.

Palabras clave: Cal; Restauración; Protocolos; Patrimonio; Piezas prefabricadas

Introducción

Edificio situado en la emblemática plaza del monumento a Colón, al final de las Ramblas y al inicio del Moll de la fusta (ver Figura 1 y 2). Se trata de un edificio aislado de planta rectangular (20x50 m), formado por planta baja y primera, de estilo ecléctico y construido entre 1903 y 1907. Obra del ingeniero de caminos Juli Valdés está catalogada como nivel C: Bien de Interés Urbanístico (Ajuntament de Barcelona, 2018). Una crujía perimetral de 5 metros de profundidad construía las cuatro fachadas y definía un espacio interior de 40 x10 metros aproximadamente, tanto en la planta baja como superior. Dichos espacios eran especialmente relevantes y protagonistas del carácter del edificio. En la planta baja este espacio estaba lleno de elegantes columnas de fundición (ver Figura 3a), mientras que el de la primera planta, era una sala diáfana rodeada por arcadas realizadas con piezas de piedra artificial y revestimientos de estuco de cal aérea pigmentado al fresco (ver Figura 3b). Ésta además, estaba cubierta por una imponente

bóveda con luz cenital de 11,5 metros de altura. Cuatro torres en las esquinas ceñían formalmente el conjunto.

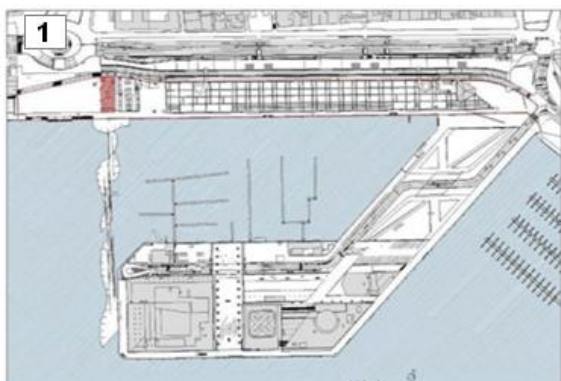


Figura 1: Plano situació del edifici



Figura 2: Edificio del Puerto de Barcelona

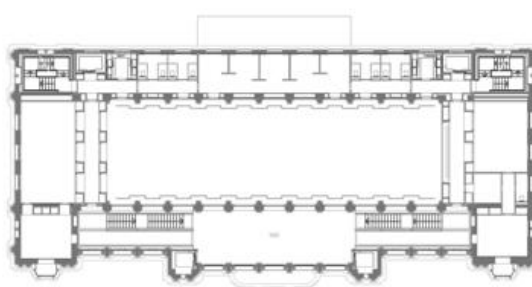
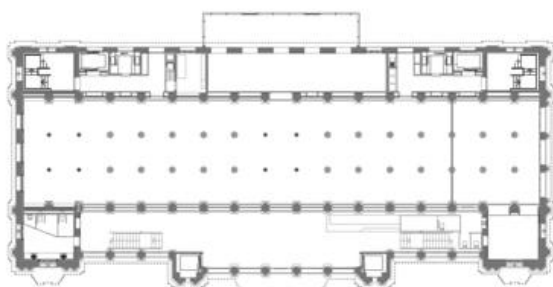


Figura 3: Imágenes y plantas del proyecto original de Juli Valdés a) Planta baja y b) Primera planta

En su origen el edificio albergó en la planta baja los servicios de correos, aduanas y acogidas de los pasajeros que llegaban a la ciudad condal y en la primera planta un restaurante llamado “*el Mundial*”. Años más tarde, después de los bombardeos sufridos durante la guerra civil, sus interiores sufrieron graves desperfectos y mutilaciones con el fin de adaptarlos a los sucesivos contenidos que iba incorporando el edificio.

Quizás la mutilación más negativa fue la comunicación de un nuevo núcleo de comunicaciones vertical principal y dos secundarios en el medio del edificio que mutilaron absolutamente las dos salas monumentales y la incorporación de falsos techos y sus divisorias verticales que

deterioraron notablemente las ornamentaciones que caracterizan este edificio. Finalmente, en las últimas décadas, este edificio se quedó en desuso. Todos estos cambios y transformaciones hicieron perder la claridad del proyecto original de Juli Valdés y el edificio se convirtió en una superposición de intervenciones confusas.

En la actualidad, se está llevando a cabo la restauración del edificio para ubicar las dependencias del Puerto de Barcelona. El proyecto pretende recuperar el aspecto original del edificio y de sus salas interiores. Espacios de gran interés y de relevancia patrimonial, arquitectónica y constructiva (ver Figura 4). En este contexto, fue necesario incorporar en la Dirección facultativa de la obra un especialista en restauración arquitectónica y de sus pieles, para establecer los protocolos de recuperación de los espacios, así como también de los materiales, revestimientos a tratar, recuperar y añadir. La finalidad de su participación es que se preserve al máximo el edificio original, reconstruyendo el mínimo en cada caso y siempre ejecutando estas intervenciones con los materiales originales.

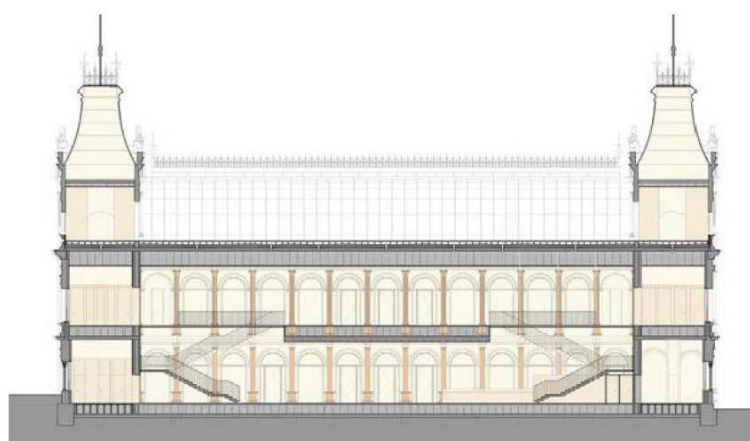


Figura 4: Sección longitudinal del proyecto de restauración por el vestíbulo principal.

En este artículo se detalla el proceso de actuación en la reintegración de las piezas de piedra artificial de los pórticos del edificio. Éstas son piezas prefabricadas y por lo tanto, se trata de piezas miméticas entre sí según el tipo. El método de reintegración establecido, descrito en este artículo, mantiene dicho sistema constructivo empleando moldes para restaurar y reproducir las piezas. Estos podrán ser rellenados in situ o bien, realizarse en el taller, siendo posteriormente trasladarlos a obra, donde se colocaran de tal manera que parezcan hechos in situ, es decir, disimulando las uniones entre piezas. En ningún caso, se admitirá la reintegración a mano alzada y con estucos, dado que es contrario al sistema constructivo original mediante prefabricados.

Protocolos de actuación en piezas de piedra artificial

Información previa

Antes de iniciar cualquier restauración de las piezas de piedra artificial de los pórticos (ver Figura 5) es conveniente analizar el mortero externo que las conforma. Esta información permitirá

reproducir dicho mortero para la restauración siendo lo más similar y compatible con el material existente.

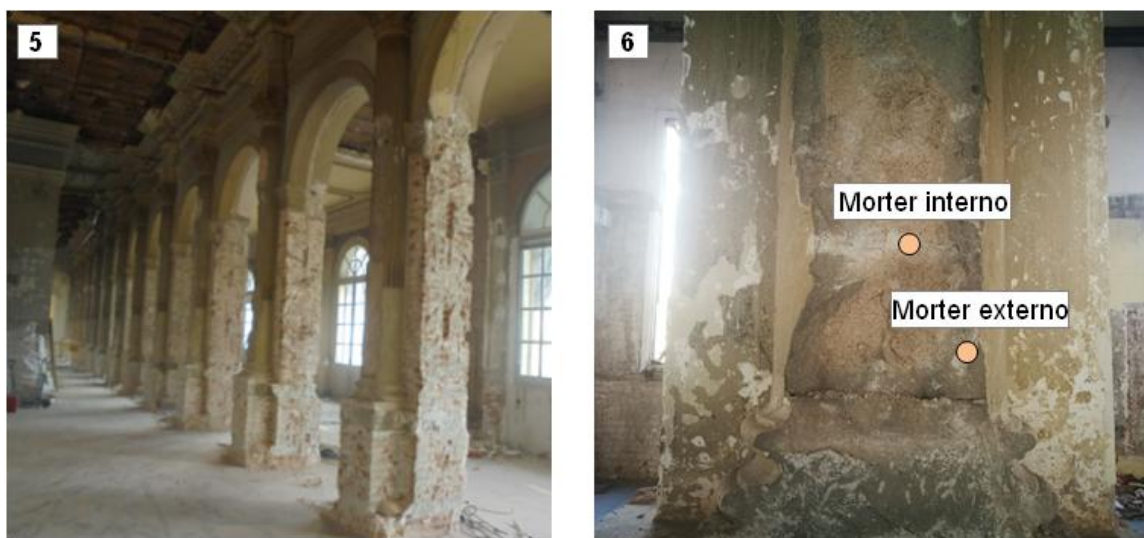


Figura 5: Pòrticos de la sala de la primera planta una vez saneados.

Figura 6: Detalle de una de las pieza prefabricadas

Como se puede ver en la Figura 6, las piezas prefabricadas de los pòrticos del edificio están configuradas a partir de dos capas de mortero, muy probablemente, respondiendo a su proceso de fabricación. La primera capa, más externa, es de color gris y tiene una granulometría del árido muy fina (entre 0-2 mm), la segunda, que responde al núcleo interno de la pieza, es de un color más ocre y tiene una granulometría del árido mayor (entre 0-5 mm). Dado que la mayoría de las partes que se deben recuperar forma parte de la capa externa de las piezas, se considera necesario obtener información únicamente de esta capa de mortero para la fabricación de las reintegraciones. No obstante, ello no excluye, que se deban realizar analíticas del mortero interno para su documentación.

Se propone analizar el mortero mediante la realización de dos ensayos. El primero sería un ensayo granulométrico (según la norma UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007), con el fin de obtener la curva granulométrico del árido empleado en las piezas prefabricadas. Además, ello puede servir para estimar su dosificación inicial. Por otro lado, se cree necesario efectuar un análisis DRX y así poder determinar la naturaleza del árido y conglomerante utilizado. Éste, según la época de construcción, podría tratarse de cemento natural o cal hidráulica, información que justificaría el material a usar posteriormente en su reproducción.

Trabajos previos

Preparación de los moldes

Se plantea realizar moldes de silicona y/o escayola y/o madera, según convenga, de las diferentes partes del basamento, columna, capitel y cornisa decorativa de los pòrticos

respondiendo al sistema de construcción originalmente empleado en estas piezas. En este sentido, se aconseja realizar moldes de madera en las piezas de las cornisas, de escayola o madera en las piezas del fuste de las columnas y por último, de silicona para las piezas de los capiteles. En cualquiera de las opciones, los moldes deberán ser realizados por profesionales especialistas (carpinteros, escayolistas o moldeadores).

Los moldes de las piezas de piedra artificial se obtendrán in situ, una vez limpias y saneadas las superficies y utilizando las piezas de los pórticos que se encuentren en mejor estado de conservación y completas, es decir, sin ninguna laguna. En el caso que no existir ninguna en buen estado en toda la sala, se rellenarían las lagunas con yeso o mortero de la mejor conservada antes de extraer el molde.

En las Figuras 7 y 8 se marcan y numeran, a modo de ejemplo, las diferentes piezas prefabricadas que existen en uno de los pórticos de la primera planta. Como se podrá observar, se plantea ejecutar 11 moldes, que después serán reutilizados en la restauración del resto de pórticos de la sala. Alguno de estos moldes, como por ejemplo el número 5 de la base de la columna, se plantea realizarlo en diferentes sub-moldes apilables y encajables entre sí dada la sección de la pieza original (ver figura 6a). De este modo se evitará cualquier problema surgido en el relleno de mortero del molde o cualquier defecto en la pieza reproducida, puesto que se rellenará el molde por fases. La valoración sobre si un molde se debe dividir en sub-moldes o hacerlo en su totalidad, se decidirá conjuntamente con la Dirección Facultativa de la obra una vez se haya establecido el sistema y material a utilizar en el molde.

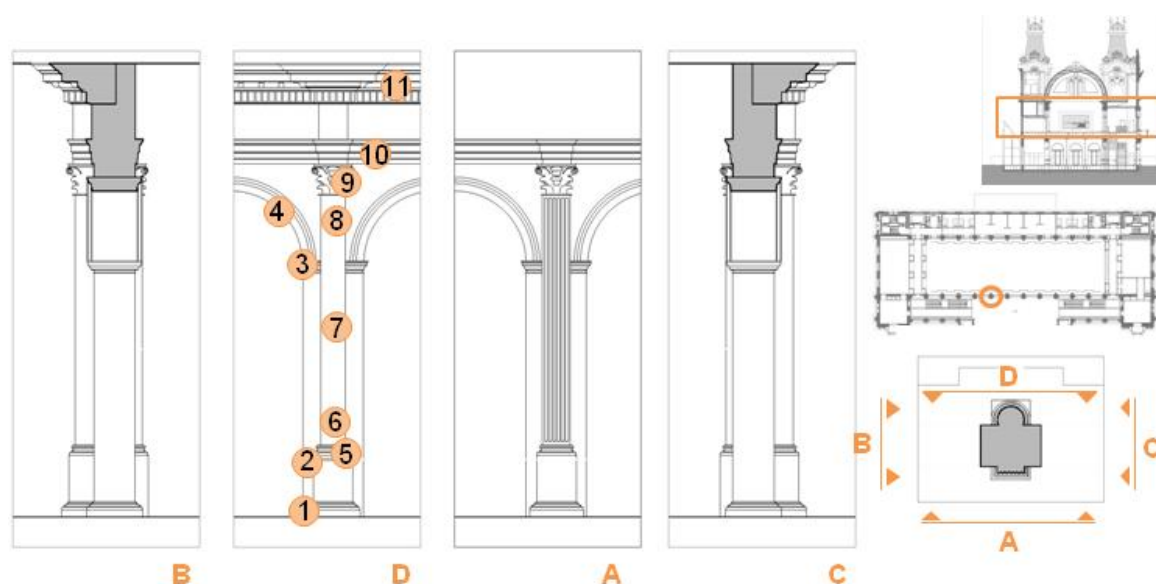


Figura 7: Ejemplo de la numeración de las piezas prefabricadas de uno de los pórticos de la sala de la primera planta



Figura 8 a y b: Ejemplo de la numeración de las piezas prefabricadas de uno de los pórticos de la sala de la primera planta

Preparación de las superficies de conexión

Se considera superficie de conexión aquella área o zona de la pieza prefabricada original que se encuentra rota y donde se adherirá el material de reconstrucción (ver Figura 6). Ésta hace falta que no sea lisa, que presente rugosidades y que esté consolidada (no disgregada o arenizada), a fin de garantizar una buena adherencia mecánica entre los dos materiales que se quieren adherir (el existente y el de reconstrucción). En este sentido, si la superficie de conexión no presenta estas características, será necesario preparar-la previamente, como por ejemplo picoteando la superficie, para conseguir una mejor adherencia. Asimismo, se considera indispensable colocar conectores corrugados de acero inoxidable, fibra de vidrio o carbono, según convenga, en estas superficies y clavarlos oblicuamente. De este modo se garantizará la adherencia y cualquier posible desprendimiento. La valoración del número de conectores de cada superficie se determinará in situ y se verificará por la DF de la obra.

Determinación de la dosificación del mortero de relleno

El mortero que se utilice para la reconstrucción de las piezas de piedra artificial deberá ser lo más parecido posible al existente. De este modo se podrá evitar cualquier daño a sufrir en un futuro por la incompatibilidad química o física entre materiales (original y reproducción). Asimismo, se seguirán las directrices de los criterios de restauración. Estos criterios son simplemente tocar el menos posible la pieza original, o sea que si el material original está fuerte, no se tiene que recortar para adaptarle el positivo sino al revés. Nunca recortar el original, ni sacrificarlo para que se adapte a los positivos de las reproducciones hechas en el taller. Por este

motivo, se apuesta por hacer los positivos in situ, rellenando únicamente los espacios vacíos o lagunas. Además, es necesario documentar gráficamente estas intervenciones y así en un futuro conocer las partes que son originales de las reproducciones. Del mismo modo, se cree imprescindible realizar un análisis previo del material original antes de iniciar cualquier actuación, dado que esta información permitirá establecer la naturaleza del conglomerante (cemento natural o cal) y el tipo de árido y su granulometría.

Una vez se determine la dosificación del mortero de reconstrucción, en base a esta información previa, se realizará una pequeña campaña de pruebas de relleno de los moldes, tanto si se hacen en taller o in situ. Esta campaña permitirá ajustar la dosificación del mortero para conseguir una pasta que se adecue a cada sistema de molde y vertido (más o menos fluido) y una vez seca la pieza, se valorará su acabado. Principalmente se valorará el contenido de agua a incorporar a la mezcla y si es necesario utilizar algún aditivo fluidificante, producto que se deberá tener el día de la campaña. Una vez establecida la dosificación, esta sólo podrá variar mínimamente en función de las condiciones climáticas en el momento de la producción de las piezas.

Descripción del proceso

Relleno de los moldes a in situ

A continuación se describirá el proceso de reconstrucción de las piezas de piedra artificial para hacer con los moldes in situ. Para ello se considerarán ejecutados los trabajos previos descritos en los apartados anteriores. El proceso permitirá preservar al máximo la obra existente y reconstruir el mínimo imprescindible en cada caso y será también el procedimiento válido para actuar sobre cualquier tipo de pieza de los pórticos. Conviene destacar que este tipo de intervención se ha de realizar en cada uno de los pórticos siempre en sentido vertical, de abajo a arriba, y de manera que nunca se inicie la reconstrucción de una pieza sin que la de debajo esté totalmente seca y con una resistencia mínima.

Paso 1) Colocación de los moldes

Los moldes se fijarán a la obra existente con tornillos, sargentos, etc.... En cualquier caso, su unión debe ser estanca para evitar filtraciones de material. Una vez que los moldes se encuentren fijados se pintará su parte interna con *Gomma laca* o cualquier otro material que actúe como desmoldador, para desmoldar con facilidad.

Paso 2) Saturación de la superficie de conexión

Antes de verter el mortero en el interior de los moldes se mojará siempre la superficie de conexión de las piezas existentes con agua, para evitar que éstas no absorban la de la mezcla de mortero. Se considerará que la superficie de unión está lista cuando no brille. Si lo hiciera, indicaría que todavía existe agua en la superficie de contacto y ello perjudicaría la adherencia del mortero de reconstrucción con el material existente.

Paso 3) Vertido del mortero en el molde

El vertido del mortero en el molde se ha de realizar despacio para evitar la formación de burbujas de aire ocluido en su interior. De la misma manera, en cada capa se debe compactar la mezcla del mortero vertido con una varilla rígida y lisa, introduciéndola diversas veces. En algunos de los moldes faltará la moldura final para terminar de reconstruir la pieza. En estos casos, esta moldura vendrá prefabricada de taller y se colocara a través de unos orificios de conexión realizados en la parte inferior de la pieza de taller, coincidentes con los conectores colocados en el último vertido de mortero en el molde. De este modo, el molde siempre tendrá una abertura superior de mínimo 3 cm para poder verter material. En cualquier caso estos aspectos se determinarán una vez se establezca la metodología y deberán ser aprobados por la DF.

Paso 4) Desmoldado de las piezas

Según la climatología se esperará entre 2 y 3 días a desmoldar la pieza para asegurar su completo secado. Una vez desmoldada se podrá continuar con la reconstrucción de la parte superior del pórtico siguiendo el mismo sistema descrito con anterioridad.

Paso 5) Curado de las piezas

Tras el desmolde de la parte reconstruida será necesario realizar el curado de la pieza a fin de evitar su fisuración. El curado deberá consistir en colocar una tela mojada sobre la superficie rellena y que abarque también una parte de la obra existente. Esta tela se deberá permanecer húmeda durante los 7 días consecutivos al desmoldado.

Reconstrucciones con moldes de taller

Existe la posibilidad que se puedan reproducir piezas en el taller, en condiciones de ejecución más controladas, y montarlas posteriormente en obra con el material existente. En este caso, igual que el anterior, se considerarán ejecutados los trabajos previos descritos en los primeros apartados y en ningún caso se aceptará un material de reproducción, o formas de moldes, que no sigan las indicaciones descritas. Asimismo se exigirá la documentación de todo el proceso de producción de las piezas en taller y del sistema empleado para su colocación en obra.

Paso 1) Preparación de los moldes.

Como en el caso anterior será necesaria la aplicación de *Gomma laca* o similar en la cara interior de los moldes para facilitar su desmoldado. Si fuera necesaria la colocación de armadura interna o conectores para su instalación, estos deberán ser siempre varillas de acero inoxidable, fibra de vidrio o carbono, de diámetro entre 6-8 mm, según convenga.

Paso 2) Vertido del mortero en el molde

El vertido del mortero en los moldes ha de ser lento y en fases. A diferencia del caso anterior la compactación se podrá realizar con mesa vibradora si el taller la dispone. Si no es el caso, se

deberá hacer con una varilla rígida y lisa introduciéndola diversas veces en cada fase de vertido. Así se conseguirá un mejor acabado y se reducirá el porcentaje de aire ocluido.

Paso 3) Curado de lea piezas

Como en el caso anterior es importante realizar el curado de las piezas durante los 7 días consecutivos al desmoldado para evitar cualquier fisuración. El procedimiento consistirá en tapar las piezas con tela mojada e ir regándola con agua para mantenerla siempre húmeda.

Paso 4) Corte de las piezas en obra

Nunca se aceptará la eliminación de parte de las piezas originales para facilitar el montaje de las reproducciones en obra. Siempre será más importante salvaguardar el patrimonio construido que permanece en el edificio. Dicho esto, las piezas deberán cortarse en obra para adaptarse, el máximo posible en cada caso, a la obra existente. De igual manera no se aceptarán juntas superiores a 10 mm entre la obra existente y las reproducciones. El método de colocación deberá ser aprobado previamente por la DF.

Paso 5) Anclaje de las piezas

El sistema de anclaje de las piezas reproducidas en la obra se deberá realizar siempre con varillas de acero inoxidable o de fibra de vidrio o carbono, de diámetro ≥ 6 mm. En caso que las piezas realizadas en el taller no incorporen conectores de colocación se realizaran en obra. Para anclar las piezas se efectuaran perforaciones en la obra existente con un taladro de diámetro 4 mm superior a los de los conectores a colocar. Una vez ejecutadas dichas perforaciones se procederá a su relleno con mortero de cal hidráulica o con resinas epoxídicas, según establezca la DF, y seguidamente se introducirán los conectores.

Paso 6) Relleno de las juntas

En ningún caso se admitirán juntas vistas entre las piezas reproducidas y la obra existente superiores a 10 mm. De igual forma se exigirá el relleno de las juntas con el mismo mortero de relleno y no se permitirá el empleo de ningún otro material entre la reproducción y la obra original.

Conclusiones

A partir de las directrices establecidas se pretende ejecutar la restauración de las piezas prefabricadas del edificio de una forma sistemática y sencilla, solventando las diferentes casuísticas que presentan las piezas de los pórticos una vez han sido saneadas. Asimismo, su ejecución permite preservar al máximo la obra existente y reconstruir el mínimo en cada caso con los materiales originales.

En el caso que nos ocupa es muy interesante la relación que tenemos con Saint Astier con los que estamos colaborando para poder obtener morteros distintos con cal hidráulica y áridos

seleccionados tanto por el material como su granulometría y esperamos poder obtener los primeros resultados pronto.

La idea de hacer los moldes en obra es una forma de salvaguardar el máximo las piezas originales y es extrapolable a cualquier otro trabajo y des del punto de vista de la salvaguarda del patrimonio pensamos que es un tema a tener en cuenta ya que demasiadas veces se repican los originales en su totalidad para ser substituidos por otros de piedra artificial de características muy distintas y el elemento o edificio pierde en entidad y personalidad.

Tener conocimiento de los materiales y de su aplicación es imprescindible para poner en valor nuestro patrimonio.

Bibliografía

UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).

Carbonell de masy, Manuel; (1993). *Conservación y restauración de monumentos*. Vanguard Gràfic. Barcelona. ISBN 84-604-8232-4. Dep. Legal: B-39.720-93.

Ajuntament de Barcelona (2018) Cercador del patrimoni arquitectònic (online). Disponible: <http://w123.bcn.cat>. Identificador: 869.

Zevi, Luca. Direttore scientifico (2007). *Il manuale del restauro architettonico*. Gruppo Manscosu Editore. Roma. ISBN 88-87017-00-X.

Morteros de relleno con base cal con adición puzolánica y diversos aditivos

Jesús Fidel González-Sánchez, Íñigo Navarro-Blasco, Adrián Durán, Rafael Sirera,

José M. Fernández, José I. Álvarez

Grupo de investigación MIMED (Heritage, materials and environment), Departamento de Química, Universidad de Navarra, mimed@unav.es

Resumen

Los morteros de relleno o inyección, especialmente destinados a reparación de cavidades y defectos de albañilería, deben fluir adecuadamente en estado fresco y combinar resistencia y durabilidad. Para conseguir algunas de estas características pueden utilizarse aditivos químicos: superplastificantes, para mejorar la fluidez; adiciones puzolánicas, para conseguir resistencias adecuadas en ambientes con limitado acceso de CO₂ y una mejora de la durabilidad; e hidrofugantes, de manera que, sin perjudicar la permeabilidad de estos materiales al vapor de agua, se evite la penetración de agua por capilaridad mejorando la durabilidad.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, toda la información disponible se circunscribe al efecto de un único aditivo, sin contemplar el posible efecto conjunto o incluso sinérgico de las combinaciones más interesantes de dos o más aditivos y/o adiciones puzolánicas. El estudio de las sinergias entre estos componentes ofrece posibilidades muy interesantes de avance científico-técnico. Precisamente este es el objetivo del trabajo: diseño de nuevos morteros de inyección de cal que puedan ser utilizados para la restauración del Patrimonio Edificado mediante combinación adecuada de aditivos superplastificantes (éteres de policarboxilato, condensados de naftaleno-formaldehído, sulfonato de melamina y ácido poliacrílico), hidrofugante (oleato sódico) y adiciones minerales puzolánicas (microsílice y metacaolín).

Palabras clave: Cal; Superplastificantes; Microsílice; Metacaolín; Hidrofugante

Introducción

Los morteros de relleno o inyección, especialmente destinados a reparación de cavidades y defectos de albañilería, deben fluir adecuadamente en estado fresco y combinar resistencia y durabilidad [1-5]. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, toda la información disponible se circunscribe al efecto de un único aditivo, sin contemplar el posible efecto conjunto o incluso sinérgico de las combinaciones más interesantes de dos o más aditivos y/o adiciones puzolánicas [6,7]. Sólo de forma reciente se ha publicado algún trabajo que plantea la combinación de una adición puzolánica con algún aditivo superplastificante, con muy buenos y esperanzadores resultados [8]. Las combinaciones simultáneas de dos o más aditivos y/o adiciones en morteros de cal no han sido investigadas previamente por la comunidad científica y el estudio de estas sinergias ofrece posibilidades muy interesantes de avance científico-técnico.

Para la preparación de morteros de cal, la bibliografía ha detallado la posibilidad de incrementar resistencias, acortar tiempos de fraguado y permitir el endurecimiento - aun cuando el acceso del CO₂ esté dificultado - mediante la inclusión de adiciones puzolánicas a las mezclas. El metacaolín ha sido uno de los aditivos más clásicamente estudiados, aunque también la nanosílice ha sido objeto de algunas investigaciones [9-12]. Existen trabajos que estudian la compatibilidad de algunas de las combinaciones entre nanosílice y metacaolín con superplastificantes de tipo éteres de policarboxilato. Prácticamente no se han hecho estudios de compatibilidad con otros superplastificantes del mismo tipo y diferente peso molecular ni con otros habituales en la química de los conglomerantes – cemento principalmente – como son los lignosulfonatos, condensados de naftaleno, sulfonato de melamina o ácido poliacrílico. Todos estos compuestos químicos son reductores de la cantidad de agua de amasado y mejoradores de la trabajabilidad, y presentan grandes ventajas para su uso en morteros de inyección y de relleno. Tampoco se conoce la actividad ni compatibilidad entre ellos con agentes hidrofugantes, reductores de la absorción de agua por capilaridad (entre los que cabe mencionar a los oleatos y estearatos). El empleo de estos hidrofugantes o repelentes de agua es muy importante para minimizar las vías de entrada de agua a los morteros, y estas combinaciones entre cal + adición puzolánica + superplastificantes + hidrofugantes pueden dar lugar a una gama de morteros de enorme utilidad en la restauración del Patrimonio Edificado, muy particularmente para morteros de inyección o de relleno (grouts, en el término inglés).

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es determinar el comportamiento y la compatibilidad en morteros de cal de diversas combinaciones de aditivos y adiciones minerales puzolánicas, con el fin de optimizar las mezclas y así obtener nuevos morteros que sirvan para la restauración del Patrimonio Arquitectónico. Se estudiarán desde el punto de vista científico y técnico las combinaciones de cal aérea cálcica con adiciones puzolánicas (metacaolín o microsílice), superplastificantes (éteres de policarboxilato, condensados de naftaleno-formaldehído, sulfonato de melamina y ácido poliacrílico) y un hidrofugante (oleato).

Materiales y métodos

Preparación del mortero. Proporciones de mezcla

Las proporciones de los morteros de cal fueron: 25% cal apagada y ensacada suministrada por Cal Industrial S.A. (Calinsa Navarra), clasificada como CL-90 por la normativa española y europea, 75% árido calizo (arena de clase AF-T-0/1-C, suministrada por Caleras de Liskar, grupo HRPASA). Además, cuando fue necesario, se agregaron con respecto a la cal los siguientes componentes: 20% de aditivo mineral puzolánico (metacaolín, producto comercial Metaver de NEWCHEM o microsílice, suministrada por ULMEN Europa), 0,5% de hidrofugante (oleato sódico, proporcionado por ADI-CENTER) y 1% de superplastificante (PCE1, producto comercial Melflux de BASF; sulfonato de melamina, Melment F10 de BASF; sulfonato de naftaleno, comercializado como Conplast SP340 FA de FOSROC International y ácido poliacrílico, de Sigma-Aldrich). El agua de amasado se estableció en un 31%, cifra resultante de ajustar la demanda de agua al mortero control (sin aditivos ni adiciones) para conseguir una fluidez – medida en mesa de sacudidas – en torno a 185 mm.

En primer lugar, se pesaron todos los componentes por separado y se mezclaron en seco en una mezcladora de sólidos BL.8-CA de Lleal S.A. girando el tambor principal y el intensificador durante cinco minutos para asegurar la buena homogeneización del material. Posteriormente se pesó el agua necesaria en cada caso y se incorporó a la mezcla anterior, introduciéndola en la amasadora planetaria IBERTEST IB32-040E durante 90 segundos a velocidad lenta y ajustada según UNE-EN 196-1 [13].

Ensayos en Fresco

Posteriormente se realizaron los ensayos en fresco comenzado por el ensayo de mesa de sacudidas [14], siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 1015-3. El ensayo consistió en rellenar un molde troncocónico con el mortero fresco en dos capas, compactando cada una de ellas con 10 golpes de un pisón. Posteriormente, se enrasó, se desmoldó y se efectuaron 15 sacudidas con una frecuencia de un golpe por segundo. Por último, se midió el diámetro de la masa en dos direcciones perpendiculares entre sí, con un calibre.

Posteriormente se determinó el período de trabajabilidad del material según la norma UNE-EN 1015-9 [15]. Cada 15 minutos se introdujo lentamente una sonda de penetración, anotando el peso. Cuando dicho peso fue superior a 1500 g, el ensayo se dio por finalizado.

Ensayos en Endurecido

Se obtuvieron probetas prismáticas de 40x40x160 mm en moldes triples de acero PROETI C0090 lubricados con aceite mineral. Para el llenado y compactación se siguió la norma UNE-EN 196-1 realizándose el llenado en dos capas y empleando para compactar cada capa una compactadora automática (IBERTEST IB32-045E-1), que proporcionó 60 golpes por capa con una frecuencia de un golpe por segundo, eliminando así las burbujas de aire presentes en la mezcla. Finalmente se eliminó el exceso de masa y se enrasó con una regla, desmoldándose a las 24 horas. Se dejaron fraguar en una zona donde la temperatura y la humedad es constante.

Las resistencias mecánicas se midieron a 28, 91, 182 y 365 días, para observar las posibles modificaciones con el tiempo. Para todas estas medidas se rompieron 3 probetas, con el fin de conseguir valores representativos. Para los ensayos de resistencia a compresión se empleó una prensa con un dispositivo de rotura a compresión Proeti ETI 26.0052 a una velocidad de rotura 5-50 kp·s⁻¹ con un intervalo de tiempo entre 30 y 90 segundos.

La estructura porosa del material se estudió por porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), usando un equipo Micromeritics AutoPore IV 9500 con un intervalo de presiones de 0,0015-207 MPa, que registró automáticamente la presión, el diámetro de poro y el volumen de intrusión de mercurio.

La evaluación de la hidrofiliidad de la muestra fue llevada a cabo con un instrumento de medición del ángulo de contacto OCA 15EC Dataphysics. De esta manera se pudo determinar el ángulo de contacto de la gota de agua depositada sobre la superficie de la muestra, y el tiempo para la absorción de la misma por el material.

Resultados y discusión

Propiedades del mortero en fresco

Densidad de la pasta

La pasta sin reductor de agua más densa resultó ser la combinación de cal-metacaolín-oleato, como se muestra en el siguiente gráfico, lo que supondría hacer uso de mayor cantidad de esta mezcla si se desea emplear en la restauración. Sin embargo al agregar los diferentes superplastificantes, como se muestra en la Figura 1, hay cambios en la densidad de todas las pastas.

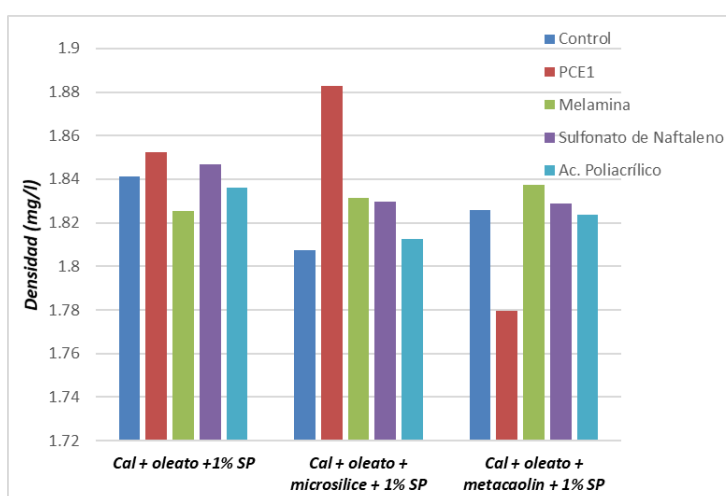


Figura 1. Densidad de las diferentes mezclas de pasta

Para el caso del PCE1 en la mezcla cal-oleato y cal-oleato-microsílíce aumenta, siendo esta última la mezcla más densa de todas. La mezcla cal-oleato-metacaolín resulta tener una densidad menor respecto al control y es la menos densa de todas las mezclas hechas en este estudio. Al hacer uso de la melamina en la mezcla cal – oleato la densidad disminuye, mientras que para las otras dos mezclas aumenta. Cuando se emplea el sulfonato de naftaleno en todas las mezclas hay un aumento de la densidad de la pasta. Y cuando se añade el ácido poliacrílico aumenta la densidad en la mezcla cal-oleato-microsílíce, mientras que en las otras dos mezclas disminuye.

Valor de escurrimiento y trabajabilidad (tiempo abierto)

La consistencia de la pasta se estudió tanto para la mezcla de cal + oleato + agente puzolánico con y sin la presencia de aditivo superplastificante. En la Figura 2 se muestra cómo es afectado el escurrimiento de la cal cuando se mezcla con un hidrofugante y el agente puzolánico. Como se puede observar la mezcla de cal con oleato disminuye el escurrimiento, mientras los dos agentes puzolánicos (tanto el metacaolín como la microsílíce) la aumentan. En mayor medida la microsílíce, con forma esférica, incrementa el escurrimiento por permitir la lubricación de la pasta en fresco. Cuando se mezclan la cal, el oleato y el metacaolín la trabajabilidad es muy

semejante a la de la mezcla cal + oleato, sin embargo es mayor el valor de escurrimiento de la mezcla de cal, oleato y microsíllice.

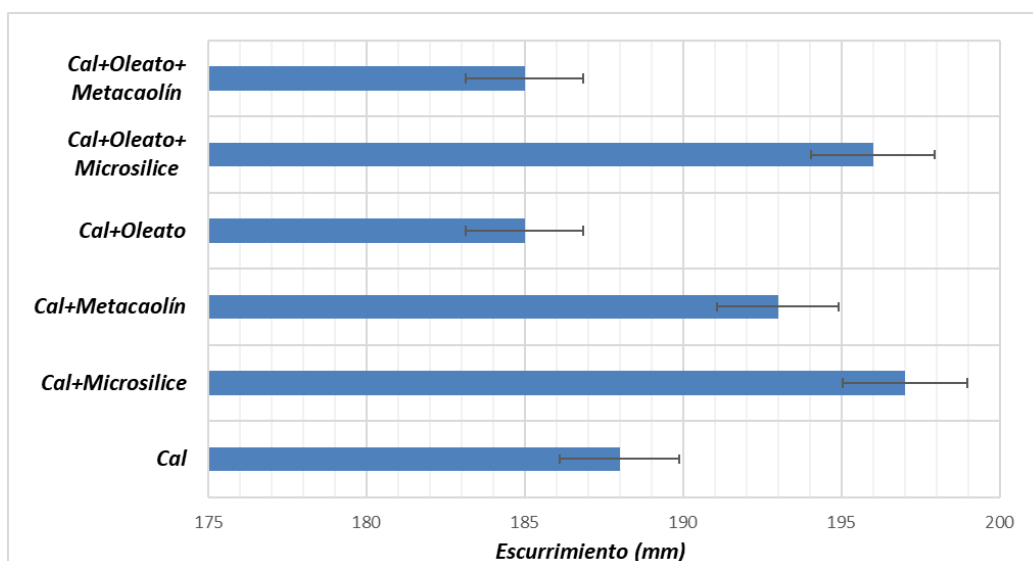


Figura 2. Consistencia de las pastas sin plastificante

En la Figura 3 se representa la consistencia de las mezclas en fresco cuando se hace uso de un superplastificante. El ácido poliacrílico disminuye el escurrimiento respecto al valor de la mezcla control. Al emplear el sulfonato de naftaleno el escurrimiento aumenta en todos los casos, al igual que cuando se hace uso de la melamina. Al añadir PCE1, la trabajabilidad de la mezcla aumenta considerablemente, sobrepasando el valor de 300 mm, con una mezcla de elevada fluidez. La eficacia de los derivados de éteres de policarboxilato se ha mencionado en la literatura en sistemas de cal y de cemento, y se fundamenta en la importancia de los impedimentos estéricos (más eficaces) de estos aditivos frente a los electrostáticos (de peor rendimiento).

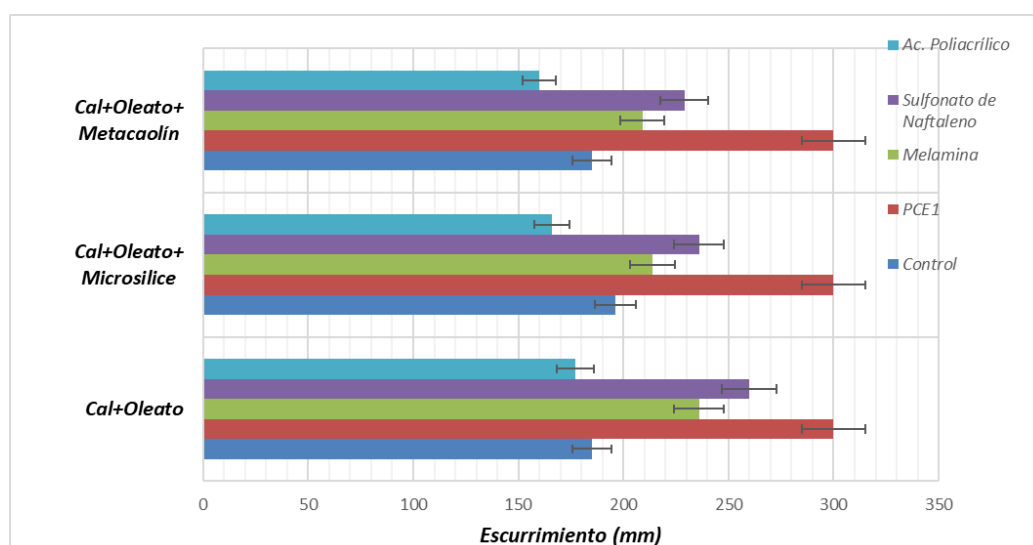


Figura 3. Consistencia de las pastas con plastificante

La trabajabilidad de las diferentes mezclas de cal, hidrofugante y agente puzolánico se describe en la Figura 4. Se puede observar que la adición del oleato sódico acelera el endurecimiento de la muestra, mientras que los dos agentes puzolánicos – sorprendentemente - lo retrasan. Cuando se efectúa la mezcla entre estos componentes aumenta la trabajabilidad, pudiendo destacar que la mezcla de cal, oleato y microsílíce es la que más aumenta la trabajabilidad en comparación con las otras.

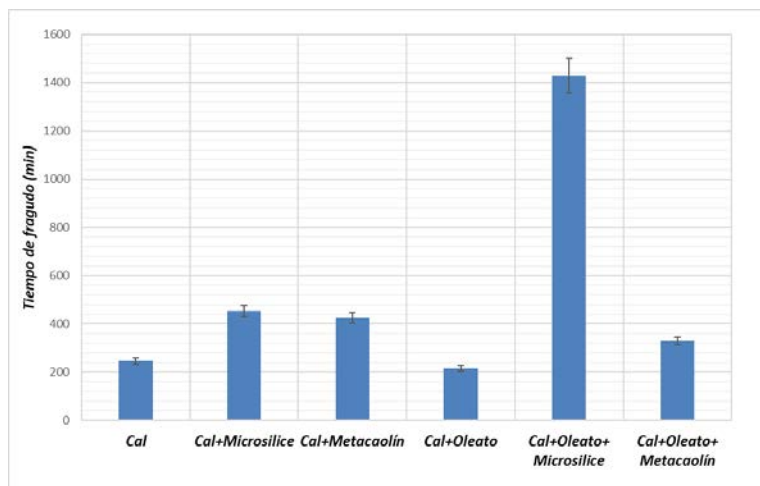


Figura 4. Trabajabilidad de las pastas sin plastificante

La trabajabilidad experimenta cambios sustanciales cuando a las mezclas anteriores se les agrega un superplastificante, como se puede observar en la Figura 5, resultando la mezcla con PCE1 la de mayor trabajabilidad. Es tan elevado que resulta un tiempo abierto excesivamente alto como para poder emplear esa mezcla. Para las mezclas de cal, oleato y microsílíce la adición de un superplastificante (excepto el PCE1) acorta considerablemente el tiempo de fraguado, lo cual también podría ser de gran ayuda para mejorar la trabajabilidad sin tener un tiempo de fraguado tan largo en esa mezcla.

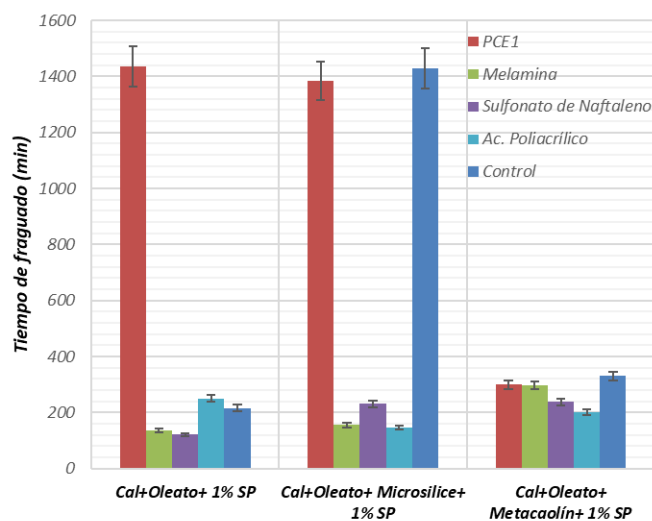


Figura 5. Trabajabilidad de las pastas sin plastificante

Propiedades del mortero endurecido

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, para las muestras sin adición de superplastificante, se representa en la Figura 6.

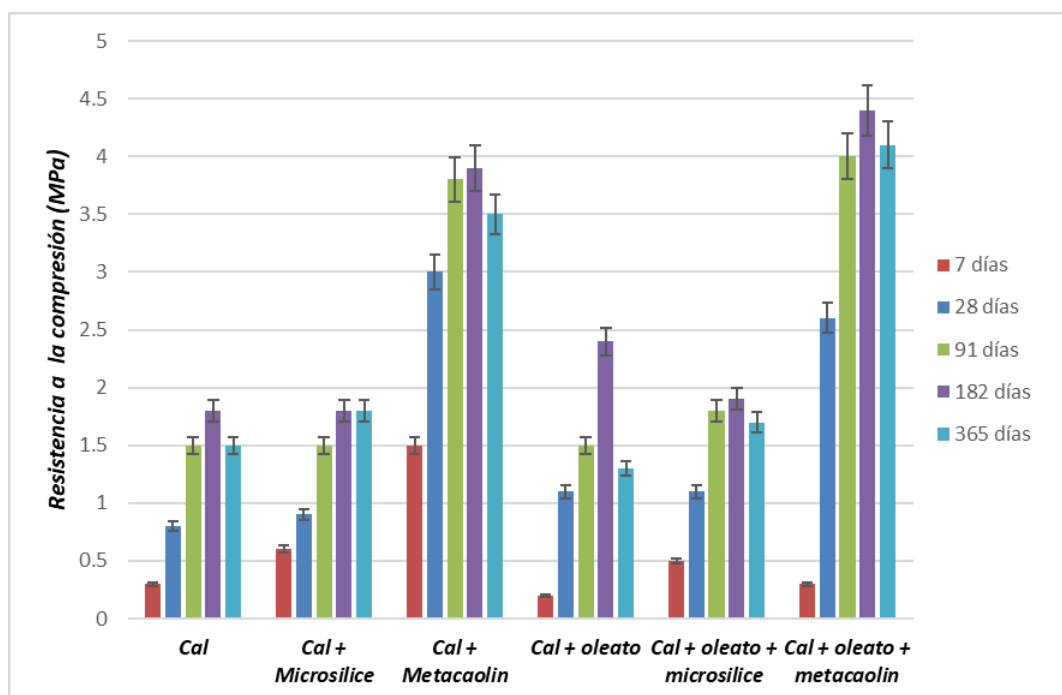


Figura 6. Resistencia a la compresión en los morteros endurecidos a diferentes tiempos sin plastificante

La mezcla y el tiempo en el cual se encuentra el mayor valor de resistencia es cuando la cal se mezcla con el metacaolín testada a los 182 días. Cabe destacar que en todos los casos la resistencia a la compresión aumenta al hacer uso de la mezcla de la cal con cualquier otro componente, ya sea el el hidrofugante (oleato sódico) y/o alguno de los agentes puzolánicos (metacaolín y microsílíce).

Cuando se agregó el 1% de los plastificantes la resistencia a la compresión cambio en todas las mezclas como se muestra en la Figura 7. Para el PCE1 en la muestra de cal-oleato y cal-oleato-microsilíce la resistencia a la compresión aumentó y para la mezcla de cal-oleato-metacaolín la resistencia disminuyó ligeramente. Puede advertirse que para esta última mezcla la resistencia disminuyó al agregar cualquier superplastificante. En el caso de emplear la melamina y el sulfonato de naftaleno en las mezclas de cal-oleato y la mezcla de cal-oleato-microsilíce la resistencia a la compresión aumentó. En la primera mezcla, al usar la melamina, el aumento llevó la cifra hasta el doble de su valor inicial, aproximadamente. Con respecto al ácido poliacrílico en todos los casos la resistencia a la compresión disminuyó y el uso de este superplastificante hace que la mezcla tenga la menor fuerza de compresión en este estudio.

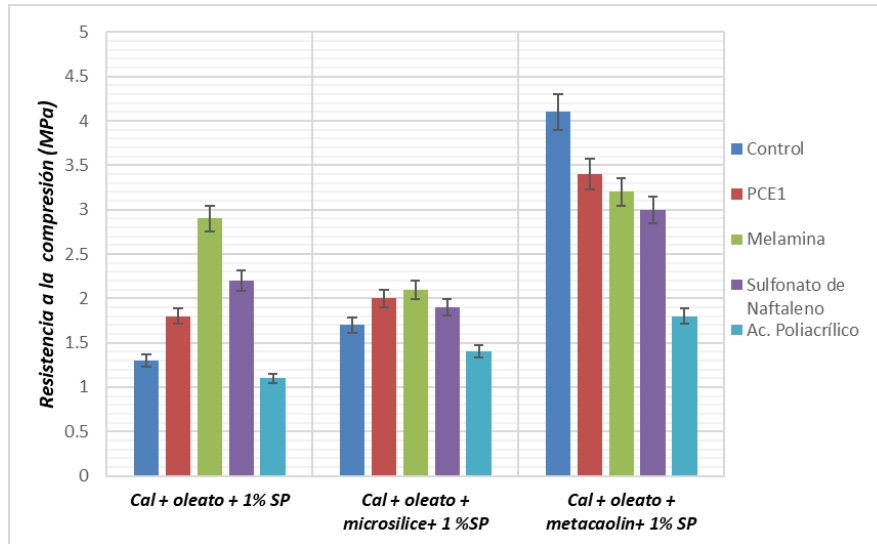


Figura 7. Resistencia a la compresión en los morteros endurecidos a 365 días con plastificante

Porosimetría

Las mediciones de distribución de tamaño de poro (ver Figura 8 A para algunos ejemplos) llevadas a cabo por MIP mostraron que la adición del aditivo puzolánico y del hidrofugante redujo la porosidad relacionada con poros de alrededor de 1 μm de diámetro debido a: (i) el efecto de relleno de la microsíllice y del metacaolín (siendo este último quien redujo más la cantidad); y (ii) a la reacción puzolánica.

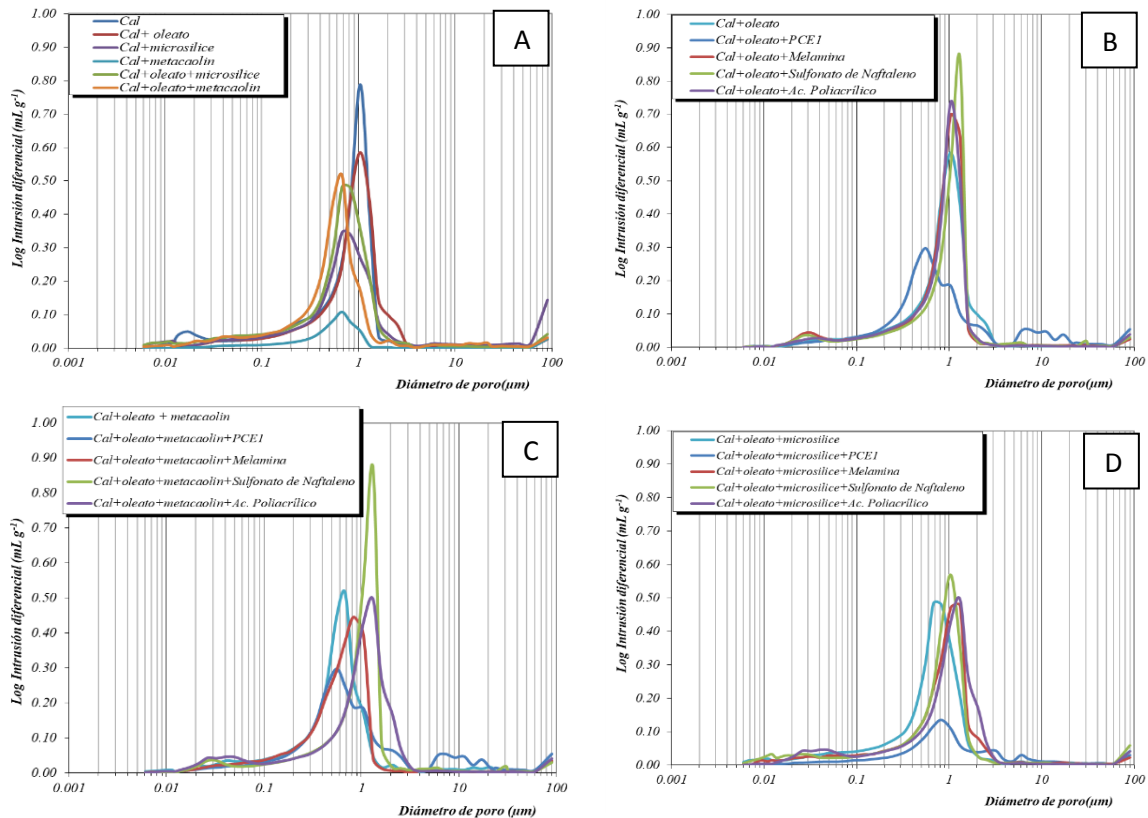


Figura 8. Distribuciones de tamaño de poro de diferentes muestras de pasta después de 365 días de curado.

Además, los pequeños poros capilares atribuidos a la formación de C-S-H experimentaron una clara disminución (ver el rango de poros entre 0,1 y 0,01 μm). La reducción de poros más grandes explica el aumento de las resistencias mecánicas como consecuencia de la presencia de microsílíce y metacaolín.

En el caso de la mezcla del cal-oleato (Figura 8B) y superplastificante, la presencia de PCE1 disminuye la presencia de poros alrededor de 1 μm , sin embargo, dio lugar a la aparición de poros en el rango de 6 a 11 μm . En el caso de la mezcla cal-oleato-metacaolín y superplastificante (Figura 8C), se advierte una disminución considerable en los poros de tamaño alrededor de 1 μm con todos los superplastificantes. Sin embargo, cuando se emplea el sulfonato de naftaleno la cantidad se mantiene casi constante, por lo que se puede decir que el PNS obstaculizó la formación de CSH, debido a que no hay disminución de los poros en la zona de 1 μm de, en cambio, el PCE1 favoreció la formación de estas fases. Cuando se sustituyó el metacaolín por la microsílíce en las mezclas con superplastificantes (Figura 8D) disminuyeron los poros de tamaño alrededor de 1 μm , incluso al agregar el PNS observándose la mayor reducción al agregar el PCE1.

Ángulo de contacto

Se utilizó un instrumento de medición de ángulo de contacto óptico (OCA 15EC Dataphysics) para determinar el ángulo de contacto de agua estático (WCA) y el tiempo de absorción de agua (es decir, el tiempo de desaparición de la gota de agua después de su deposición, vida útil de la gota de agua, parámetro juzgado de interés para sustratos muy porosos). El ángulo de contacto se determinó usando gotas de 5 μL y se realizaron dos mediciones consecutivas para cada muestra fraguada a 365 días, con el fin de obtener resultados confiables. Los resultados de esta medición se muestran en la Tabla 1, donde además se describe si hubo absorción completa de la gota de agua depositada, ya que en algunas de las mezclas no fue posible la medida en un plazo razonable del ángulo, por la porosidad e hidrofiliicidad que tienen los morteros de cal.

Tabla 1: Resultados de la medida del ángulo de contacto

Mezcla	Ángulo de contacto	Absorción completa de la gota de agua y desaparición en corto intervalo de tiempo
Cal+Oleato	75,0	No
Cal+Oleato+Microsilice	59,2	No
Cal+Oleato+Metacaolín	28,8	Si
Cal+Oleato+PCE1	66,8	No
Cal+Oleato+Melamina	53,5	No
Cal+Oleato+PNS	29,4	Si
Cal+Oleato+Ac. Poliacrílico	58,2	No
Cal+Oleato+Microsilice+PCE1	95,1	No
Cal+Oleato+Microsilice+Melamina	30,2	Si
Cal+Oleato+Microsilice+PNS	29,6	Si
Cal+Oleato+Microsilice+Ac. Poliacrílico	13,7	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+PCE1	123,6	No
Cal+Oleato+Metacaolín+Melamina	30,4	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+PNS	40,1	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+Ac. Poliacrílico	11,9	Si

La mezcla que resultó ser más hidrorrepelente fue la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-PCE1, debido a: (i) como se pudo observar anteriormente, esta mezcla fue la de menor porosidad total entre las testadas; (ii) el PCE1 no interfiere con la actividad hidrofugante del oleato, resultando dos aditivos altamente compatibles. La mezcla más hidrofílica es la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-Poliacrílico, lo que plantea la hipótesis – que deberá resolverse - de una interacción química entre el ácido poliacrílico y el oleato, de tal manera que la capacidad hidrofóbica de este último disminuye, permitiendo que la mezcla de libre paso a la absorción de agua. Cabe destacar que la hidrorrepelencia en todas las mezclas ocurre, fundamentalmente, en la superficie de las mismas, debido por el carácter tensioactivo del oleato sódico. La parte hidrofóbica es la que queda expuesta en la superficie durante el proceso de mezcla con dispersión acuosa. Sin embargo, cuando se intenta estudiar el efecto hidrorrepelente en la parte interna de alguna probeta, habitualmente no es posible medir el ángulo de contacto ya que la hidrorrepelencia es mucho menor en esta zona y debido a la porosidad del mortero la gota desaparece absorbida, se puede decir que es debido a que la mezcla esta poco hidrofugada pese al 0.5% de oleato.

Resumen de resultados

En la Tabla 2 se resumen todos los resultados de este trabajo experimental, enumerando en cada ensayo a las muestras del 1 al 4, donde el número 1 se refiere a la muestra que tiene un resultado parecido a la de un mortero de cal común y el número 4 representa una mejora en la prueba en la que se está evaluando.

Tabla 2: Resumen de los resultados de los ensayos realizados, tanto en fresco como en endurecido a los morteros estudiados

Mezcla	Propiedad					
	Trabajabilidad	Tiempo de Fraguado	Resistencia a la compresión	Porosidad	Ángulo de contacto	Calificación cualitativa global
Cal	1	1	1	1	1	5
Cal+Oleato	1	3	1	1	4	10
Cal+ Microsilice	4	1	2	3	1	11
Cal+ Metacaolín	2	1	3	4	1	11
Cal+Oleato+Microsilice	3	1	2	2	2	10
Cal+Oleato+Metacaolín	1	1	4	2	1	9
Cal+Oleato+PCE1	4	1	2	4	3	14
Cal+Oleato+Melamina	2	3	4	3	3	15
Cal+Oleato+PNS	3	4	3	1	2	13
Cal+Oleato+Ac. Poliacrílico	1	1	1	2	3	8
Cal+Oleato+Microsilice+PCE1	4	1	3	4	4	16
Cal+Oleato+Microsilice+Melamina	2	3	3	3	2	13
Cal+Oleato+Microsilice+PNS	3	2	2	1	2	10
Cal+Oleato+Microsilice+Ac. Poliacrílico	1	4	1	2	2	10
Cal+Oleato+Metacaolín+PCE1	4	2	4	4	4	18
Cal+Oleato+Metacaolín+Melamina	2	2	3	2	2	11
Cal+Oleato+Metacaolín+PNS	3	3	2	1	2	11
Cal+Oleato+Metacaolín+Ac. Poliacrílico	1	4	1	2	1	9

Se ha considerado mejora, para los morteros de inyección estudiados, y siempre dentro de unos límites razonables, una mejora en la fluidez (trabajabilidad), un acortamiento del tiempo de fraguado (generalmente elevado para los morteros de cal), un incremento en las resistencias a compresión desarrolladas, una reducción de porosidad y una superficie hidrofóbica que genere repelencia al agua para minimizar la absorción de la misma y prevenir el deterioro.

Como se puede observar en la tabla anterior, la mezcla entre cal-oleato-metacaolín/microsilíce-Ac. Poliacrílico es la mezcla que menos cambios tiene comparándola con un mortero de cal normal, mientras que la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-PCE1 es la que más cambios favorables en todos los aspectos estudiados tiene, al ser la mezcla con mayor resistencia a la compresión, mejor fluidez, menor porosidad y mayor hidrorrepelencia. Además la trabajabilidad de esta mezcla mejora con respecto al control sin superplastificante.

Conclusión

A través de este estudio con un punto de vista científico y técnico se logró determinar el comportamiento y la compatibilidad existente en morteros de cal con diversas combinaciones de aditivos y adiciones minerales. Este trabajo describe las propiedades de las diferentes mezclas entre cal aérea cálcica, adiciones puzolánicas y un hidrofugante. Los resultados son favorables si se desea usar alguna de estas mezclas en la restauración del Patrimonio Arquitectónico, resultando como mejor la mezcla de cal-oleato-metacaolín-PCE1 que mejora las propiedades de un mortero ordinario de cal, para este uso.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el Proyecto MAT2015-70728-P del Ministerio de Economía y Competitividad. J.F. González-Sánchez agradece a la Asociación de Amigos de la Universidad de Navarra por una beca pre-doctoral.

Referencias

1. S. Andrejkovičová, C. Alves, A. Velosa, F. Rocha, *Bentonite as a natural additive for lime and lime-metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings*, Cement and Concrete Composites, 60 (2015): 99-110
2. J.S. Pozo-Antonio, *Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate*, Construction and Building Materials, 77 (2015): 472-478
3. B.A. Silva, A.P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials, 72 (2014): 208-218
4. Rodríguez-Navarro, C., Hansen E., Ginell W. S., *Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty*, J. Am. Ceram. Soc., 81 (1998): 3032-3034
5. Conclusions of the Symposium "Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings", Rome, Materials and Structures, 23 (1990): 235
6. I. Navarro-Blasco, M. Pérez-Nicolás, J.M. Fernández, A. Duran, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes*

modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives, Construction and Building Materials, 73 (2014): 1-12

7. J.M. Fernández, A. Duran, I. Navarro-Blasco, J. Lanas, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars*, Cement and Concrete Research, 43 (2013): 12-24
8. I. Karatasios et al., *Photo-induced carbonation of lime-TiO₂ mortars*, Applied Catalysis B: Environmental, 95 (2010): 78-86
9. B.A. Silva, A.P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials, 72 (2014): 208-218
10. V. Nežerka, Z. Slížková, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová, V. Petrářová, *Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust*, Cement and Concrete Research, 64 (2014): 17-29
11. A. Arizzi, G. Cultrone, *Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study*, Constr. Build. Mater., 31 (2012): 135-143
12. A. Duran, I. Navarro-Blasco, J.M. Fernández, J.I. Alvarez, *Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica*, Construction and Building Materials 58 (2014): 147-158
13. UNE-EN 196-1, Método de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas, 2005.
14. UNE-EN 1015-3, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas), 2000.
15. UNE-EN 1015-9, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, 2000.

Efecto del disolvente en la síntesis de nanocal

Sagrario Martínez-Ramírez⁽¹⁾, Laura Rubio⁽¹⁾, Ignacio Cascales⁽¹⁾, Moisés Martín-Garrido⁽¹⁾, M.

Teresa Blanco-Varela⁽²⁾

(1) Instituto de estructura de la Materia (IEM-CSIC), Madrid, España, sagrario.martinez@csic.es

(2) Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (IETcc-CSIC), Madrid, España, blancomt@ietcc.csic.es

Resumen

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tiene una baja solubilidad en agua, 1,7 g/L a 20 °C, por lo que es necesario adicionar elevadas cantidades de agua para tener una aceptable concentración de calcio en disolución. Es conocido que en disoluciones azucaradas se aumenta la solubilidad por formación de un complejo entre ciertos azúcares y el calcio. En este trabajo se aborda la síntesis, mediante un proceso de precipitación homogéneo, de hidróxido cálcico de tamaño nanométrico, utilizando como disolvente disoluciones azucaradas. Se analiza mediante diferentes técnicas instrumentales (Raman, ATD/TG) la formación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en dichas disoluciones azucaradas y el rendimiento de dichas reacciones. A través de microscopía electrónica de transmisión se determina el tamaño de las partículas, siendo bastante regular, tanto en forma como en tamaño, llegándose a obtener partículas de tamaño entre 10 y 15 nm con formas circulares.

Palabras clave: Nanocal; ATD/TG; TEM

Introducción

La restauración y conservación de los edificios del Patrimonio Histórico-Artístico requiere la utilización de materiales y métodos compatibles con los que se van a restaurar, pero mejorando, en la medida de lo posible, las propiedades y características del material inicial. Así todo material de naturaleza caliza deberá ser restaurado con un material de base $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que endurecería por reacción con el CO_2 atmosférico. Sin embargo, la concentración del CO_2 en el aire es baja, unos 380 ppm, que reaccionarían con 639 ppm de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, haciendo que la reacción sea muy lenta. Con el fin de incrementar la velocidad de reacción entre el hidróxido cálcico y el CO_2 atmosférico, las investigaciones actuales se orientaron hacia la síntesis de nanopartículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en las que se favorece la nucleación frente al crecimiento [1-5]. Salvadori and Dei [6] en el año 2001 fueron pioneros en la síntesis de nanopartículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en medio alcohólico, siguiendo la metodología de síntesis de nanopartículas de $\text{In}(\text{OH})_3$ descrita años antes por Pérez-Maqueda [7]. Así sintetizaron nanocales con tamaños entre 30 y 60 nm a 150°C.

Por otra parte es conocido que la solubilidad del calcio aumenta, a temperatura ambiente, en presencia de determinados azúcares por la formación de complejos [8], planteándose como objetivo del trabajo la síntesis, a temperatura ambiente de nanopartículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en medio azucarado.

Experimental

Los reactivos utilizados fueron sacarosa (5 y 10%) como medio azucarado y dos disoluciones CaCl_2 1M y 2M a las que se añadió NaOH 2M. Todas las disoluciones se prepararon con agua ultrapura Milli-Q, previamente descarbonatada. Al cabo de 24 h a temperatura ambiente, la disolución se filtró a vacío, y el sólido se lavó varias veces con agua descarbonatada. La determinación de la formación de las fases mineralógicas formadas se realizó mediante Raman, los espectros se registraron en un equipo Micro-Raman confocal Renishaw Invia equipado con un microscopio Leica, el láser utilizado fue un Renishaw Nd:YAG de 532 nm. Las medidas se realizaron con una potencia de salida del láser de 5mW, un tiempo de adquisición de 10 segundos, y 5 acumulaciones. Las frecuencias se calibraron con silicio.

Se analizó la forma y tamaño de las nanopartículas mediante TEM en un equipo JEM 2100. Se determinó el porcentaje de Ca(OH)_2 formado mediante ATD/TG en un equipo Perkin-Elmer en el que las muestras se calentaron en atmósfera de nitrógeno entre 25-950 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °/min.

En la Tabla 1 se muestran las composiciones utilizadas en la síntesis de las nanopartículas, así como el tamaño final de las mismas determinado por TEM.

Tabla 1. Composición inicial, tiempo de reacción, y tamaño de las partículas

Muestra	Tiempo reacción (h)	sacarosa (%)	$[\text{Ca}^{2+}]$ (g/mL)	Tamaño partícula (nm)
NPs1	24h	10	0,8	10-15
NPs2	24h	5	0,4	10-15

Resultados y discusión

En la Figura 1 (izquierda) se muestra el espectro Micro-Raman de las muestras sintetizadas en las que se observan las dos señales características del Ca(OH)_2 , la más intensa a 3618 cm^{-1} debido a las vibraciones de tensión de las uniones O-H, y la de mediana intensidad a 358 cm^{-1} que se asigna a vibraciones de red Ca-O [9]. Adicionalmente se observa una señal ancha en el intervalo $1100\text{-}1050 \text{ cm}^{-1}$ debida a las tensiones simétricas de vibración de los grupos carbonato (ν_1) que se han formado por reacción con el CO_2 atmosférico.

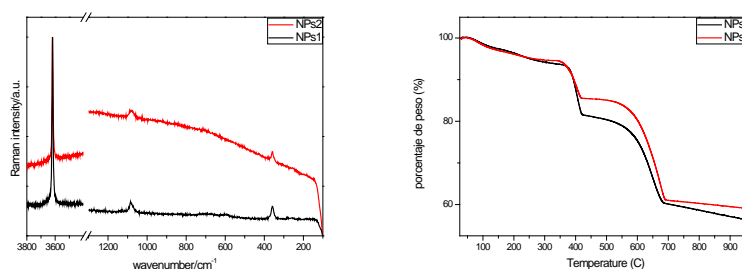


Figura 1: Izqda) Micro-Raman (laser $\lambda = 532 \text{ nm}$); dcha) ATD/TG en atmósfera de N_2 de las nanopartículas sintetizadas

En la Figura 1 (derecha) se muestra el TG de las dos muestras en las que se observan diferentes intervalos de pérdida de peso cuyas asignaciones se muestran en la Tabla 2.

El primer intervalo entre 25 y 105°C, corresponde a la pérdida de agua adsorbida por la muestra que es similar en ambos casos. La segunda pérdida de agua se asocia a la pérdida de agua del carbonato cálcico amorfo que se transforma en carbonato cálcico cristalino, el cual, junto con el carbonato cálcico cristalino que se haya formado en la muestra, se descarbonata en el intervalo 430-800°C. La muestra sintetizada con sacarosa al 10% presenta un mayor porcentaje de portlandita así como de carbonatos amorfos.

Tabla 2.- Porcentajes de Ca(OH)₂, H₂O, carbonato cristalino y carbonato amorfo (ACC) presentes en ambas muestras

Intervalo de temperaturas	NPs1	NPs2
%H ₂ O (25-105°C)	1,6	1,9
% ACC (120-330°C)	21,6	16,4
% Ca(OH) ₂ (345-420°C)	50,1	37,3
% CaCO ₃ cristalino (430-800°C)	48,4 (21,6 + 26,8)	59,5 (16,4 + 43,1)

En la Figura 3 se muestra el tamaño de ambas nanopartículas, observándose en ambos casos formas redondeadas y tamaños similares 10-15 nm.

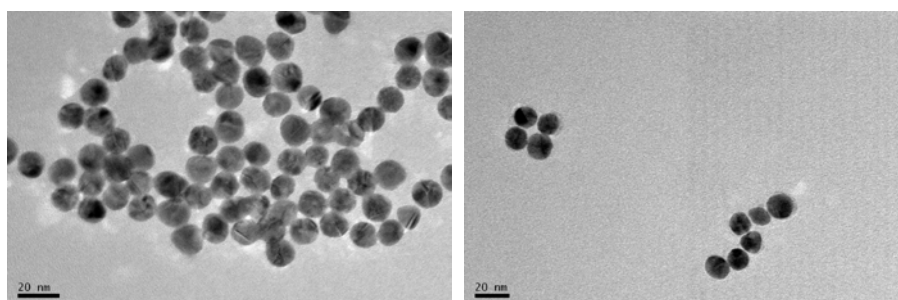


Figura 3: Imagen TEM de las nanopartículas sintetizadas dcha) NPs1; izqda.) NPs2

De acuerdo a Pannetier [8], la sacarosa forma un complejo con el calcio aumentando la solubilidad de la misma. Dicho complejo puede tener diferente relación Ca/sacarosa en función de ambas concentraciones. En este trabajo asumimos que todo el calcio que forma carbonato se debe a calcio libre que no ha formado complejo y el calcio que forma Ca(OH)₂ es el calcio procedente del complejo con la sacarosa. Así se determina que un 27,1% del calcio está en forma Ca(OH)₂ en NPs1 y un 20,2% en NPs2. Lo que supone que hay casi 2 moles de calcio/mol de sacarosa en NPs1 y 1,4 moles de calcio/mol sacarosa en NPs2. Estos datos estarían de acuerdo con los modelos propuestos para la formación del complejo de la sacarosa con el calcio [8, 10]. Aunque la relación inicial calcio/sacarosa es la misma inicialmente, 0.125, la formación de portlandita es diferente al producirse diferentes complejos entre ambos compuestos.

Conclusiones

Se han sintetizado, a temperatura ambiente, nanopartículas de Ca(OH)_2 redondeadas cuyas dimensiones son similares a las obtenidas por otros métodos, cuyo diámetro oscila entre 10 y 15 nm.

Inicialmente las disoluciones tienen la misma relación calcio/sacarosa, sin embargo el complejo que forman es diferente, con mayor proporción de calcio en el caso de la disolución de sacarosa al 10%, lo que origina una mayor formación de nanopartículas de Ca(OH)_2 .

El rendimiento de la reacción es cercano al 50% o incluso inferior, por lo que se necesitan más investigaciones modificando algunas de las variables.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por la Comunidad de Madrid y el Fondo Social Europeo mediante el Programa GEOMATERIALES-2-2013/MIT-2914. M.M.G agradece al Fondo Social Europeo la financiación recibida.

Referencias

- [1] Yura, Keita; Fredrikson, Karl; Matijevic, Egon. (1990). *Preparation and Properties of Uniform Colloidal Indium Compounds of Different Morphologies*. *Colloid of Surfaces* 50, 281.
- [2] Wilhelmy, Deborah; Matijevic, Ego. (1984). *Preparation and Properties of Monodispersed Spherical Particles of Zinc Sulphide*. *J. Chem. Soc.* 80, 563.
- [3] Matijevic, Egon; Scheiner, Paul. (1978). *Ferric Hydrous Oxide Sols (II)1. Preparation of Uniform Particles Hydrolysis of Fe(III) -Chloride,-Nitrate, and -Perchlorate Solutions*. *J. Colloid Interf. Sc.* 63, 509.
- [4] Hamada, Shuichi; Kudo, Yoshiyuki; Minagawa, Kazuhiro. (1990). *The Formation of Monodispersed Indium (III) Hydroxide Particles by Force Hydrolysis at Elevated Temperature*. *Bull. Chem. Soc, Jnp.* 63,102.
- [5] Sugimoto, Tadao; Matijevic, Egon. (1980). *Formation of Uniform Spherical Magnetite Particles by Crystallization from Ferrous Hydroxide Gels*. *J. Colloid Interf. Sc.* 74, 227.
- [6] Salvadori, Barbara; Dei, Luigi. (2001). *Synthesis of Ca(OH)_2 Nanoparticles from Diols*. *Langmuir* 17, 2371.
- [7] Pérez Maqueda, Luis A; Wang, Laifeng; Matijevic, Egon. (1998). *Nanosize Indium Hydroxide by Peptization of Colloidal Precipitates*. *Langmuir* 14, 4397.
- [8] Pannetier, Nathalie; Khoukh, Abdel; François, Jeanne. (2001). *Physico-Chemical Study of Sucrose and Calcium ions interactions in Alkaline Aqueous Solutions*. *Macromol. Symp.* 166, 203.
- [9] Garbev, Krassimir; Stemmermann, Peter; Black, Leon; Breen, Chris; Yarwood, Jack; Gasharova, Biliana. (2007). *Structural Features of C-S-H(I) and Its Carbonation in Air—A Raman Spectroscopic Study. Part I: Fresh Phases*. *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 900.
- [10] Pannetier, Nathalie; Habas, Jean-Pierre; Peyrelasse, Jean; François, Jeanne. (1999). *Rheological properties of the system lime/sucrose/water*. *Rheol Acta*, 38, 241.

Bibliografía

UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).

Carbonell de masy, Manuel; (1993). *Conservación y restauración de monumentos*. Vanguard Gràfic. Barcelona. ISBN 84-604-8232-4. Dep. Legal: B-39.720-93.

Ajuntament de Barcelona (2018) Cercador del patrimoni arquitectònic (online). Disponible: <http://w123.bcn.cat>. Identificador: 869.

Zevi, Luca. Direttore scientifico (2007). *Il manuale del restauro architettonico*. Gruppo Manscosu Editore. Roma. ISBN 88-87017-00-X.

Cal como sustrato para incorporación de agentes fotocatalíticos

María Pérez-Nicolás, Íñigo Navarro-Blasco, José M. Fernández, José I. Álvarez

Grupo de investigación MIMED (Heritage, materials and environment), Departamento de Química, Universidad de Navarra, mimed@unav.es

Resumen

Diferentes morteros de cal fueron modificados por la incorporación en masa de aditivos fotocatalíticos nanoestructurados (TiO_2 o TiO_2 dopado con hierro (Fe-TiO_2) o vanadio (V-TiO_2)). Las propiedades plásticas y endurecidas de estos morteros han sido evaluadas para estudiar la influencia de estos nanoaditivos. Los retrasos en la demanda de agua observados en las pastas de cal se atribuyeron al impedimento de la difusión de CO_2 dentro de la pasta. El TiO_2 y el TiO_2 dopado no mostraron reactividad puzolánica alguna. El examen por microscopía electrónica de barrido de los morteros de cal mostró que las fases predominantes en la microestructura eran placas hexagonales de portlandita y las aglomeraciones gruesas escalenoédricas de calcita. Se encontró que el Fe-TiO_2 se distribuía homogéneamente, mientras que el análisis EDS demostró la tendencia al aglomeramiento del V-TiO_2 . La capacidad de absorción de agua no se vio afectada por la incorporación de nanoaditivos, lo cual es una característica favorable para la aplicación de estos morteros.

Palabras clave: Cal aérea; Porosimetría de intrusión de mercurio; Dopado de TiO_2 ; Microscopía electrónica de barrido; Resistencia a compresión.

Introducción

A los materiales cementicios se les pueden agregar aditivos fotocatalíticos con el fin de mejorar su actividad y ampliar su campo de aplicación a nuevas áreas. La eficacia de estos cementos fotocatalíticos ha sido probada en diferentes trabajos previos, que muestran la actividad de descontaminación de la atmósfera y las propiedades de autolimpieza [Wang et al., 2012]. La titania, TiO_2 , aparece como el compuesto activo más ampliamente utilizado en estos materiales a base de cemento [Sugrañez et al., 2013]. Bajo irradiación UV, la titania ha demostrado una eficacia fotocatalítica extraordinariamente buena. Sin embargo, para ampliar la sensibilidad de la titania a la luz visible, se está explorando el uso de aditivos dopados [Janus et al., 2015]. Estos aditivos muestran la capacidad de absorber fotones de luz visible, lo que permite la aplicación de materiales fotocatalíticos en áreas con baja, si alguna, incidencia de fotones UV. El dopaje con metales de transición (Fe, Cr, V...) es una de las alternativas más estudiadas [Pelaez et al., 2012].

Además del cemento Portland (PC), se pueden utilizar otras matrices para inmovilizar los aditivos fotocatalíticos. Por ejemplo, la cal aérea, como material aglutinante de los morteros de cal, también podría ser un sistema adecuado para fijar los fotocatalizadores. La literatura muestra una falta en cuanto al conocimiento sobre la presencia de fotocatalizadores en esta matriz conglomerante. El uso de diferentes aglutinantes permitiría aplicar materiales fotocatalíticos en muchos lugares diferentes y aprovechar los diferentes efectos sinérgicos

positivos que podrían surgir como consecuencia de la estructura química específica, mineralógica y porosa de este aglutinante [Sugrañez et al., 2013; Wang et al., 2012; Karatisios et al., 2010].

El efecto de la incorporación de los aditivos fotocatalíticos nanoestructurados en la cal aérea como aglutinante debe ser cuidadosamente evaluado. Los cambios en las propiedades del estado plástico de los morteros pueden tener una gran influencia en la viabilidad de la incorporación del fotocatalizador como modificaciones, por ejemplo, en los tiempos de hidratación. La literatura ha demostrado que la incorporación de aditivos nanoestructurados dentro de morteros de cal modifica los requerimientos de agua de mezcla, con un impacto final sobre las propiedades mecánicas [Nochaiya et al., 2015; Quercia et al., 2012]. Este documento se centra en el efecto de la incorporación de tres aditivos fotocatalíticos diferentes como nanopartículas en morteros de cal: TiO_2 solo y dos dopados de TiO_2 con metales de transición, Fe-TiO_2 y V-TiO_2 . Se supervisarán los cambios ejercidos por estos materiales nanoestructurados sobre las propiedades en fresco y endurecido de los morteros, incluyendo un examen detallado de la microestructura por mediciones de distribución del tamaño de poro y microscopía electrónica de barrido (SEM), a fin de evaluar las posibilidades de su aplicación real.

Sección Experimental

Materiales

La cal empleada, cuya composición mineralógica se detalle en la Tabla 1, es de la clase CL 90-S conforme al estándar europeo [Alvarez et al., 2013] y fue suministrada por CALINSA. El árido usado fue una arena calcítica de clase AF-T-0/1-C suministrado por Caleras de Liskar (Grupo CTG). Los materiales fotocatalíticos empleados fueron: TiO_2 (Aeroxide P25, Evonik), Fe-TiO_2 y V-TiO_2 (sintetizados por pirolisis de pulverización de llama [Duran et al., 2014], y suministrados por Centro Tecnológico L'Urederra, España). De acuerdo con las especificaciones del suministrador, El Fe-TiO_2 se obtuvo a partir de una disolución precursora de iones Fe^{3+} , mientras que el V-TiO_2 fue obtenido a partir de una mezcla $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$.

Tabla 1. Composiciones química y mineralógica de la cal aérea.

Fases Mineralógicas		Composición química					
Mayoritarias	Minoritarias	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	SO_3 (%)	Na_2O $+\text{K}_2\text{O}$ (%)
Ca(OH)_2 (CH)	CaCO_3 (C)	0,4	68,5	0,5	1,03	1,4	0,14

Métodos

Caracterización de los aditivos fotocatalíticos

El área superficial específica de cada uno de los aditivos fotocatalíticos fue medida para muestras de 0,2 g por el método BET (equipo ASAP 2020 de Micromeritics) estudiando la

adsorción de N₂ a 77K y los valores encontrados se presentan en la Tabla 2. Las composiciones química y mineralógica fueron estudiadas por difracción y fluorescencia de rayos X. Las únicas fases cristalinas presentes en todas las muestras fueron anatasa y rutilo (Tabla 2). El tamaño de partícula fue calculado con la ecuación de Scherrer a partir de los difractogramas de rayos X [Lee et al., 2010]. La microestructura de los materiales nanoestructurados fue estudiada mediante un microscopio de transmisión electrónica con filtro de energía (EFTEM, Libra 120 Zeiss GmbH). Las imágenes fueron procesadas con el software iTEM 5.1 (Olympus Soft Imaging Solutions GmbH).

La composición química de la superficie de los polvos fue investigada por espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS). El equipo utilizado fue un ESCALAB 200-X con Sistema de datos ECLIPSE (VG Scientific) y excitación MgK-alfa. La caracterización mostró que el aditivo con vanadio se trata de una heteroestructura entre TiO₂ y VO_x (con centros vanadilo), mientras que en el caso de dopado con hierro, se encontró que hay una sustitución de iones Ti⁴⁺ en la red TiO₂ por iones Fe³⁺. Se ha prestado una especial atención a la hidrofiliidad de los nano-aditivos mediante la deconvolución de la región de O.

La distribución del tamaño de partícula de las suspensiones al 1% de los aditivos se determinó en un Malvern Nanozeta Sizer.

Tabla 2. Características de los aditivos fotocatalíticos.

Compuesto Fotocatalítico	Anatasa (%)	Rutilo (%)	Densidad (g cm ⁻³)	Área superficial específica (m ² g ⁻¹)	Tamaño de partícula (nm)
TiO ₂ *	78,8	21,2	4,3	50	21
Fe- TiO ₂	69,1	30,9	3,9	101	16
V- TiO ₂	77,5	22,5	3,4	113	15

* El valor de densidad fue proporcionado por el fabricante.

Preparación de los morteros de cal aérea

Las muestras se prepararon con una relación 1:3 en peso cal:árido (con una relación cal:agua ajustada para cada mezcla con objeto de garantizar una adecuada trabajabilidad). Se adicionaron y estudiaron tres porcentajes diferentes de cada fotocatalizador (TiO₂, Fe-TiO₂ y V-TiO₂): 0,5, 1 y 2,5% con respecto al peso de la cal.

Las materias primas, cal, árido y aditivos, se mezclaron durante 10 minutos a baja velocidad en una mezcladora de sólidos. Posteriormente se agregó agua y se realizó la mezcla durante 90 s a baja velocidad. A continuación se realizaron los ensayos de las propiedades del estado fresco. Por último, los morteros se insertaron en moldes cilíndricos de 36x40 mm, desmoldándose después de 7 días. Los morteros se curaron a 20 °C y 60% de humedad relativa.

Las muestras en estado endurecido también se caracterizaron después de los diferentes períodos de curado, como se describe a continuación. Considerando el porcentaje relativamente

bajo de los aditivos adicionados, el color final de los morteros de cal preparados no sufrió ningún cambio después de la incorporación de dichos aditivos.

Caracterización de los morteros aditivados con diferentes fotocatalizadores

En el estado fresco, la consistencia se evaluó mediante el ensayo de la mesa de sacudidas siguiendo la norma UNE-EN 1015-3 [EN, 2000]. El estudio de los cambios en el proceso de hidratación, se realizó mediante calorimetría isotérmica (equipo TAM Air). Para ello, se mezclaron aproximadamente 3 g de cal y el aditivo fotocatalítico en el porcentaje requerido. Posteriormente, se incorporó agua en una relación agua/cal adecuada y se procedió a su homogeneización. Los datos de calorimetría isotérmica se recogieron durante 24 horas, llevándose el experimento a 25°C. Asimismo, se empleó la aguja Vicat, de acuerdo con un procedimiento estandarizado UNE-EN 1015-9 [Navarro-Blasco et al., 2013] para estudiar el tiempo de fraguado (periodo de trabajabilidad).

En las muestras endurecidas, la resistencia a la compresión se determinó a diferentes tiempos de curado: 28, 91, 182 y 365 días, mediante una velocidad de rotura de 50 N s⁻¹. La distribución de tamaño de poro se obtuvo por porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) (Micromeritics-AutoPoreIV-9500, presión de 0,0015 a 207 MPa). Como caracterización complementaria se realizaron los ensayos de XRD (Bruker D8 CuK_{α1}, desde 2° hasta 80° 2θ; incremento de 0,02° por paso s⁻¹) y análisis termogravimétrico TG-DTA (TG-sDTA Mettler Toledo 851e; los crisoles utilizados fueron de alúmina, y el calentamiento se realizó desde 25° hasta 1100°C, bajo atmósfera estática de aire con una purga de N₂ a un flujo de 20 mL min⁻¹). La microscopía electrónica de barrido combinada con el microanálisis de rayos X de energía dispersiva (SEM-EDS, FEI Instrument, Quanta 3D FEG, con INCA IE 350 Penta FET X-3 EDS, Oxford Instruments) se empleó para el examen microestructural y el mapeo elemental de los morteros de cal aérea modificados con los aditivos nanoestructurados. Por último, la capacidad de absorción de agua de los morteros se analizó sumergiendo las muestras en agua destilada. El peso obtenido se evaluó en los tiempos: 0 (antes de inmersión), 1 y 2 horas. La capacidad de absorción de agua se calculó por la diferencia de peso expresada en porcentaje.

Resultados y discusión

Influencia sobre la demanda de agua

La incorporación de fotocatalizadores en los morteros de cal aérea tuvo una repercusión directa sobre la demanda de agua necesaria para asegurar una trabajabilidad similar en las pastas frescas. Las mezclas de cal viva dopadas con titania y aditivos de hierro presentaron, en general, un ligero aumento en la demanda de agua de la mezcla, como puede observarse a partir de los resultados recogidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Demanda de agua de los morteros de cal aérea (%).

Sample	Control		TiO ₂		Fe-TiO ₂			V-TiO ₂		
	0 %	0,5 %	1,0 %	2,5 %	0,5 %	1,0 %	2,5 %	0,5 %	1,0 %	2,5 %
Air lime	20,0	21,0	21,5	22,0	21,0	21,0	21,5	22,0	22,0	24,0

Este hecho puede atribuirse al aumento en la adsorción de agua como consecuencia del pequeño tamaño de partícula de estos aditivos nanoestructurados (ver las observaciones TEM de los aditivos en la Fig. 1). La baja dosis empleada ocasionó pequeñas modificaciones debido también al efecto de relleno (*filler effect*): las nanopartículas pueden distribuirse entre los amplios espacios originados en las pastas, reduciendo el agua de relleno, con un subsecuente papel lubricante que podría contrarrestar – parcialmente – la falta de disponibilidad del agua adsorbida [EN, 2011].

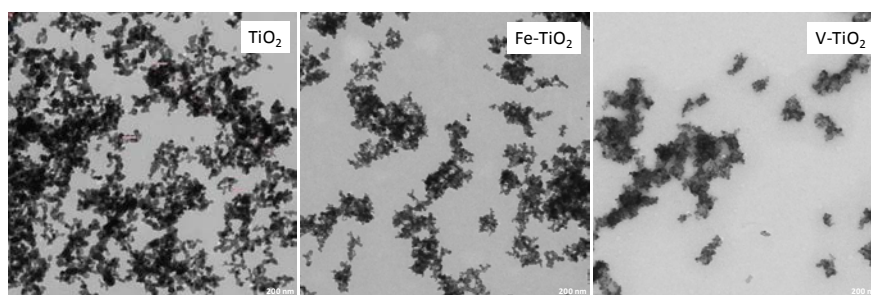


Figura 1. Imágenes de microscopía TEM de los aditivos nanoestructurados (x 16000).

La presencia del aditivo V-TiO₂ ocasionó un aumento en el requerimiento de agua de amasado y, como consecuencia, una mayor demanda de agua. Este hecho, para el aditivo V-TiO₂, puede atribuirse -considerando su mayor área superficial específica-, debido a su menor tamaño de partícula (Tabla 2). La interacción entre estas finas partículas condujo a la formación de fuertes fuerzas de Van der Waals, reduciendo así la fluidez de la pasta fresca [EN, 2011].

Las evaluaciones de la distribución del tamaño de partícula de los aditivos nanoestructurados llevada a cabo en un medio sintético de solución de poro que simula el medio del conglomerante (pH 12,5 y 1% de CaCl₂), confirmaron la hipótesis inicial (Fig. 2), evidenciando la tendencia del V-TiO₂ a formar grandes aglomerados. El aditivo V-TiO₂ presenta la mayor población de aglomerados por encima de los 1000 nm de diámetro, con un diámetro de población principal en torno a 715 nm (mientras que se evaluó un diámetro de población principal de 615 nm tanto para Fe-TiO₂ como para la titania aislada, TiO₂).

Estos resultados experimentales confirman que la incorporación de los aditivos fotocatalíticos nanométricamente estructurados bajo estudio incrementaron la demanda de agua de los morteros, en línea con lo reportado en anteriores trabajos [Quercia et al., 2012].

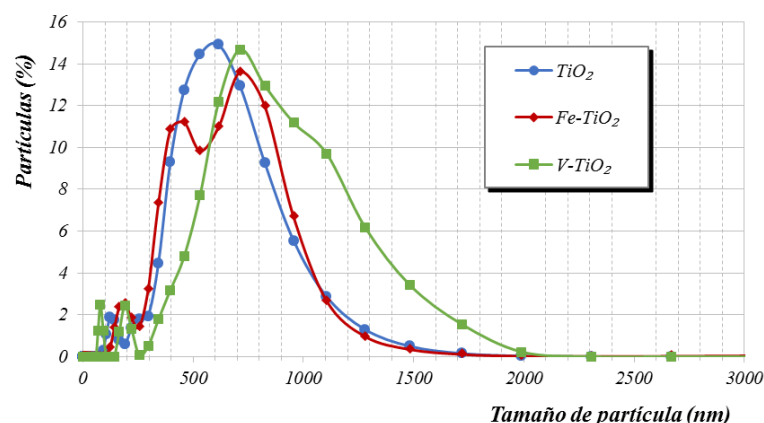


Figura 2. Distribución de tamaño de partícula de los aditivos fotocatalíticos nanoestructurados en solución alcalina.

Efecto en la velocidad de hidratación y en el tiempo de fraguado

La evaluación del tiempo de hidratación es necesaria para demostrar la viabilidad de la incorporación en masa de los aditivos fotocatalíticos en estas matrices de cal aérea: si los aditivos indujesen un cambio significativo en el tiempo de fraguado, su empleo sería desaconsejable.

El estudio de calorimetría isotérmica permitió evaluar el efecto de la incorporación de los aditivos sobre la velocidad de hidratación de las pastas de cal (Fig. 3a). Se observó una primera y fuerte liberación de calor después de la mezcla inicial de cal y agua. Algunos autores han atribuido este evento a la fuerte reacción de hidratación, muy exotérmica, de un bajo porcentaje de cal viva no hidratada que queda en la cal apagada en polvo utilizada [Inturi et al., 2014]. Otros investigadores han identificado esta evolución del calor con la humectación de la cal [Etacheri et al., 2010]. La contribución de ambos factores parece ser la razón más acertada que, en el trabajo actual, supuso una liberación de calor en el primer pico estimada en alrededor de 12 J g^{-1} , similar a otros valores proporcionados por la bibliografía [Etacheri et al., 2010]. La liberación de calor total requirió alrededor de 6-6,5 h (Fig. 3b). Después de la finalización de este proceso, las curvas alcanzaron una tendencia asintótica, con variaciones de flujo de calor relativamente pequeñas. Sin embargo, un examen detallado reveló algunos pequeños picos entre 12 y 14 h, generalmente identificados por una ralentización en la tasa de pérdida de calor, que puede atribuirse a las primeras etapas de carbonatación de la portlandita, en relación con el tiempo requerido para alcanzar un máximo en el proceso de carbonatación en muestras de portlandita incluidas en un sistema multicapa de agua. La carbonatación es una reacción exotérmica de disolución-precipitación en presencia de agua líquida, que proporciona $182,1 \text{ kJ mol}^{-1}$ [Pérez-Nicolás et al., 2015]. No se observaron diferencias significativas en las curvas cuando se ensayaron los diferentes fotocatalizadores: todas las muestras con aditivos fotocatalíticos mostraron alteraciones, evidenciando un retraso máximo de aprox. 1 h con respecto a la muestra control de cal.

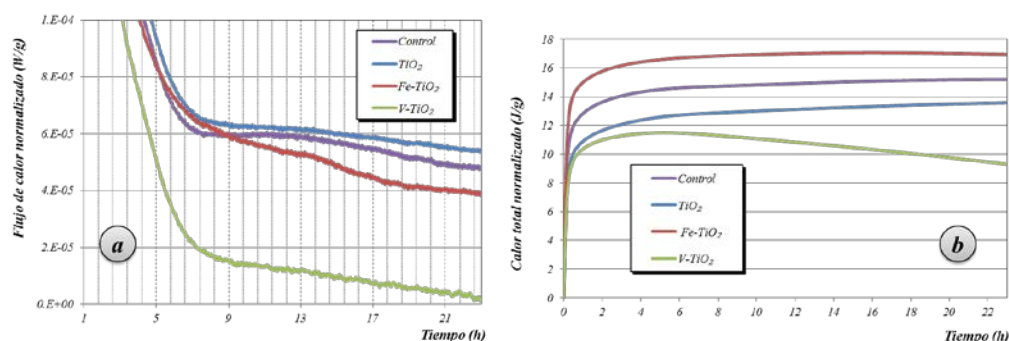


Figura 3. Curvas de calorimetría isotérmica: a) Curvas de flujo de calor normalizado y b) Curvas de liberación de calor total de las diferentes muestras de morteros de cal aérea con aditivos en comparación con el mortero control (libre de aditivo).

La evaluación del grado de endurecimiento mediante la aguja Vicat confirma estos resultados calorimétricos, mostrando un retraso de 67, 47 y 46 min, para muestras de cal con solo TiO₂, Fe-TiO₂ y V-TiO₂, respectivamente. El retraso en el endurecimiento de las muestras puede atribuirse a la presencia del aditivo que dificulta la correcta difusión de CO₂ en el seno de toda la pasta, como también lo confirman los resultados de TG. Los porcentajes de pérdida de peso relacionado con la descomposición de CaCO₃ fueron 4,69%, 6,45% y 6,49% para las muestras de cal adicionadas con TiO₂, Fe-TiO₂ y V-TiO₂, respectivamente, mientras que se determinó un 8,03% para el mortero de cal control. Además, debe tenerse en cuenta que, en el trabajo actual, las muestras se prepararon con una diferente cantidad de agua de mezcla con objeto de conseguir una fluidez similar. El resultado del tiempo de fraguado medido por la aguja de Vicat quedará notablemente influenciado por este hecho: una mayor cantidad de agua de mezcla puede tener un efecto adverso, retrasando el endurecimiento de la muestra.

Resistencia a compresión, estructura de poro y observaciones SEM

Con el objeto de garantizar la aplicación práctica de estas matrices de cal, se estudió la resistencia a la compresión y se correlacionó con la evaluación de la microestructura de dichos morteros por medio del análisis de la microestructura de poro y el aspecto textural mediante observaciones SEM. Las variaciones en los resultados de la resistencia a la compresión se pueden atribuir a la influencia de varios factores, tales como: (i) el cambio en la distribución del tamaño de poro motivado por la presencia de un material nanoestructurado, que podría dar como resultado un efecto de relleno o una pobre compactación, consecuencias beneficiosa o perjudicial, respectivamente; (ii) la interferencia en la hidratación de las fases cementicias derivada de la hidrofiliidad de los aditivos fotocatalíticos que podría sustraer agua dificultando las etapas de completa hidratación; (iii) las diferencias en la cantidad de agua de mezcla empleada para los morteros con cada uno de los aditivos. Entre los aditivos evaluados (Fig. 4), las muestras con Fe-TiO₂ proporcionaron los mejores resultados de resistencia a la compresión dependiendo del porcentaje adicionado. Las muestras con V-TiO₂ y Fe-TiO₂ mostraron un patrón dependiente de la dosis: cuanto mayor es la cantidad de aditivo, mayores es su resistencia a la compresión. Este hecho es consistente con el efecto de carga esperado, anteriormente mencionado, debido al pequeño tamaño de partícula de dichos aditivos, como se discute más

adelante. Por el contrario, los morteros con exclusivamente TiO_2 dieron lugar a un patrón inverso, es decir, presentan las más bajas resistencias para las muestras con las mayores proporciones de TiO_2 . Este efecto adverso puede atribuirse a la deficiente compactación causada por el mayor tamaño de partícula proporcionado por este aditivo.

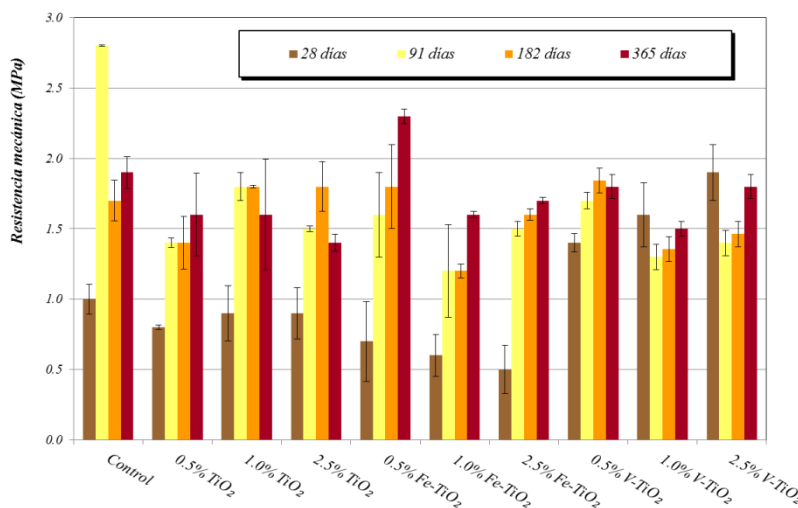


Figura 4. Resistencia mecánica a compresión de los morteros de cal aérea con fotocatalizadores nanoestructurados a diferentes días de curado.

El análisis microestructural de estos morteros se llevó a cabo por SEM-EDS. El análisis de EDS (mapeo elemental) mostró una distribución regular de Fe-TiO_2 , mientras que V-TiO_2 confirmó su tendencia a la aglomeración (Fig. 5).

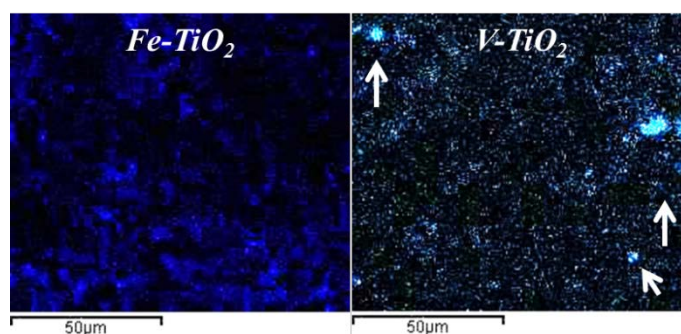


Figura 5. Distribución de Ti (SEM-EDS) en los morteros de cal adicionados con los aditivos fotocatalíticos nanoestructurados Fe-TiO_2 y V-TiO_2 . Las flechas indican áreas de acumulación.

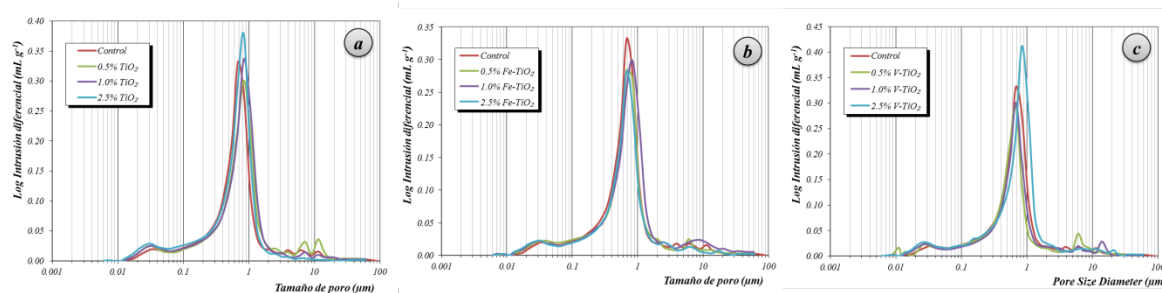


Figura 6. Distribución de tamaño de poro de los morteros de cal aérea aditivados con fotocatalizadores tras 28 días de curado.

El requerimiento de agua de mezcla en los morteros de cal ensayados fueron altos y las curvas de distribución de tamaño de poro mostraron un diámetro medio de poro alrededor de 0,7-0,8 μm (Figura 6). Este rango de poro se muestra como una población principal de la distribución, casi unimodal, acompañada de otras dos poblaciones mucho menos significativas alrededor de 10 y 0,03 μm . La incorporación de los fotocatalizadores no causó cambios dramáticos en la distribución del tamaño de poro. De acuerdo con este hecho, los resultados de resistencia a la compresión fueron similares para todos los morteros ensayados (Fig. 4). Como tendencia general, la presencia del aditivo dio lugar a un cierto aumento en los poros grandes de alrededor de 10 μm , lo que puede estar relacionado con la mayor cantidad de agua de mezcla y peor compactación del mortero de cal. Además, el efecto de relleno causado por los aditivos también fue responsable del aumento en los poros medios (alrededor de 0,02 μm). Estas ligeras modificaciones del tamaño de poro concuerdan con los resultados publicados por Karatasios et al. en morteros de cal con adición en masa de TiO_2 [Karatasios et al., 2010].

Las imágenes SEM de estos morteros modificados con Fe-TiO_2 o V-TiO_2 muestran la presencia de una superficie bastante heterogénea, con algunos poros grandes, confirmando las mediciones de MIP y explicando los resultados de resistencia mecánica de estos morteros (Fig. 7). Se observaron placas hexagonales atribuidas a las fases de CH remanentes, aún no carbonatadas, relacionadas con la cantidad de hidróxido de calcio determinado cuantitativamente por TG (valor medio de 3,5%). Estos cristales hexagonales se identifican con flechas (Fig. 7a y 7e) y con un círculo blanco (Fig. 7b). También se pudieron observar, como microestructura predominante, unas placas gruesas de cristales de calcita, que presentan una morfología escalenoédrica, de acuerdo con hallazgos previos [García Carmona et al., 2003]. Algunas de estos cristales aparecen resaltados en las figuras 7b, 7c, 7e y 7g (cuadrados rojos). Se conoce que esta forma cristalina se ve favorecida bajo condiciones de alta concentración de iones Ca^{2+} pero relativamente baja concentración (no estequiométrica) de aniones carbonato, es decir, en ausencia de una alta concentración de CO_2 , de acuerdo con las condiciones de curado y almacenamiento de estos morteros [García Carmona et al., 2003].

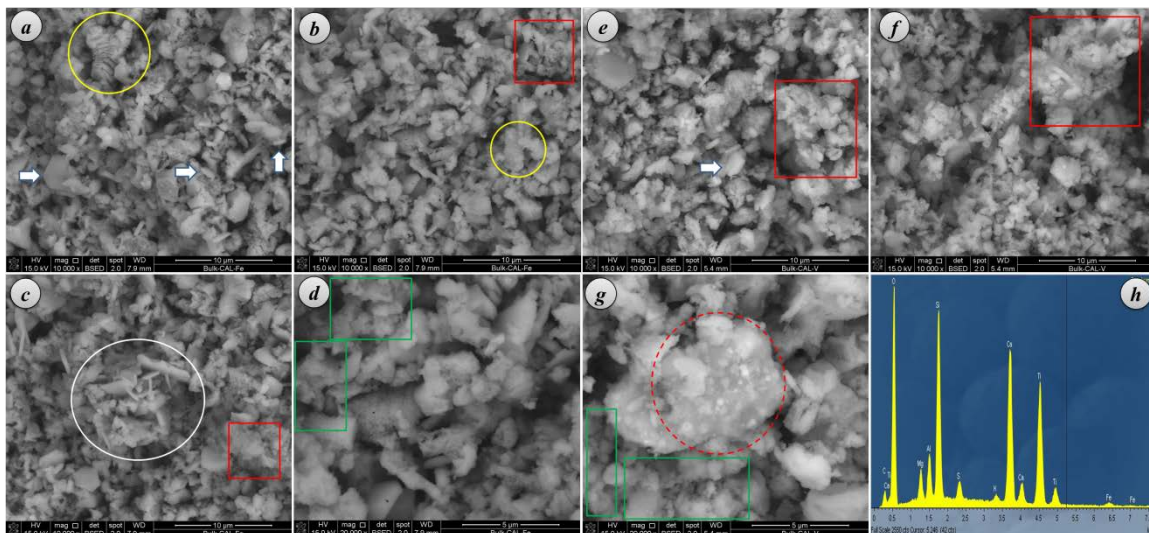


Figura 7. SEMs de morteros con Fe-TiO_2 (a-d) y con V-TiO_2 . (e-h). El análisis elemental EDS del círculo punteado rojo en la imagen (g) muestra la alta abundancia de Ti encontrada.

Algunas de estas aglomeraciones de cristales escalenoédricos de calcita, albergando también algunos cristales de porlandita, presentaban una superficie fragmentada y agrietada (ver círculos amarillos en la Fig. 7a y Fig. 7c). De acuerdo con los resultados ya publicados, algunos de estos cristales escalenoédricos se vieron parcialmente desintegrados en cristales de calcita romboédricos de tamaño nanométrico, como resultado de una carbonatación progresiva y de ciclos continuos de reprecipitación-disolución (ver las áreas delineadas - cuadrados verdes - en la Fig. 7d y Fig. 7g) [Cizer et al., 2012].

La sonda de EDS se utilizó para obtener un mapa elemental de las muestras estudiadas. Como en los diferentes morteros de cal discutidos anteriormente, V-TiO₂ presentó una fuerte tendencia a aglomerarse, dando lugar a áreas con alta concentración de depósitos de V-TiO₂ (áreas más brillantes en la parte central de la Fig. 7g -círculo rojo punteado-, cuyo análisis EDS correspondiente se muestra en la Fig. 7h, mostrando un alto contenido de Ti). El mapeo en la Fig. 8 confirmó esta observación.

Influencia de los fotocatalizadores en el fenómeno de absorción de agua

La evaluación mediante espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) evidenció que la cantidad de grupos hidroxilo y la adsorción de agua molecular [Sakai et al., 2012] en la superficie de los fotocatalizadores siguió la secuencia Fe-TiO₂ > V-TiO₂ > TiO₂, según el segundo pico de deconvolución de la región del oxígeno.

Los morteros de cal aérea mostraron unos valores muy altos de absorción de agua dado que presentan un gran tamaño medio de poro. La comparación con la muestra control mostró, para los morteros de cal aditivados, una esperada reducción de la absorción de agua, debido al ya mencionado efecto de relleno ejercido por los fotocatalizadores nanoestructurados (Fig. 8).

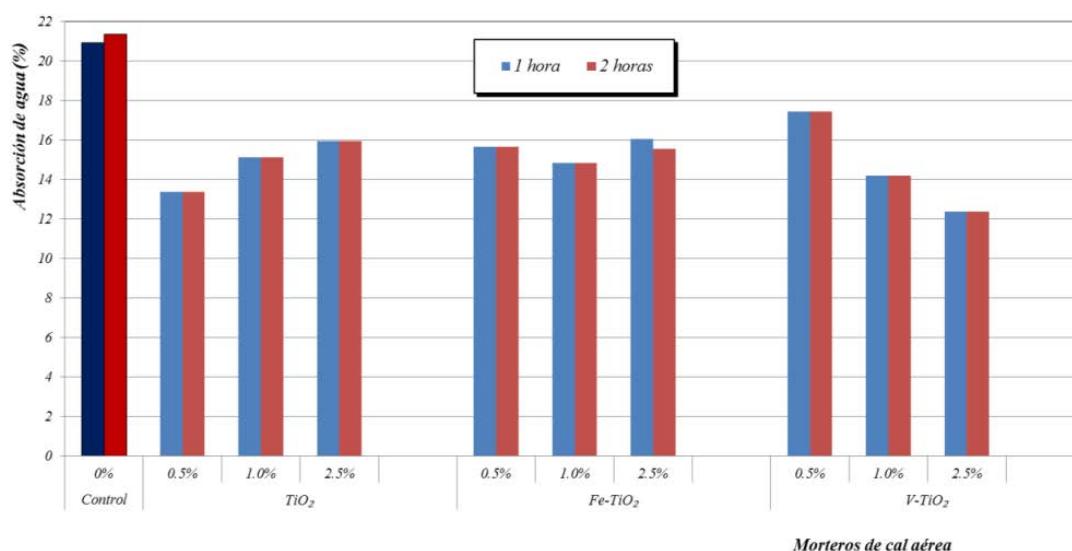


Figura 8. Valores de absorción de agua medidos tras 1 y 2 horas de inmersión de los morteros de cal aérea con aditivos fotocatalizadores en comparación con las muestra control (barras oscuras).

La principal conclusión que se puede extraer es que la presencia de los fotocatalizadores incorporados en masa lejos de aumentar la tasa de absorción de agua –esperable por el carácter hidrofílico de los aditivos- generó una reducción de esa tasa. Este hecho es sustancialmente beneficioso para la aplicación práctica de dichos sistemas en condiciones de refinamiento de su estructura porosa.

Conclusiones

La incorporación de los aditivos fotocatalíticos en los morteros de cal aérea, dificultó la difusión total de CO₂, retrasando el proceso de carbonatación y, posteriormente, el endurecimiento de las muestras. No existe evidencia de reacción puzolánica de ninguno de los aditivos.

Dado que los morteros de cal aérea proporcionan muestras con importante porosidad, la incorporación en masa de los aditivos nanoestructurados no ocasionó modificaciones drásticas de la porosidad, ni en su propiedad de resistencia a compresión. El examen microscópico SEM de la microestructura de estos morteros reveló un predominio de calcita escalenoédrica (a veces con superficies cuarteadas y agrietadas) y el análisis elemental EDS confirmó la aglomeración de V-TiO₂, similares a los resultados obtenidos en otros sistemas cementicios.

El porcentaje de absorción de agua de los morteros tratados con fotocatalizadores mostró que los aditivos nanoestructurados causaron una reducción positiva de la absorción de agua en los morteros de cal aérea, debido al efecto de relleno.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MINECO (MAT2015-70728-P) y la Fundación "la Caixa". El primer autor agradece a la Asociación de Amigos de la Universidad de Navarra la concesión de la beca predoctoral.

Bibliografía

Alvarez, J.I.; Fernández, J.M.; Navarro-Blasco, I.; Duran, A.; Sirera, R. (2013). *Microstructural consequences of nanosilica addition on aerial lime binding materials: influence of different drying conditions*. Mater. Charact., 80, 36-49.

Cizer, Ö.; Rodríguez-Navarro, C.; Ruiz-Agudo, E.; Elsen, J.; Van Gemert, D.; Van Balen, K. (2012). *Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime*. J. Mater. Sci., 47, 6151-6165.

Duran, A.; Navarro-Blasco, I.; Fernández, J.M.; Alvarez, J.I. (2014). *Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica*, Constr. Build. Mater., 58, 147-158.

EN 1015-3. (2000). *Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*. European Committee for Standardization.

EN 459-1. (2011). *Building lime. Part 1: definition, specification and conformity criteria*. European Committee for Standardization.

Etacheri, V.; Seery, M. K.; Hinder, S. J.; Pillai, S. C. (2010). *Highly Visible Light Active TiO₂-x Nx, Heterojunction Photocatalyst.*, Chem. Mater., 22, 3843-3853.

García Carmona, J.; Gómez Morales, J.; Rodríguez Clemente, R. (2003). *Rhombohedral-scalenohedral calcite transition produced by adjusting the solution electrical conductivity in the system Ca(OH)₂-CO₂-H₂O*. J. Colloid Interf. Sc., 261, 434-440.

Inturi, S. N. R.; Boningari, T.; Suidan, M.; Smirniotis. P. G. (2014). *Visible-light-induced photodegradation of gas phase acetonitrile using aerosol-made transition metal (V, Cr, Fe, Co, Mn, Mo, Ni, Cu, Y, Ce, and Zr) doped TiO₂*. Appl. Catal. B, 144, 333-342.

Janus, M.; Zatorska, J.; Czyżewski, A.; Bubacz, K.; Kusiak-Nejman, E.; Morawski, A. W. (2015). *Self-cleaning properties of cement plates loaded with N,C-modified TiO₂ photocatalysts*. Appl. Surf. Sci., 330, 200-206.

Karatasios, I.; Katsiotis, M. S.; Likodimos, V.; Kontos, A. I.; Papavassiliou, G.; Falaras, P.; Kilikoglou, V. (2010). *Photo-induced carbonation of lime-TiO₂ mortars*. Appl. Catal. B, 95, 78-86.

Lee, B. Y.; Kurtis, K. E. (2010). *Influence of TiO₂ Nanoparticles on Early C3S Hydration*. J. Am. Ceram. Soc., 93, 3399-3405.

Navarro-Blasco, I.; Duran, A.; Sirera, R.; Fernández, J.M.; Alvarez, J.I. (2013). *Solidification/stabilization of toxic metals in calcium aluminate cement matrices*. J. Hazard. Mater., 260, 89-103.

Nochaiya, T.; Sekine, Y.; Choopun, S.; Chaipanich, A. (2015). *Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive*. J. Alloy Compd., 630, 1-10.

Pelaez, M.; Nolan, N. T.; Pillai, S. C.; Seery, M. K.; Falaras, P.; Kontos, A. G.; Dunlop, P. S. M.; Hamilton, J. W. J.; Byrne, J. A.; O'Shea, K.; Entezari, M. H.; Dionysiou, D. D. (2012). *A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications*. Appl. Catal. B, 125, 331-349.

Pérez-Nicolás, M.; Balbuena, J.; Cruz-Yusta, M.; Sánchez, L.; Navarro-Blasco, I.; Fernández, J.M.; Alvarez, J.I. (2015). *Photocatalytic NO_x abatement by calcium aluminate cements modified with TiO₂: Improved NO₂ conversion*. Cem. Concr. Res., 70, 67-76.

Quercia, G.; Brouwers H.J.H. (2012). *Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste*. Cem. Concr. Res., 42, 344-357.

Sakai, N.; Wang, R.; Fujishima, A.; Watanabe, T.; Hashimoto, K. (1998). *Effect of Ultrasonic Treatment on Highly Hydrophilic TiO₂ Surfaces*. Langmuir, 14, 5918-5920.

Sugrañez, R.; Álvarez, J. I.; Cruz-Yusta, M.; Mármol, I.; Morales, J.; Vila, J.; Sánchez, L. (2013) *Enhanced photocatalytic degradation of NO_x gases by regulating the microstructure of mortar cement modified with titanium dioxide*. Build. Environ., 69, 55-63.

Wang, F.; Sun, G.; Zhang, W.; Yang, L.; Liu, P. (2016) *Performance of photocatalytic cementitious material: Influence of substrate surface microstructure*. Constr. Build. Mater., 110, 175-181.



VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

Hornos de cal

Tres hornos de cal en la isla de Gran Canaria. Tipologías y funcionamiento

Jorge Manzano Cabrera⁽¹⁾, José Antonio Serrano Ortiz de Luna⁽²⁾, Isolina Díaz-Ramos⁽³⁾

(1) *Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España*
jmanca17@gmail.com, jorgemanzano@ulpgc.es

(2) *Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España*
jaserrano52@gmail.com

(3) *Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España*
isodiram@gmail.com

Resumen

Una parte significativa del patrimonio industrial de la isla de Gran Canaria está constituida por hornos de cal, los cuales han jugado un papel importante durante los últimos siglos, influyendo notablemente en la economía y paisaje insular.

Un conjunto de tres hornos troncocónicos localizados en El Goro, municipio de Telde, al este de la isla de Gran Canaria, serán objeto de este estudio. Las dimensiones y sistemas constructivos de este acervo muestran la evolución de los hornos de cal en este territorio entre los siglos XIX y XX.

El objetivo de esta investigación es poner en valor este conjunto patrimonial, situado en una zona de piedra caliza y presentando un estado de conservación bastante precario.

El método de trabajo consiste en la documentación gráfica y fotográfica del conjunto, la descripción detallada de sus tipologías, los materiales de construcción que los componen y el funcionamiento de cada uno de ellos.

Como resultado, se distinguirán tres tipos constructivos de hornos efectuados en diferentes momentos históricos. El mayor de ellos, de 13,85 metros de altura y excavado en la tierra contiene, además, los elementos necesarios para la producción y venta de la cal.

Este conjunto, que hoy en día pasa totalmente desapercibido, requiere de una documentación de urgencia a fin de ponerlo en valor y paliar su degradación. Este artículo pretende servir de base a futuras intervenciones y adecuación al paisaje, al tratarse dichos bienes de un hito de referencia del patrimonio arquitectónico, etnográfico e industrial de la isla de Gran Canaria.

Palabras clave: Patrimonio industrial; Caliche; Tragante; Funcionamiento continuo e intermitente; Parrilla; Hornilla

Introducción

La producción de cal en las Islas Canarias se desarrolló de manera abundante en las islas orientales de Fuerteventura, Lanzarote y Gran Canaria a finales del siglo XIX.

No hay constancia de la producción de esta materia por los pueblos originarios de las islas, si bien el caliche que aflora en terrenos áridos está presente en el revestimiento de las construcciones primeras (Ramón, 2002: 275).

Con la llegada de los castellanos, el empleo de la cal hace su aparición oficial en el territorio insular debido a la necesidad de blanquear el azúcar, la potabilización del agua, el albeo de las viviendas y como desinfectante. Su uso se halla documentado en la ejecución de obras privadas y domésticas, en las que la cal se apareja con arena o arcillas. De igual modo, está presente en la ejecución de presas e impermeabilización de aljibes y acequias (Mireles, 1996: 43).

Los hornos se sitúan próximos a las canteras de extracción de la materia prima, así como en las zonas de ejecución de las obras, próximos a salinas y a ingenios azucareros. En este último caso, se trataba de una pieza fundamental dado que la lechada de cal se empleaba en la eliminación de gran parte de las sustancias solidificadas, microorganismos y fibras que flotaban en el líquido azucarado (ídem).

Posteriormente, la expansión agrícola de los monocultivos de la platanera y el tomate, junto al crecimiento urbano y comercial de las principales ciudades del archipiélago, produce el despunte en la extracción y producción de la cal a finales del siglo XIX. En este momento, convive íntimamente con el cemento, de uso minoritario, en la elaboración de la mayor empresa industrial de la isla: el puerto-refugio de Las Palmas, donde adquiere importancia en la elaboración de los bloques del espigón portuario (Manzano & Mireles, 2017).

A comienzos del siglo XIX, se conoce la exportación de cales de las islas Canarias a los territorios españoles de Guinea (Imprenta Católica, 1948). Sin embargo, la entrada del cemento en los mercados a mediados del siglo XX produce el desuso de los hornos de cal, coincidiendo esta etapa con la construcción de la primera cementera de la isla, situada al sur de la misma (Manzano & Mireles, 2017).

Los hornos de estudio en esta investigación se corresponden con el período comprendido entre finales del siglo XIX y principios del XX.

El objetivo de esta investigación es poner en valor este patrimonio vernáculo e industrial mediante el estudio de tres hornos próximos entre ellos, ejemplos de la evolución tipológica de los hornos de cal en la isla de Gran Canaria.

Metodología

El método de trabajo consta de dos fases:

Fase 1

Trabajo documental efectuado en archivos de la isla.

Trabajo de campo en el que se documentan los hornos y su estado de conservación in situ mediante fotografías, dibujos y bocetos. Se mantiene la nomenclatura para cada horno empleada por Manzano (2016), denominándose los hornos de este conjunto TEL 06, TEL 07 y TEL 02. TEL se refiere al municipio donde se hallan los hornos: Telde, y el número es la numeración dada por el autor a los hornos catalogados de Telde, un total de dieciséis.

Otras herramientas. Los hornos son localizados con la ayuda del servicio de imágenes vía satélite Grafcan.

Fase 2

Organización de la información: estudio pormenorizado de cada uno de los tres hornos objeto de estudio.

Los hornos grancanarios. Tipologías

A diferencia del tipo de horno de Morón de la Frontera, mitad semienterrado y mitad aéreo forrado en arcilla (Ciencia y Cemento, 2011), los hornos de este artículo se hallan acostados contra talud, similares al horno de Morata de Tajuña en la comunidad de Madrid (Barbero, Cárdenas y Maldonado, 2011), y a los hornos cónicos truncados invertidos diseñados por Millington (Millington, 1848).

Siguiendo la tipología propuesta por Manzano Cabrera en su estudio de los hornos de cal de la isla de Gran Canaria, los hornos localizados en territorio insular son de producción intermitente o discontinua y de producción continua (Manzano, 2016: 164).

Los hornos de producción discontinua se localizan en lugares remotos y muchas veces de difícil acceso. Construidos de manera rudimentaria siguiendo el conocimiento de técnicas tradicionales, se conocen bajo el nombre de *caleras*, y son muy abundantes en las islas orientales.

De uso colectivo, su capacidad productiva era inferior a 30 toneladas por hornada, siendo el combustible empleado de pequeñas dimensiones y muy seco a fin de producir un calor intenso de llamas copiosas (Adam, 1996).

Los hornos de producción continua o industriales, con una cuba de calcinación, producen la cal de manera constante y masiva. Muy frecuentes hasta bien entrado el siglo XX, abarcan una mayor producción que los hornos domésticos o intermitentes, generando entre 60 a 100 toneladas por jornada.

Estos últimos poseen unos componentes propios como son el tragante, cuba de calcinación o vientre, cámara de combustión -formada por parrilla y tobera de ventilación-, áreas de abrigo y pantalla. Cada uno de ellos se detallarán en el siguiente apartado.

Elementos anejos al horno son: aljibes, almacén de combustible, marea de apagado, muelle de carga y, en algunos casos, trituradora de piedra.

Componentes del horno de cal

Los hornos se suelen situar en provecho del escalón topográfico, encontrando parte de dos niveles de rasante: la rasante superior y la rasante inferior, sobre la que se abre la puerta más próxima a la hornilla.

Los hornos grancanarios se dividen en dos cuerpos principales: uno inferior, también denominado cámara de combustión, correspondiente al lugar donde se produce la llama, y un segundo elemento que es la propia cuba de calcinación (Figura 1).

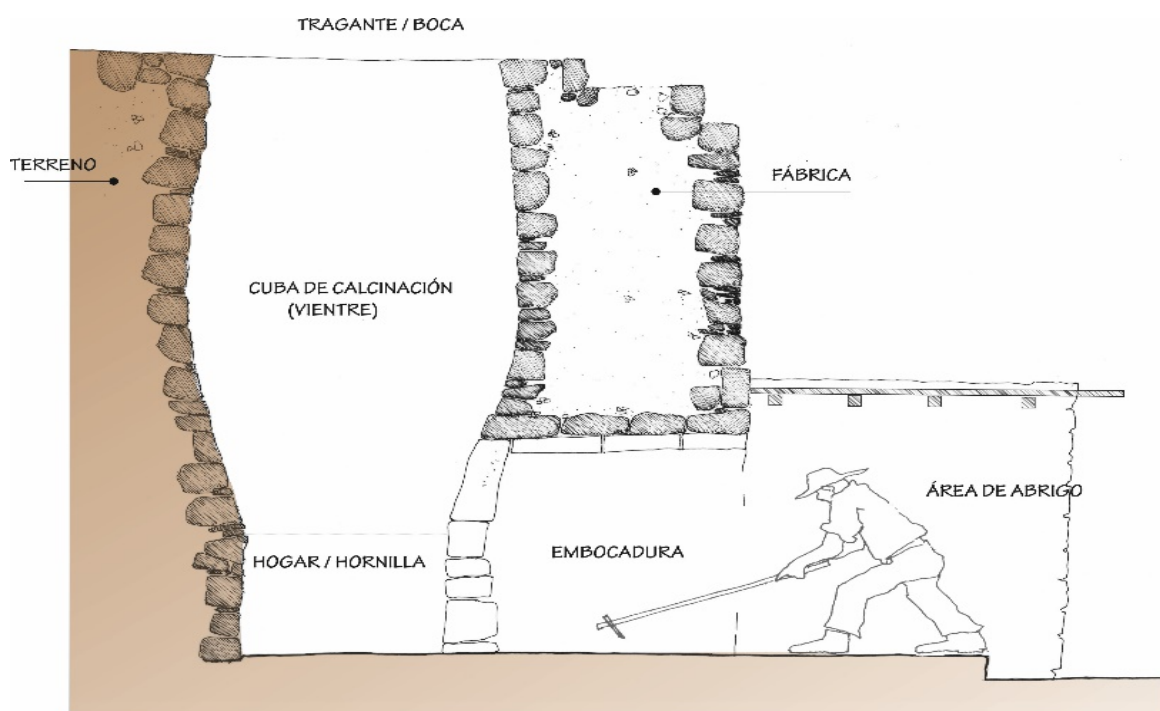


Figura 1. Elementos que componen un horno (Fuente: Manzano, J.)

Cámara de combustión

Se subdivide en *el hogar* y la *embocadura*.

El hogar. Se encuentra ubicado en la parte inferior donde se dispone el combustible cuyas dimensiones aproximadas suelen ser de un metro de alto y uno de diámetro, a diferencia de otros hornos mixtos, simples semienterrados y de estructura superior troncocónica localizados en Fuerteventura y que existieron en La Aldea Blanca, municipio de San Bartolomé de Tirajana, Gran Canaria.

Existen dos formas de iniciar la combustión: falsa bóveda de piedra (un solo uso) y parrilla (metálica reutilizable).

Falsa bóveda. Resalte de aproximadamente cinco centímetros conocidos como *releje*, sobre el que comienza la falsa bóveda, realizada con la misma piedra que se va a calcinar.

Parrilla. Sistema de viguetas metálicas sensiblemente paralelas, empotradas o sobrepuestas en un recocado en el fondo, y apoyadas sobre un puente transversal de perfiles metálicos por debajo del dintel de la entrada. Pueden ser zarandeados mediante largas barras metálicas para mover y dejar caer la piedra calcinada. Sobre esta estructura se apoyan las primeras piedras de caliche que conformarán la falsa bóveda.

Embocadura. Elemento colindante con el hogar que desempeña dos funciones: carga y mantenimiento del combustible del hogar por un lado, y retirada y limpieza del material calcinado, por el otro.

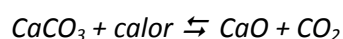
El área de maniobra o embocadura del horno con acceso a la hornilla debe estar orientada en el sentido de los vientos dominantes de las islas (norte-noreste).

La embocadura se realiza en piedra basáltica mediante la colocación de piedras labradas en jambas y dinteles cuando la sección del muro no supera el metro y medio. El dintel suele tener una clave o dos piedras a modo de dovelas.

Si la sección del muro supera el metro y medio, se ejecuta la puerta de acceso de forma trapezoidal, trabajada mediante sillares, o reforzada mediante vigas de madera en unos casos. En otros casos, se efectúan con perfiles metálicos tipo "T" de 50 y 70 mm. En los hornos más actuales se ejecutan con vigas de hormigón.

Cuba de calcinación

La cuba es el corazón del horno y donde se produce todo el proceso consistente en la transformación de las piedras calizas transformándolas en óxido de calcio y desprendiendo dióxido de carbono y el agua que contiene, modificando los óxidos para transformarlos en cal viva. Este proceso recibe el nombre de calcinación, cocción o quemado.



El volumen interior del cuerpo alto del horno es lo que se entiende como el vientre, cuya proporción altura-diámetro es la que garantiza la buena cocción de las piedras (Espinosa, 1991; Valdés, 1870).

La sección en planta de la cámara es circular en los hornos insulares. La sección vertical es troncocónica, construida con piedra y mortero de barro, de mampostería rudimentaria.

Boca o tragante

El proceso de obtención de cal viva es generado mediante la calcinación de la piedra caliza y el desprendimiento del dióxido de carbono, por lo que el horno tiene que estar abierto a fin de que el aire lo arrastre.

En función de las condiciones pluviométricas de la zona, los hornos pueden tomar en su parte superior la forma de un cono truncado con una inclinación aproximada de 45° y con toberas en los laterales que permiten la ventilación y a la vez se evita que la lluvia penetre en el horno si el clima es lluvioso, siendo en las zonas secas horizontal (Adam, 1996).

La boca o tragante por donde se carga la materia prima se encuentra en la parte superior de la cuba. Sus dimensiones, rondan generalmente entre los dos a cuatro metros de diámetro y el borde de la boca se consolida mediante sillares regulares de piedra que se adaptan con juntas triangulares a la forma circular. En otros casos, se han observado piedras irregulares adaptadas a la forma de la boca, que suelen ser del mismo material interior que el resto.

La relación de la dimensión de la boca con la altura del horno, en la mayoría de los hornos grancanarios, es de una a dos veces el diámetro de la boca.

En cuanto al acceso a la boca, en los hornos insulares se produce mediante rampas realizadas en el terreno, dado que los hornos se encuentran en desnivel. Estas rampas se rematan lateralmente mediante mampostería ordinaria de piedra irregular. Se observan hornos en los que se combinan la ejecución de rampas y escaleras en la misma fábrica de la construcción.

En casos en los que no se produce el desnivel del terreno, no se aprecia el acceso al tragante, por lo que se presupone que la carga se realiza mediante sistemas mecánicos de elevación.

Funcionamiento

Los hornos de funcionamiento intermitente o discontinuos localizados en la isla presentan un relaje sobre el que se apoyan los trozos mayores de piedra caliza que conforman la falsa bóveda y ésta a su vez la hornilla, en la que se colocaba la madera de pino canario, para la combustión.

La total deforestación de los bosques grancanarios, hace que se sustituya el agotado combustible vegetal por antracita y, conjuntamente con el carbón mineral, se utilizan otros productos como las cáscaras de almendras y otros arbustos como la *aulaga*, arbusto leñoso abundante en las islas (Hernández, 1984).

Los trozos mayores de piedra caliza sostenían al resto del material compuesto por piedra de menor tamaño que, alternándose con carbón hasta el llenado completo de la boca del horno, era coronado con una torta de barro (Lobo, 2004: 279).

El horno industrial de funcionamiento continuo posee, como diferencia principal con respecto al anterior, una parrilla. Sobre ella se colocan las piedras calizas de grandes dimensiones, llegándose a cerrar el entramado metálico.

La piedra de cal extraída de la cantera se debía cernir previamente a fin de eliminar la tierra presente en ella, dado que ésta se endurece y baja la temperatura del horno. Una vez limpia, se colocaba en el horno, sobre ella la leña y, a continuación, dos cestas de carbón mineral previamente humedecido, con fin de ampliar su tiempo calorífero y producir un calor uniforme. Finalmente se depositaban cuatro cestas de piedra de cal, descargando camadas de ambos materiales por la boca del horno (Suárez, 1992: 13).

Sobre el suelo del hogar se depositaba la leña, generalmente aulagas y posteriormente se prendían con gasoil. El fuego ascendía por la parrilla y prendía el combustible posterior de leña que se propagaba hacia el carbón. Comenzaba de esta manera el encendido del horno.

Una vez prendido el horno, se continuaba cargando el carbón tipo antracita: cinco baldes y cuarenta o cincuenta de piedra, o entre cinco y siete partes de piedras por una de carbón (ídem).

La coloración rubia del humo que desprendía el horno indicaba su encendido.

Pasadas unas 48 horas, una vez y se observaba el fuego entre las piedras, se añadía diez baldes de carbón y 65 de piedra caliza.

En algunos casos se aprovechaba el mismo carbón que utilizaban los barcos de vapor que transportaban la piedra de cal entre islas (ídem).

Tras seis días de funcionamiento, el horno alcanzaba temperaturas superiores a los 900°C. En este momento, se zarandeaban los perfiles que conformaban la parrilla desde su parte inferior, extrayendo las primeras piedras calcinadas.

Los hornos de El Goro

Si bien el Goro es una zona de afloramiento de caliches, la cal obtenida era de uso estrictamente coligante debido a las impurezas arcillosas que contenía, a diferencia de otros yacimientos colindantes, como los promontorios costeros de Gando y Arinaga, donde desde muy antiguo se instalaron pequeñas industrias artesanales para la extracción y quema de la cal.

La elección de estudio del conjunto de tres hornos localizados en la localidad teldense de El Goro, viene dada debido al fácil acceso a los mismos. Próximo a ellos se encuentra un interesante conjunto de ocho hornos de cal, pero se localizan en la base aérea de Gando, cuya entrada es restringida.

Se desconocen datos oficiales acerca del volumen productivo de estos hornos, por estar destinada su producción al consumo interno de la isla. Sin embargo, este conjunto resulta llamativo ya que pertenecen a la primera generación de hornos de la isla, quedando definidos además los diferentes modelos de hornos descritos en capítulos anteriores: uno doméstico o de producción discontinua; otro de funcionamiento o producción continua con una sola cuba; y el tercero formado por la agrupación de varias cubas ejecutado con materiales diferentes.

Se sitúan al este de la isla de Gran Canaria, en el punto kilométrico 15 desde la GC-1, tomando la carretera general del Goro (GC-140). Entre los puntos kilométricos 4 y 3 se localizan los tres hornos de cal objeto de estudio (Figura 2).

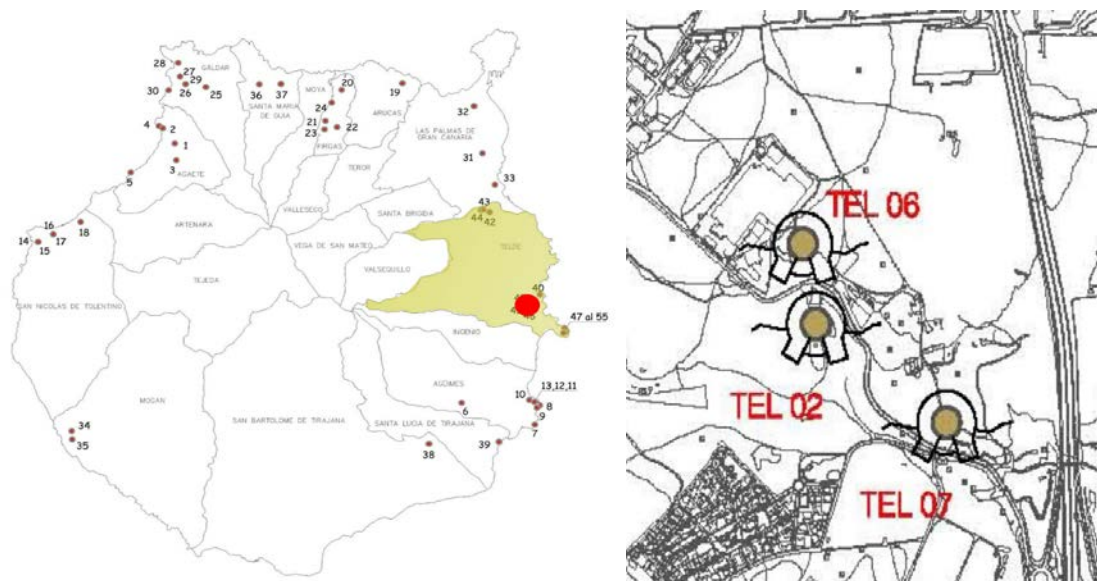


Figura 2: Localización de los hornos de estudio (Fuente: Manzano, J.)

Horno de cal 1 (TEL 06). Producción discontinua

Es el horno situado al norte y el más antiguo del conjunto (Figura 3).



Figura 3: Horno TEL 06 (Fuente: Manzano, J.)

Horno de funcionamiento discontinuo con cuba de calcinación de forma circular que carece de parrilla.

Posee una boca o tragante de forma circular, su borde se consolida mediante mampuestos irregulares de piedra volcánica que se adaptan a su forma. Revestimiento interior con piedras irregulares del mismo material que en la boca. La relación de la dimensión de la boca con la altura del horno es de una vez su diámetro. El acceso a la boca se produce mediante taludes realizados en el terreno. Estos se rematan lateralmente mediante mampostería ordinaria de piedra irregular, conformando la entrada a la parte baja del horno (embocadura).

La sección en planta del vientre o cuba es circular, de 2,10 metros en su parte inferior y la sección vertical troncocónica, construida con piedra y mortero de barro, de mampostería rudimentaria. Posee una inclinación aproximada de 15° y dimensiones de 2,33 m de altura.

Dentro de la cámara de combustión, el hogar se encuentra excavado a una profundidad de 95 cm del terreno natural, siendo la parte restante del horno de una altura de 1,50 metros, conformada por mampostería y ataluzada en su parte exterior, lo que facilita el acceso al tragante para su carga.

La falsa bóveda que conforma la cámara de combustión inicial se apoya en releje de aproximadamente 7 cm, formándose ésta con la misma piedra que se va a calcinar.

Estado de conservación

Malo. Actualmente abandonado y sin restricción de acceso, su boca o tragante está completamente derruida, manteniéndose aún en un estado de conservación regular la cámara de combustión y el vientre.

Horno de cal 2 (TEL 02). Producción continua

Horno situado a 165 m al sur del TEL 06. Industrial con una cámara de calcinación (Figura 4).



Figura 4: Sección del horno TEL 02 y vistas de la boca y acceso desde la cota inferior (Fuente: Manzano, J.)

Horno de planta interior redonda. El interior está excavado en la roca sobresaliendo una parte cuadrangular y escalonada, a modo de mastaba, construida con piedra y argamasa. Posee una entrada frontal por la parte inferior y otra lateral de ventilación. El conjunto contaba con otros elementos auxiliares próximos, como almacenes y aljibe.

En el interior mantiene una sección atonelada con una altura desde la parrilla de 9,50 m. La parte inferior posee paredes de mampostería ordinaria a base de piedra y cal y, a partir de los 3,30 metros está revestida con ladrillos refractarios. La parte superior o tragante posee un diámetro de 3,70 m y está rematada con sillares.

La hornilla de forma rectangular, 3,00 x 6,40 m de fondo, se encuentra debajo del horno y está dividida por una plataforma de hormigón de 16 cm situada a 2,15 m del suelo. La parte inferior está revestida por fábrica de ladrillos de mortero de cal y arena (silíceos calcáreos), de dimensiones 25x12x6 cm. Dicha plataforma se encuentra taladrada por un hueco rectangular de 2,48x2,03 m, coincidiendo con el eje del horno (Figura 5).



Figura 5: Vistas interiores de la cuba y hogar del TEL 02 (Fuente: Manzano, J.)

Se aprecia una diferencia de materiales entre la parte inferior y la superior, que se encuentra revestida con ladrillo refractario. Se destaca la ejecución a base de hormigón, de la cámara inicial de combustión y recogida del material calcinado. Por ello se deduce la modificación, reparación y ampliación del horno.

Estado de conservación

Su estado de conservación es bueno pese a su abandono y falta de restricción de acceso actual. Se observan faltas y deterioro de elementos metálicos (los perfiles metálicos de la parrilla han sido extraídos). Bajo la parrilla, la tobera de extracción de la piedra cocida ha desaparecido.

Horno de cal 3 (TEL 07). Producción continua múltiple

Horno situado al sureste, a 361 m de TEL02 y a 495 m de TEL 06. Industrial con dos cámaras de calcinación (Figura 6).



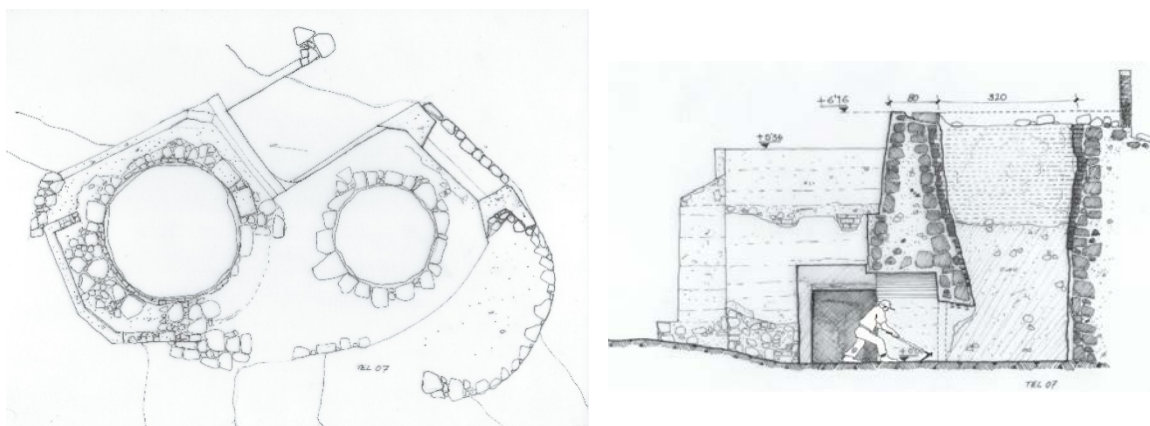


Figura 6: Horno TEL 07 (Fuente: Manzano, J.)

Se trata de un conjunto de formas prismáticas formado por muros cajón ejecutados con piedra y mortero de cal que encierra dos hornos de base circular de distinta antigüedad y características. El más antiguo tiene un diámetro de 2,50 m. El interior es de mampostería de piedra y la puerta de acceso, orientada al noreste, se encuentra retranqueada y conserva el dintel de madera original. El techo hasta la hornilla posee vigas de madera dejando ver al fondo el puente metálico, sobre el que se apoya la parrilla.

El otro horno, efectuado con posterioridad, posee un diámetro de 3,50 m, forrado de ladrillo refractario y se encuentra orientado al sureste. Posee una puerta y galería abovedada de hormigón (Figura 7).



Figura 7: Acceso, embocadura y parrilla. Horno TEL 07 (Fuente: Manzano, J.)

La existencia de dos vientres de calcinación es motivada por la demanda de mayor cantidad de producto calcinado, a la par que supone un funcionamiento simultáneo de ambas cubas.

Estado de conservación

Su estado de conservación es malo. Al igual que los anteriores, se encuentra abandonado y sin restricción de acceso. Se observan elementos metálicos deteriorados y los perfiles metálicos de la parrilla permanecen, como se muestra en la figura anterior, en la que se aprecia además la embocadura y el entibamiento-techo de madera original.

Las bocas de ambos hornos están derruidas, aunque se deduce que el horno nuevo contaba con unos 6,16 m de altura y el más antiguo con 5,36 m.

Conclusiones

Se ha descrito en este artículo un conjunto de enorme valor patrimonial que refleja, en un espacio próximo, las tipologías de hornos de producción intermitente o discontinua y continua existentes en la isla de Gran Canaria, testigos de la producción local e industrial de cal en territorio insular.

Los hornos, además de jugar un papel importante en la producción de la materia prima para los morteros de cal, han influido en el territorio y en el entorno insular. Se trata de elementos que no pasan desapercibidos en el paisaje, por lo que la puesta en valor de este conjunto, sirve de precedente a futuras intervenciones de restauración y adecuación al entorno del patrimonio vernáculo e industrial.

El conjunto de hornos del Goro, al igual que otros próximos en esta vertiente de la isla, se encuentra próximo a zonas de costa en los que el suelo de caliche es predominante.

Destacable en este conjunto es el horno nº 2 (TEL 02), de cuba única, realizado con posterioridad al TEL 07. Esta afirmación se debe a que dicho horno posee edificaciones supletorias anejas a él como son aljibe de agua, almacén de cal, muelle de carga, tobera metálica de extracción, pantalla de protección o redireccionamiento del viento para facilitar la combustión. Estos elementos no han podido ser descritos en el presente artículo por problemas de espacio, pero suponen igualmente una parte importante en la comprensión del funcionamiento del conjunto.

De igual modo, la diferencia de materiales en la construcción del horno TEL 02 con respecto a los otros, explica la modificación y posterior ampliación de este horno para prolongar su uso.

Bibliografía

- Adam, J.P. (1996). *La construcción romana: materiales y técnicas*. León, editorial de los oficios.
- Barbero, M.; Cárdenas, J.; Maldonado, L. (2011). "Los hornos de cal periódicos en la comunidad de Madrid: estudio tipológico y nuevas construcciones". En *Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Espinosa, P. C. (1991). *Manual de construcciones de albañilería*. Madrid, Consejo General de Arquitectura de España.
- Hernández, G. (1984). *Estadística de las Islas Canarias de Francisco Escolar Serrano (1793-1806)*. Las Palmas de Gran Canaria: CIES nº11 vol. 1.
- Imprenta Católica Eds. (1948). *Anuario comercial, industrial y profesional de Canarias*. Santa Cruz de Tenerife: Imprenta Católica.
- Ciencia y Cemento: La cal de Morón (2011). <http://wp.cienciaycemento.com/la-cal-de-moron/> Último acceso: 17.05.2018.

Lobo, M. (2004). “Los comienzos de la industria de cal en Gran Canaria”. En *Homenaje a Francisco Navarro Artilés*. Las Palmas de Gran Canaria: Academia Canaria de la Lengua.

Manzano, J. (2015). *Los hornos de cal en Gran Canaria. Historia, evolución y tipología*. Las Palmas de Gran Canaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Tesis Doctoral inédita.

Manzano, J.; Mireles, F. (2017). “Incidencias de la cal en el paisaje tradicional de gran Canaria”. En *El Pajar, Cuaderno de Etnografía Canaria* nº 32.

Millington, J. (1848). *Elementos de Arquitectura*. Madrid: Imprenta Nacional.

Mireles, F. (1996). “En torno a la cal”. En *Guía Histórico Cultural de Telde*. Telde: Ayuntamiento de Telde.

Ramón, A. (2002). *Carta etnográfica de Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Tesis Doctoral inédita.

Suárez, R. (1992). “Los hornos de cal en Arinaga, vestigios de una antigua profesión”. En *Diario La Provincia*, 26 de enero de 1992. Las Palmas de Gran Canaria.

Valdés, N. (1870). *Manual del Ingeniero y Arquitecto*. Madrid: Imprenta de Gabriel Alhambra.



Universidad
de Navarra



FICAL
Fórum Ibérico de la Cal