

Materiales basados en cal aérea. Aprender del pasado para un futuro mejor

Pilar Giráldez, Màrius Vendrell Saz | Patrimoni 2.0 consultors, s.l.

URL de la contribución <www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5401>

RESUMEN

La cal es uno de los materiales tradicionalmente usados en construcción histórica desde hace milenios, desde siempre ha sido un producto de km 0, que reabsorbe el CO₂ usado en su fabricación (excepto el consumido en la combustión) y de una notable durabilidad a la vista de los innumerables monumentos construidos con ella y que una pervive. En el artículo se hace una revisión de la naturaleza y producción de la cal, de los procesos en puesta en obra y posterior endurecimiento y, sobre todo, de sus usos en situaciones constructivas variadas, algunas de ellas que requieren prestaciones importantes, como las obras hidráulicas o ciertos revestimientos. En este sentido se analiza con cierto detalle la posibilidad de mejora de las propiedades inherentes a la cal en base a la adición de sustancias que modifican su comportamiento y hacen que endurezca en inmersión, que sea impermeable, que endurezca más rápidamente y que, en definitiva, aumente su durabilidad. La valoración que se hace del futuro de este material pasa por la recuperación de las tradiciones ancestrales mejorando ocasionalmente sus prestaciones. En definitiva, aprender del pasado para un futuro más sostenible.

Palabras clave

Arquitectura | Arquitectura tradicional | Cal | Durabilidad | Hidráulico | Hormigón | Mortero | Técnica de construcción |



Piedra caliza (Morón de la Frontera, Sevilla) | foto
Fondo gráfico IAPH (Alessandra Olivi)

Materials based on aerial lime. Learn from the past for a better future

ABSTRACT

Lime has been a traditional building material for centuries, with a rich history of use in construction. It's a locally sourced product, often produced within close proximity to construction sites, which helps reduce its carbon footprint by reabsorbing the CO₂ emitted during its manufacture (excluding that consumed during combustion). Lime also boasts exceptional durability, exemplified by the countless historical monuments constructed with it that have endured for centuries. This article delves into the nature and production of lime, exploring the processes involved in its construction and subsequent hardening. It also highlights its versatile applications in various construction scenarios, some of which demand critical functionalities such as construction hydraulics and specific coatings. Moreover, we examine the potential for enhancing lime's inherent properties through the addition of substances that alter its behavior, resulting in improved performance, rapid hardening even in immersion, impermeability, and increased longevity. The outlook for this material involves a blend of embracing time-honored traditions while occasionally refining its capabilities. In essence, we learn from the past to pave the way for a more sustainable future.

Key words

Architecture | Traditional architecture | Lime | Durability | Hydraulic | Concrete | Mortar | Construction technique |

Cómo citar: Giráldez, P. y Vendrell Saz, M. (2023) Materiales basados en cal aérea. Aprender del pasado para un futuro mejor. *revista PH*, n.º 110, pp. 50-67. Disponible en línea: www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/5401 DOI 10.33349/2023.110.5401

Enviado: 29/05/2023 | **Aceptado:** 30/06/2023 | **Publicado:** 10/10/2023

INTRODUCCIÓN

La inclusión de un artículo sobre la cal (un material ancestral) en un número monográfico de esta revista, que versa sobre patrimonio, adquiere sentido considerando diversos aspectos de este material, entre los que no son ajenos su uso milenario y masivo a lo largo de la historia, así como que se trata de un producto sostenible, por utilizar un término *a la mode* de la jerga ecológica y económica actualmente en boga. Los autores de este artículo están plenamente convencidos de la sostenibilidad del uso de materiales basados en cal por dos razones fundamentales: a) por una parte se trata de un material con un balance de su huella de carbono cercano a cero: el anhídrido carbónico que libera a la atmósfera en el proceso de producción es íntegramente recuperado porque su carbonatación es imparable, de forma que la emisión de efecto invernadero se limita al combustible de su fabricación (que si es con leña ya es un CO₂ captado previamente a la atmósfera en el crecimiento de los árboles) y si se consume producción de “kilómetro cero”, el transporte se minimiza; y b) es uno de los productos masivamente usado en construcciones históricas, de modo que su compatibilidad con los materiales existentes es total, lo que reduce (si se hacen las cosas bien) la re-intervención en patrimonio, la restauración de la restauración, que en términos de conservación del patrimonio resulta cultural y económicamente insostenible.

En cuanto a las razones de su uso en patrimonio, además de las históricas o estéticas, el empleo de morteros de cal aérea en conservación elimina muchos de los problemas asociados al uso de cementos Portland o cales más o menos hidráulicas. Por una parte la cal aérea no lixivia sales solubles que pueden dar lugar a daños con los ciclos de disolución-cristalización y/o hidratación-deshidratación, y por otra, la cal es química, estructural y mecánicamente compatible con gran parte de la construcción y decoración antigua.

Museo de la Cal en Morón de la Frontera | foto
Fondo gráfico IAPH (Juan Carlos Cazalla Montijano)

En este artículo se presenta sumariamente el conocimiento de la cal y de los materiales basados en ésta, centrando la atención en su valor como material



histórico y potencialmente utilizable en las intervenciones sobre patrimonio histórico. De algún modo, este texto quiere ser una reivindicación de las bondades de la cal aérea, así como de sus posibilidades en construcción restauración y decoración: el hecho de que funcione perfectamente tanto como hormigón en masa (con volúmenes de metros cúbicos en algunos edificios), como en materiales pictóricos (con un espesor de pocas micras), hace de la cal un material versátil, sobre todo considerando que sus propiedades pueden ser modificadas a voluntad mediante el uso de áridos especiales y aditivos específicos.

LA CAL

Desde el punto de vista químico, la cal es hidróxido de calcio. En la naturaleza existe como mineral de la clase óxidos, que fue identificado en 1933 en Irlanda del Norte, al que se dio el nombre de portlandita porque este mismo compuesto forma parte del cemento Portland, que a su vez toma el nombre de la calizas de Portland, a las que vagamente se parece. Es un mineral raro en la corteza de la Tierra, de ahí la fecha relativamente reciente de su inclusión en la lista de minerales aceptados por la IMA (International Mineralogical Association), cuando a lo largo de la historia ya se habían fabricado millones de toneladas del mismo producto.

El hidróxido de calcio no es un compuesto muy estable: a 512 °C se disocia en óxido de calcio y agua, expuesto al aire tiende a combinarse espontáneamente con el anhídrido carbónico de la atmósfera para convertirse en carbonato de calcio, es ligeramente soluble en agua (160 mg/100 cm³ a 20 °C) y, tratándose de un hidróxido, da lugar a una solución de elevado pH. Estas propiedades hacen de la portlandita (en realidad de su forma sintética, la cal) un producto de enorme utilidad en muchos campos, que ha sido profusamente empleado por la humanidad en los últimos 100 siglos. Su alcalinidad en solución acuosa hace de la cal un desinfectante efectivo, propiedad que se mantiene durante cierto tiempo puesto que su transformación en carbonato es relativamente lenta a causa de la baja concentración de CO₂ en el aire (~350-500 ppm), de ahí las aplicaciones sistemáticas de encalado con voluntad sanitaria. Por otra parte, su carbonatación espontánea permite que una mezcla pastosa y moldeable de cal se convierta en un material cohesionado y compacto, lo que facilita su uso en construcción o para la estabilización de tierras, entre otras variadas aplicaciones.

En el ámbito del patrimonio histórico forma parte de una innumerable cantidad de edificios, en los que se encuentra tanto en elementos estructurales, como hormigón o morteros de junta, como acabado, formando parte de revestimientos de protección, y como parte de la decoración en forma de revocos, encintados, esgrafiados, encalados, pátinas, pinturas, etc. Históricamente

se ha utilizado la cal en las situaciones más variadas con solicitudes muy diversas: sumergidos en muelles y otras estructuras hidráulicas como depósitos o conducciones de agua (lo que implica su endurecimiento bajo el agua), como protección de la obra de fábrica, sean revestimientos o encintados (lo que exige a estas aplicaciones una elevada durabilidad), como capa de impermeabilización en coronamientos y pavimentos al aire libre. En todos estos casos que podríamos llamar “especiales”, la cal ha sido tradicionalmente aditivada para mejorar algunas de sus propiedades. Igualmente se encuentra cal en pinturas formando parte de una amplia diversidad de técnicas pictóricas: desde los frescos, realizados casi exclusivamente con cal, hasta cargas asociadas a pinturas con aglomerantes distintos, pasando por su uso como pigmento blanco de bajo coste.

UN POCO DE HISTORIA

Su uso en los últimos 100 siglos por parte de diversas culturas, algunas de las cuales no parecen haber tenido contacto entre ellas, sugiere que su descubrimiento o invención debe ser un tanto azaroso. No es descabellado imaginar que piedras calizas puestas en contacto con el fuego, por ejemplo en un hogar, sufrieran una alteración superficial a causa de la calcinación del carbonato de calcio que mayoritariamente las forma. Y que aquella superficie pulverulenta de piedras quizás abandonadas a la intemperie, volviera a endurecer al cabo de cierto tiempo. De ahí a la confección de un mortero hay un trecho, pero el primer paso estaría conceptualmente dado.

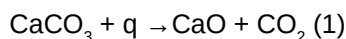
Durante mucho tiempo se ha considerado la ciudad de Çatal Höyük, en Anatolia, datada alrededor del 6700 a. de C., como el yacimiento con el uso más antiguo de la cal. Aunque más recientemente, en Jericó, se ha encontrado una máscara de cal datada hace 10.000 años. Y de acuerdo con Kingery et ál. 1988, parece que su uso se inicia incluso antes que la cerámica en el Pre-Neolítico (7200-6000 a. de C.). En el llamado *Creciente fértil* la cal era relativamente frecuente y estos mismos autores sugieren que su empleo puede ser rastreado en el Epi-Paleolítico en Kebaran (12000 a. de C.) y como material arquitectónico en Natufian (10300-8500 a. de C.), lo que sugiere su presencia casi desde los primeros asentamientos humanos. Desde este momento, se encuentra la cal en diversos usos en todas las culturas, incluyendo las americanas precolombinas, y posiblemente su historia y desarrollo podrían haber sido contemporáneos en localizaciones tan distantes como China (Ji-Sheng et ál. 1981) y América (Littman 1957; Kidder and Shepard 1944).

De hecho, la cal se ha venido utilizando en construcción compartiendo protagonismo con el yeso y la tierra (frecuentemente estabilizada con cal) hasta bien entrado el siglo XX. A lo largo de los últimos 150 años ha sido paulatinamente sustituida por el cemento portland —un invento de los años 30 del siglo

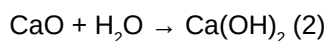
XIX– que arremetió con fuerza, en gran parte a remolque de la Revolución Industrial y las necesidades de construcción rápida y de grandes complejos fabriles a que esta dio lugar, en los que la cal no podía cubrir las necesidades ni -sobre todo- los plazos. Y de modo relativamente rápido, el cemento sustituyó a la cal, especialmente en los países más industrializados, hasta su práctica desaparición como material de construcción a mediados del siglo XX.

PRODUCCIÓN

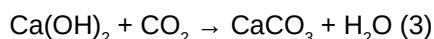
La fabricación de cal se basa en la calcinación de calizas. Estas están casi exclusivamente formadas por carbonato de calcio, que a elevada temperatura ($> 850^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la presión parcial de CO_2 en el horno) se disocia en óxido de calcio y anhídrido carbónico:



El resultado es óxido de calcio, CaO , cal viva, que para usarse debe hidratarse (apagarse, en el argot calero) a fin de convertirla en hidróxido de calcio (cal apagada):



Este producto se combina espontáneamente con el CO_2 atmosférico para dar lugar, de nuevo, a carbonato de calcio, frecuentemente, pero no únicamente, en forma de calcita:



Este conjunto de reacciones ha dado en llamarse “ciclo de la cal” porque se parte de carbonato de calcio para volver –al final del ciclo– al mismo compuesto. Es interesante resaltar que el CO_2 liberado al aire en la reacción (1) se reincorpora a la cal en la reacción (3), con lo que al balance final es cero y la huella de carbono consiste exclusivamente en la combustión para generar el calor suficiente para la calcinación (1) y el transporte del producto.

Tradicionalmente, la calcinación se ha realizado en hornos de leña, disponiendo los fragmentos de caliza (de entre 20 y 40 cm) hasta llenar completamente el horno cerrando una bóveda. La combustión de la leña produce llamas que circulan por los espacios intersticiales entre las piedras y estas se van convirtiendo en cal viva a lo largo del tiempo que dura la cocción. Aunque actualmente, en España, solo un horno de estas características sigue activo en Morón de la Frontera. Industrialmente, la calcinación se lleva a cabo en hornos alimentados con combustibles comerciales en los que se calcinan fragmentos de caliza más pequeños, entre 4 y 8 cm.



Horno de cal en Morón de la Frontera durante la cocción y en fase de enfriamiento | fotos Gordillos Cal de Morón

La cal viva tiene directamente algunas aplicaciones, pero para obtener cal apagada debe hidratarse, para lo cual, siguiendo el proceso tradicional, se vierten los terrones de cal viva obtenidos en el horno en piscinas de agua, donde se produce la reacción de hidratación, que es exotérmica y el agua llega puntualmente a hervir. En la producción industrial la cal viva pasa por una fase de molienda para, posteriormente, hidratarla en silos mediante una ducha con la cantidad estequiométrica de agua. Sin embargo, ya en los tratados antiguos (Vitruvius 1960, por citar un clásico) para obtener un buen mortero se recomienda que la cal sea mantenida durante años en inmersión en agua y, más recientemente, Ashurst (1990) sugiere un periodo mínimo de 2 meses antes de ser usada. Sea cual fuere el tiempo requerido, hay un amplio consenso en que sea lo más prolongado posible, puesto que esto da lugar a una mejor trabajabilidad de la cal, a una mayor retención de agua y a una más rápida carbonatación.

Considerando que la cinética de la reacción de hidratación es muy elevada y el óxido de calcio se convierte en hidróxido casi instantáneamente, ¿qué ocurre en inmersión que mejora las características de la cal? Cazalla et ál. (2000) y Rodríguez-Navarro, Hansen y Ginell (1998) han mostrado que a lo largo del tiempo de inmersión tiene lugar una disminución del tamaño de cristal de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que pasa de agregados de varias micras en la cal recién apagada hasta cristales del orden de 200 nm al cabo de unos meses, al mismo tiempo que sufren una evolución morfológica del hábito mayoritariamente prismático al tabular, con dominio de la forma {001}.



Tapando los caños | foto Fondo gráfico IAPH
(Alessandra Olivi)

El pequeño tamaño de los cristales de hidróxido de calcio da lugar a una elevada plasticidad, de modo que las moléculas de agua adsorbidas en la superficie de los cristallitos de cal actúa como lubricante, facilitando el deslizamiento de unos cristales respecto de los otros.

CARBONATACIÓN

Esta es la fase de mayor endurecimiento de la cal aérea y de su transformación en carbonato de calcio a partir del CO_2 atmosférico; de modo que una vez puesta en obra en forma de hormigón, mortero o pintura, va incorporando anhídrido carbónico hasta su total carbonatación, proceso que puede durar días, semanas, meses o incluso años en función de las condiciones ambientales y las características texturales del material. A priori hay que decir que se trata de un proceso lento, ya que la concentración de CO_2 en el aire oscila entre 350 y 500 ppm y, además, se introduce en el material a través de su sistema poroso mediante difusión del CO_2 a medida que este se va consumiendo e incorporando a la estructura cristalina del carbonato.

Hay un relativo consenso en que la presencia de humedad en el aire en contacto con el material de cal juega un papel importante en la cinética del proceso (Andrade, Sarria y Alonso 1999; Van Balen 2005). El principal mecanismo de reacción tiene lugar a partir de la adsorción de agua ambiental en forma líquida en la superficie de los cristales de hidróxido de calcio, parte del

cual se disuelve juntamente con el CO_2 atmosférico, precipitando carbonato de calcio en cualquiera de las fases posibles (calcita, aragonito o vaterita), aunque la más frecuente y estable en las condiciones habituales es la primera de las citadas. Esta reacción disminuye la concentración de CO_2 en los poros interiores, creándose un gradiente químico entre éstos y el exterior, que propicia la difusión de anhídrido carbónico para tender a igualar ambas concentraciones.

Siendo un proceso que ocurre en la superficie de cada uno de los cristallitos de cal, resulta evidente que, en la medida que éstos sean de reducido tamaño, la superficie específica del conjunto aumenta exponencialmente con la reducción del tamaño de cristal. De esta forma, la cal envejecida, en la que los cristales de hidróxido de calcio adquieren tamaños submicrométricos, carbonata mucho más rápidamente que otra que haya permanecido un tiempo más corto en inmersión.

USOS DE LA CAL

La cal, sea como hidróxido (apagada) o directamente como óxido (cal viva), tiene una amplia diversidad de usos, especialmente considerando que químicamente se trata de una base que, además, tiende a transformarse en un compuesto estable (carbonato). Son numerosos los ámbitos en los que la cal juega un papel más o menos importante. En la industria alimentaria se usa para la fabricación de productos como el queso, la cerveza, las galletas, entre otros; en el caso del queso, como coagulante en la leche para separar el suero; en la cerveza, para ajustar el pH del mosto y en las galletas, para ayudar a aumentar su volumen. En la fabricación de cosméticos se emplea para neutralizar la acidez de la piel, así como agente aclarante en productos para el cuidado del cabello. Es importante en el tratamiento de aguas, donde se ha utilizado para aumentar su alcalinidad, lo que colabora a reducir la corrosión de las tuberías y a proteger los equipos. En agricultura como fertilizante para mejorar la calidad del suelo, corregir la acidez del mismo y mejorar su estructura. Y siendo un producto que en contacto con agua mantiene un pH de 12-14, es importante en el control de plagas en agricultura y en jardinería, donde se suele aplicar como una mezcla en aerosol o sobre la corteza de los árboles.

Una parte significativa de la producción industrial se destina a la estabilización de terrenos, donde mezclada con la tierra, crea una mezcla uniforme que se compacta y endurece con el tiempo; este proceso ayuda a reducir la plasticidad y aumenta su capacidad resistente, lo que suele ser beneficioso para proyectos de construcción de carreteras, pavimentos, cimentaciones, entre otros; en este ámbito también mejora la estabilidad y la permeabilidad del suelo, reduciendo su erosión y facilitando la acumulación de agua en superficie.



Detalle fachada de la casilla del horno del Sin Tabaco (Morón de la Frontera) | foto Fondo gráfico IAPH (Daniel Salvador-Almeida González)

Focalizando su empleo en el ámbito del patrimonio histórico y más concretamente en construcción (incluyendo la decoración de los edificios), los materiales basados en cal se han utilizado tradicionalmente en forma de diversas mezclas: a) hormigón en masa en cimentaciones o muros estructurales, b) mortero de junta entre elementos estructurales para la formación de muros, arcos y bóvedas, c) pavimentos, y d) revestimientos continuos y discontinuos, lo cual incluye encintados, revocos (funcionales o decorativos) y pinturas (sea como base o como acabado). A estos usos habría que añadir su presencia en muchas construcciones de tapial mezclada con la tierra que lo forma, donde, como en la referida estabilización de terrenos, la cal confiere a la tapia una menor plasticidad en caso de mojarse, una mayor compacidad y, por tanto, una mayor capacidad portante y durabilidad.

En ciertos ambientes, en los últimos 20 años, ha surgido una línea de arquitectura de tendencia ecológica y en cierto modo historicista, que trata de recuperar la funcionalidad de los materiales tradicionales, reciclados y más sostenibles que los habitualmente utilizados, y entre estos adquieren una importancia significativa los morteros de cal, sobre todo como revestimientos. Igualmente, en el ámbito de la restauración se han hecho esfuerzos por recuperar el uso de la cal aérea por su buen comportamiento y mayor compatibilidad con los materiales existentes, frente a los basados en cemento u otros aglomerantes hidráulicos.

Veamos un breve resumen de los productos de cal utilizados en construcción. De estos, el más masivo es el hormigón, que coloquialmente se asocia

a un material moderno basado en cemento, pero en realidad en su definición sólo es importante la granulometría del árido. Un hormigón consiste en una mezcla de una fase aglomerante (entre otras, la que interesa aquí: cal aérea) con árido cuyos tamaños incluyen gravas (diámetro superior a 4-5 cm) y arena de granulometría variada desde 2-3 cm a submilimétricos. Dosificaciones cal:árido del orden de 1:3 o 1:4 son habituales según la función requerida, aunque en cimentaciones en las que el material está confinado por el terreno se han encontrado hasta 1:5 y 1:6. Por su parte, un mortero contiene una fase aglomerante y arena, igualmente de tamaños variados entre un diámetro máximo, que depende del uso del mortero, hasta medidas submilimétricas; en esta denominación relativamente amplia entrarían los estucos y cualquier otro acabado basado en una mezcla similar a la citada. Dosificaciones del orden de 1:3 son habituales en morteros de junta y revocos, mientras que en estucos y otras capas finas de acabado, puede llegar a ser hasta 1:1. A menor escala, una pintura basada en cal suele incorporar -además de pigmento o colorante- polvo de otro material, frecuentemente inerte, que actúa como carga. En todos los casos, el añadido de granos de un material no plástico tiene como finalidad corregir la plasticidad de la mezcla hasta la medida requerida, así como controlar (limitándola) la retracción, evitando las fisuras que se generarían durante el secado a causa de la evaporación del agua de amasado.

En algunas de las aplicaciones, sobre todo como hormigón en masa o mortero de junta, la rapidez de endurecimiento no es determinante, puesto que una vez evaporada el agua de amasado, el material queda prácticamente confinado, sea por los límites físicos de la cimentación, sea por el rozamiento entre la rugosidad superficial del material de junta con los elementos formadores del muro (sillares, sillarejos, mampuestos...). Por tanto, una vez seco, es prácticamente imposible su fluencia bajo la carga del peso propio de la construcción, lo que resta importancia a la velocidad de endurecimiento. Pero aun sin capacidad de fluencia, el hecho de que el endurecimiento final se obtenga por la carbonatación de la cal, que es un proceso lento, lo hace un material fácilmente erosionable mecánicamente. Es por esta razón que frecuentemente las juntas se han protegido tradicionalmente mediante la aplicación de un revoco o un encintado (tapajuntas).

Sin embargo, hay muchas otras aplicaciones, como revestimientos continuos o discontinuos, pavimentos, estucos, esgrafiados, molduras o los citados encintados, en las que se precisa un endurecimiento relativamente rápido porque de algún modo, la entrada en servicio es inmediata. En estos casos una carbonatación relativamente veloz resulta imprescindible porque, además, varios de los ejemplos citados son morteros expuestos a la intemperie y, por tanto, se les debe exigir un comportamiento más durable y resistente. Además de estas aplicaciones en las que la resistencia y durabilidad son exigibles, materiales basados en cal (hormigón o mortero) se han utili-

zados para construcciones hidráulicas (estén bajo el agua o sean elementos en contacto con agua); en estos casos la cal puede no estar en contacto con el aire y, por tanto, la carbonatación de la misma resulta difícil cuando no imposible. Para este tipo de aplicaciones es exigible su endurecimiento con agua y, por esta razón, es un proceso que implica la incorporación de agua en los compuestos desarrollados. En todos estos ejemplos resulta indispensable mejorar las prestaciones de la cal para que pueda endurecer bajo el agua, para que carbonate más rápido y, eventualmente, para que adquiera propiedades que de por sí sola no posee, como capacidad adherente, hidro-repelencia, etc.

MEJORANDO LAS PRESTACIONES

Lo cierto es que la tradición y el conocimiento empírico adquirido a lo largo de la historia han permitido “diseñar” un material basado en cal específico para cada aplicación que cumpla con las especificaciones que las circunstancias de cada caso impongan. En realidad existen numerosos tratados históricos que describen mezclas especiales con la cal, desde el uso de arena volcánica hasta la manipulación de los materiales, como recoge Oleson (2014) en el desarrollo del proyecto Romacons de estudio de las construcciones portuarias romanas. En este apartado se pretende aportar una breve síntesis de los procesos y mecanismos desarrollados en el curso de la historia, que actualmente también pueden ser empleados e incluso mejorados con productos comerciales y tecnológicos.

Para alcanzar estos objetivos y mejorar algunas de las prestaciones del material de cal existen dos posibles líneas de actuación: a) el uso de áridos activos, entendiendo por tales aquellos materiales en forma de arena (que eventualmente puede ser muy fina) que reaccionan con la cal para formar productos de endurecimiento; y b) el dopaje de la fase aglomerante (la cal) con componentes que, en concentraciones minoritarias, interaccionan en el proceso de endurecimiento y modifican la química y la cinética del mismo.

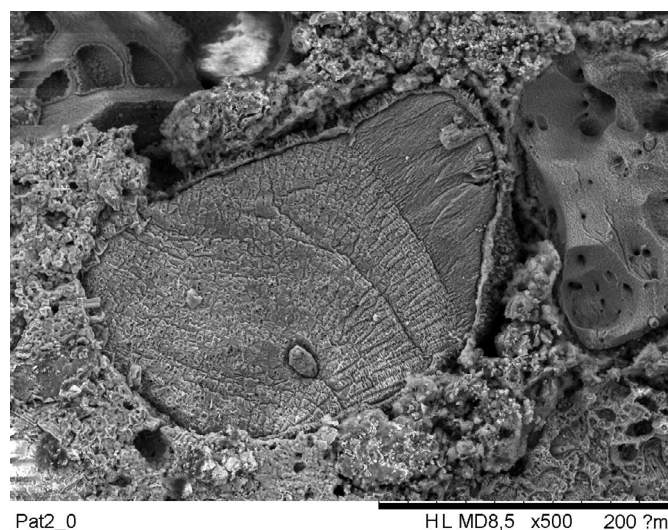
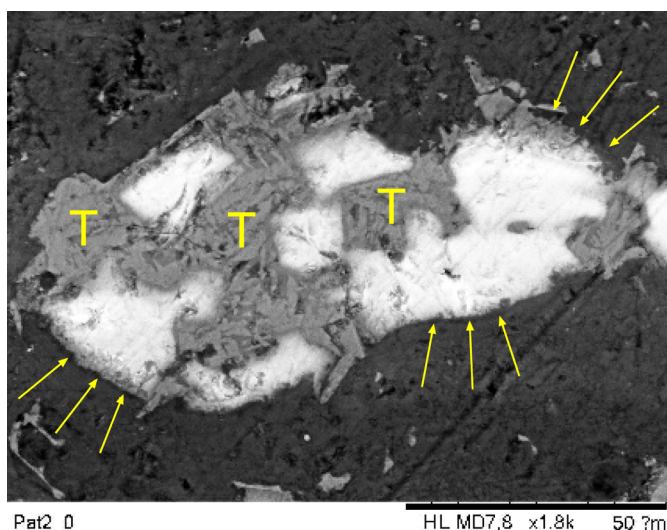
En cuanto a la adición de árido, además de cumplir las funciones propias de esta fase no plástica (limitación de la retracción en el secado y control de la plasticidad de la mezcla), debe contener algún componente que reaccione con la cal. Tradicionalmente (como mencionan los tratados antiguos, Vitrubio 1960, entre otros) las arenas del Vesubio, en la zona de Puzzoli, se han utilizado como árido que permite el endurecimiento de la cal bajo el agua. Existen numerosos artículos que mencionan el uso de este tipo de material en morteros históricos. Djerad et ál. (2022), Žižlavský y Vyšvařil (2022) y Arizzi y Cultrone (2012) citan específicamente el uso de puzzolana o lava molturada en morteros romanos y de otras cronologías. Jackson et ál. (2014) citan el uso particularmente de cenizas volcánicas en las construccio-

nes de puertos de época romana, que a su vez atribuyen su origen a exportación desde los puertos de Roma (Ostia) y Nápoles. Pero además de los materiales volcánicos existen numerosos ejemplos del uso de fragmentos de cerámica, desde 2-4 cm a arena fina, como árido activo para pavimentos continuos, obras hidráulicas, etc., que han sido masivamente empleados desde la época romana. En este sentido Lavat, Trezza y Poggi (2009), entre otros, han estudiado el comportamiento y los efectos de la inclusión de material cerámico en morteros. Otros autores citan materiales más específicos, como el ópalo en morteros históricos (Tunçoku y Caner-Saltik 2006) u otros materiales de uso exclusivamente moderno como metacaolín (Gur y Acun Ozgunler 2021; Loureiro et ál. 2020) o polvo de vidrio (Vyšvařil, Žiřlavský y Bayer 2021). En todos los ejemplos citados el principio activo es la sílice reactiva (no cristalina) contenida en los materiales volcánicos, la cerámica, el ópalo y, en cierta medida, el metacaolín, que reacciona con la cal para dar lugar a silicatos, a veces de estructura tan compleja como la tobermorita (Jackson et ál. 2014) que, en la medida que incorporan agua en la reacción, aportan hidraulicidad a la mezcla.

Habría que añadir la inclusión de elementos fibrosos, usados desde antiguo, que si bien no aportan reacción de hidraulicidad, el rozamiento con los componentes del mortero y su morfología alargada dan lugar a una resistencia a tracción que apenas tienen los morteros de cal (Kesikidou y Stefanidou 2019). Se ha citado también la adición de fragmentos de conchas de lamelibranquios; en este caso se estimula la carbonatación a partir de la conquiolina que envuelve los cristales de aragonito que forman la concha, a su vez precursora de ésta. Y para completar la lista habría que mencionar la inclusión de materiales con cambio de fase (PCM) encapsulados en plástico (Ventolà, Vendrell y Giraldez 2013) que modifican el comportamiento térmico

A la izquierda, crecimiento de tobermorita en una partícula de ceniza volcánica (T), donde, además, se aprecian las zonas de reacción, marcadas con flechas amarillas; relieves de mortero de la casa modernista de la caleta de Famara, Lanzarote | fuente Patrimoni 2.0

A la derecha, crecimiento de calcita alrededor de un fragmento de concha de lamelibranquio: mortero de mampostería, casa modernista en la caleta de Famara, Lanzarote | fuente Patrimoni 2.0

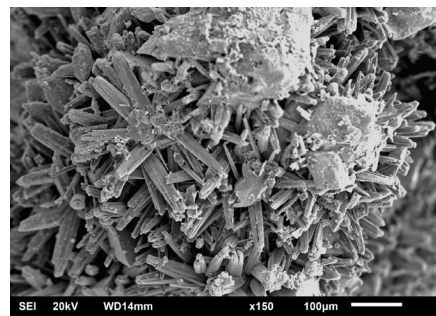


por la absorción y liberación de calor que implica el cambio de fase del material activo. En este caso no existe reacción entre el producto activo y la cal, aunque se modifican algunas características del mortero, en este ejemplo las propiedades térmicas.

Así como en los párrafos precedentes se han mencionado diversas adiciones que modifican algunas de las prestaciones de los materiales de cal a partir de la inclusión de áridos activos, existe también la posibilidad de introducir características especiales mediante la adición de productos, mayoritariamente orgánicos, que forman parte de la fase aglomerante. Los efectos de estas adiciones han sido motivo de diversas publicaciones: Ventolà et ál. (2011), Jayasingh, Selvaraj y Raneri (2022) o James y Sivasankarapillai (2023), entre otros; en todos los casos exploran la mejora o el impacto a que da lugar la inclusión de diversos materiales orgánicos mezclados con la cal. En general, se constata cierto incremento de las propiedades mecánicas, así como de la velocidad de endurecimiento. En este sentido, Nunes, Slížková y Krřvanková (2013) exploran la adición de aceite de linaza y el efecto que produce en morteros en cuanto a su resistencia a la sal marina. Y recientes estudios de los autores de este artículo (material inédito) han mostrado que la adición de aceites vegetales produce morteros hidrórepelentes a causa del desarrollo de un jabón en la reacción entre una grasa (aceite) y una base (la cal).

Similarmenete, existe una larga tradición que ha perdurado hasta nuestros días especialmente en el continente americano, del uso de polisacáridos como aditivos de la cal. Fundamentalmente se trata de extractos de plantas, muy a menudo cactáceas. Su efecto también ha sido ensayado en probetas de laboratorio; Alisi et ál. (2022), Arizzi y Banfill (2019), entre otros, exploran la modificación de las propiedades de este tipo de aditivos en morteros para restauración. Y Wei et ál. (2014) investigan el uso de caldo de arroz (por tanto, agua con almidón) en relación con las propiedades de los morteros tradicionales. Igualmente, Xu et ál. (2019) determinan la presencia de material proteico en una construcción antigua.

Sin embargo, la experiencia en análisis de morteros antiguos por parte de los autores de este texto muestra que, en casi todos los casos, la adición de un material orgánico no consiste en un único producto, sino que se han determinado mezclas, como por ejemplo en los morteros de revestimiento de la torre de Vallferosa (Torà, Lleida), en los que se constató una mezcla de material sacarídico no identificado y otro proteico (Vendrell, Giráldez y Lluveras 2020). En algunos casos (el ya citado Ventolà et ál. 2011 y material inédito de los mismos autores) se ha detectado el crecimiento de aragonito y, puntualmente, vaterita como productos de carbonatación, además de fases de reacción como ettringita; unos y otros, debido a su morfología acicular, colaboran a la formación de una trama de cristales que da lugar al endurecimiento de la cal.



Cristales desarrollados en el endurecimiento del hormigón en masa que forma el puerto helenístico de Empuries (Girona) | fuente Patrimoni 2.0

EL FUTURO DE LA CAL

En un sentido estricto, el futuro de la cal no está en peligro. Actualmente se fabrican miles de toneladas, en gran parte destinadas a la estabilización de terreno. Pero no es este el futuro de la cal que quiere cerrar este artículo, sino de algún modo especular sobre el uso de la cal aérea en aplicaciones específicas, singulares, profesionales... en construcción o en restauración, manteniendo hasta donde sea posible la tradición milenaria que ha llegado (no sin dificultad) a nuestros días. Los autores de este texto mantienen una posición militante (y en ocasiones, hasta beligerante) en defensa de su utilización en restauración y en construcción tradicional. Existen diversas razones para desear que el uso de la cal recupere todo o gran parte de su esplendor. Por una parte el hecho que, como material de construcción, es en sí mismo patrimonio histórico porque un elevado porcentaje de nuestro patrimonio es de cal; esto no implica, obviamente, que se vuelvan a hacer los puertos con cal, por poner un ejemplo un tanto extremo. Por otra parte, su completa compatibilidad con los materiales históricos, muchos de ellos de cal, así como su flexibilidad, transpirabilidad, durabilidad, sin olvidar que se trata de un producto sostenible desde muchos puntos de vista, hacen de la cal un material singularmente útil.

A lo largo de este texto se ha puesto de manifiesto que la cal puede asumir usos y aplicaciones muy variadas que, en general, cubren completamente el abanico de necesidades de la construcción tradicional (obra civil y decoración) y de las actividades de restauración patrimonial. Morteros de cal aérea pueden ser hidráulicos sin la formación a priori de fases silicatadas que pueden tener problemas de compatibilidad en algunas circunstancias, materiales basados en cal pueden adquirir propiedades hidrórepelentes o adhesivas (morteros cola), aumentar su velocidad de carbonatación e incluso, actuar sanitariamente como biocida no tóxico. Para ello, la experiencia empírica desarrollada a lo largo de los últimos 10.000 años ha empleado grasas, poli-

Cursos sobre la cal y sus usos en la rehabilitación del patrimonio histórico y edificios antiguos impartidos por el IAPH | fotos Departamento de Formación del IAPH



sacáridos de extractos vegetales, proteínas, etc., usando huevos, resinas, aceites y caldo de arroz entre una variada lista de posibilidades. De algún modo, el resumen general y genérico vendría a ser que con cal (aérea) se puede construir y hacer (casi) cualquier cosa.

Lo cierto es que muchos de los aditivos que se han mencionado, desde cerámica molturada o cenizas volcánicas hasta aceites, resinas vegetales o proteínas, están actualmente disponibles en el mercado y además, algunos de ellos son residuos industriales de poca o nula reutilización. Generan subproductos utilizables las industrias metalúrgica, cerámica, el procesado de alimentos, la agricultura etc., lo que abre un campo casi ilimitado de productos a disposición del mundo de la cal. A esto habría que añadir materiales tecnológicos que la industria fabrica para otros campos, como los ya citados PCM (materiales con cambio de fase), nanomateriales con propiedades fotocatalíticas, biocidas, ópticas, electrónicas... que podrían convertirse en aditivos de la cal para optimizar selectivamente las propiedades necesarias en cada caso. Existe (y en parte está desarrollada) la posibilidad de diseñar productos basados en cal a la medida de cada necesidad y de cada caso. En definitiva, se trata de aprender del pasado para un futuro mejor (de la cal, obviamente).

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade C., Sarria J. y Alonso, C. (1999) Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n.º 8, pp. 1249-1259
- Alisi, C., Bacchetta, L., Bojorquez, E., Falconieri, M., Gagliardi, S., Insaurre, M., Falcon Martinez, M.F., Meza Orozco, A., Persia, F., Procacci, S. y Tati, A. (2022) Sustainable additives from *Opuntia mucilage* in restoration mortars. *Acta Horticulturae*, 1343, pp. 435-442
- Arizzi, A. and Cultrone, G. (2012) Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 135-143
- Arizzi, A. and Banfill, P.F.G. (2019) Rheology of lime pastes with biopolymer-based additives. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 52, n.º 1, 8
- Ashurst, J. (1990) Mortars for Stone Buildings. En: Ashurst, J. and Dimes, F.G. (ed.) *Conservation of Building and Decorative Arts*, vol. 2. London, U.K.: Butterworths, pp. 78-96
- Cazalla, O., Rodríguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cultrone, G., De la Torre, M.J. (2000) Aging of lime putty: Effects on traditional lime mortar carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 83, n.º 5, pp. 1070-1076
- Djerad, M.S., Boufenara, K., Courtils, J.D., Cantin, N. y Lefrais, Y. (2022) Multianalytical characterisation and provenance investigation of natural pozzolana in Roman lime mortars from the archaeological site of Hippo Regius (Algeria). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, vol. 22, n.º 3, pp. 231-248
- Gur, D. y Acun Ozgunler, S.A. (2021) Comparative Study on the Influence of Mineral Additives to the Physicomechanical Properties of NHL Mortars Cured in Water (2021) *Gazi University Journal of Science*, vol. 34, n.º 3, pp. 611-628
- Jackson, M.D., Vola, G., Gotti, E. y Zanga, B. (2014) Sea-Water Concretes and their Material Characteristics. In: Brandon, C.J., Hohlfelder, R.L., Jackson, M.D. and Oleson, J.P. (ed.) *Building for Eternity: the History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*. Oxford: Oxbow Books, pp. 141-186
- James, C. y Sivasankarapillai, G. (2023) Assessment of Natural Additives Modified Lime Mortars for Repair of Historic Structures with Strength, Durability and Microstructural Parameters. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 67, n.º 1, pp. 282-297
- Jayasingh, S., Selvaraj, T. y Raneri, S. (2022) Evaluating the Impact of Organic Addition and Aggregate Gradation on Air Lime Mortar: New Compatible Green Material for Heritage Application. *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 16, n.º 5, pp. 681-691
- Ji-Sheng, M., Xiu-Ying, L., Rong-Kiu, C. and Bao-Shan, L. (1981) A Preliminary Investigation of Cementing Materials Used in Ancient China. *Journal of the Chinese Silicate Society*, vol. 9, n.º 2, pp. 234-240
- Kidder, A.V. y Shepard, A.O. (1944) Stucco Decoration of Early Guatemala Pottery. *Notes on American Archaeology and Ethnology*, vol. 35, pp. 120-123
- Kingery, W.D., Vandiver, P.B. y Prickett, M. (1988) The Beginnings of Pyrotechnology, Part II: Production and Use of Lime and Gypsum Plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, n.º 2, pp. 219-243
- Kesikidou, F. y Stefanidou, M. (2019) Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, vol. 25, 100786
- Lavat, A.E., Trezza, M.A. y Poggi, M. (2009) Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, vol. 29, n.º 5, pp. 1666-1674
- Littman, E.R. (1957) Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters, and Stuccos: Comalcalco, Part I. *American Antiquity*, vol. 23, n.º 2, pp. 135-140
- Loureiro, A.M.S., Paz, S.P.A., Veiga, M.D.R. y Angélica, R.S. (2020) Assessment of compatibility between historic mortars and lime-METAKAOLIN restoration mortars made from amazon industrial waste. *Applied Clay Science*, 198, 105843
- Nunes, C., Slízková, Z. and Krřánková, D. (2013) Lime-based mortars with linseed oil: Sodium chloride resistance assessment and characterization of the degraded material. *Periodico di Mineralogia*, vol. 82, n.º 3, pp. 411-427
- Oleson J.P. (2014) Ancient Literary Sources Concerned with Roman Concrete Technology. In: Brandon, C.J., Hohlfelder, R.L., Jackson, M.D. and Oleson, J.P. (ed.) *Building for Eternity: the History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*. Oxford: Oxbow Books, pp. 11-35
- Rodríguez-Navarro, C., Hansen, E. y Ginell, W.S. (1998) Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 81, n.º 11, pp. 3032-3034
- Tunçoku, S.S. y Caner-Saltik, E.N. (2006) Opal-A rich additives used in ancient lime mortars. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n.º 10, pp. 1886-1893
- Van Balen, K. (2005) Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n.º 4, 2005, pp. 647-657

- Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P. y Merino, L. (2011) Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, vol. 25, n.º 8, pp. 3313-3318
- Ventolà, L., Vendrell, M. y Giraldez, P. (2013) Newly-designed traditional lime mortar with a phase change material as an additive. *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1210-1216
- Vendrell, M., Giraldez, P. y Lluveras, A. (2020) Materials i tècniques constructives. Una aproximació analítica. In: Esteve, J. and Menchon, J. (ed.) *Vallferosa. Una torre a la frontera de la Segarra i el Solsonès*. Torà: Ajuntament de Torà, pp. 132-142
- Vitruvius, M. (1960) *The Ten Books of Architecture*. English translation by M. H. Morgan. New York: Dover Publications
- Vyšvařil, M., Žižlavský, T. y Bayer, P. (2021) Foam Glass Dust as a Supplementary Material in Lime Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, n.º 4, 55333637
- Wei, G., Fang, S., Kang, Y. y Zhang, B. (2014) Effect of rice liquid type on properties of traditional lime mortar. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, vol. 17, n.º 4, pp. 618-622 and 665
- Xu, L., Ma, X., Zhang, B., Zhang, Q. y Zhao, P. (2019) Multi-analytical Studies of the Lime Mortars from the Yanxi Hall in the Yangxin Palace of the Palace Museum (Beijing). *Archaeometry*, vol. 61, n.º 2, pp. 309-326
- Žižlavský, T. y Vyšvařil, M. (2022) Use of Fine-Ground Lava Sand as a Pozzolanic Additive in Aerial Lime-Based Mortars. In: *Book of Articles of 9th Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. REHABEND 2022*. Santander: Universidad de Cantabria, pp. 1321-1326