

Escuela Nacional de Conservación, Restauración
y Museografía “Manuel del Castillo Negrete”

Memorias del 5° Foro Académico 2012

La elaboración de los morteros de cal apagada. Presencia tratadística en los materiales y procesos, y su evolución histórica

Juan Alberto Bedolla Arroyo
Elia Mercedes Alonso Guzmán
Wilfrido Martínez Molina
Blanca Alejandra Fernández Barriga

5to foro
académico

ISBN: 978-607-484-464-1

foroacademicoencrym@gmail.com
www.foroacademicoencrym.com

Resumen

El presente trabajo pretende exponer la importancia que tiene el uso de los morteros de cal apagada, así como restablecer la técnica de elaboración y la importante función de los agregados en aquéllos, para lo que toma como primicia la reiterada descripción que se hace en los tratados antiguos sobre el empleo de este recurso, al que se le añadía una variedad de aditamentos, ya inorgánicos, como materiales puzolánicos, teja molida y agregados volcánicos, entre otros, ya orgánicos, como la yema de huevo, la sangre, la lana de borrego, etc., que se utilizaban como aditivos con el fin de obtener morteros resistentes; sin embargo, a la fecha no se emplea más este tipo de agregados, con excepción de la baba de nopal (mucílago del cactus opuntia), de la que no se encontró referencia alguna en los documentos bibliográficos consultados.

Palabras clave:

Mortero, cal, agregados.

Introducción

Seguramente algún beneficio se obtuvo en épocas pasadas al utilizar diversos agregados orgánicos e inorgánicos en los morteros de cal, pero también se tiene la idea de que, por alguna causa o circunstancia, su uso y aplicación dejó de ser constante, al grado de que a la fecha se ha olvidado.

De esta manera, el presente trabajo de investigación pretende encontrar, a través de la busca en los diversos tratados de construcción, informes sobre las variadas tecnologías históricas y sus dichos respecto de la cal apagada en sitio para su uso en la

edificación, y con ello, aspira a conocer el sistema constructivo histórico sobre la elaboración de morteros de cal apagada y determinar las propiedades físico-mecánicas de estas mezclas para trabajos de albañilería nuevos y de restauración.

Entre algunos de los resultados obtenidos en reproducciones hechas según las recomendaciones tratadísticas, se observó que el uso artesanal de cal apagada, acorde con lo establecido en los procesos de construcción consignados, en comparación con lo obtenido en morteros similares, mejoró varias de las propiedades tanto de la mezcla fresca (por ejemplo, la trabajabilidad) como de la endurecida (la resistencia, la apariencia y la durabilidad).

De los morteros y el uso de la cal en la historia

Los conglomerantes históricos utilizados aun hasta finales del siglo XVIII para la fabricación de morteros, pastas y lechadas, se basaban principalmente en la cal, concretamente, en el hidróxido cálcico, obtenido mediante la calcinación¹ y posterior hidratación de rocas calizas u otras rocas carbonáticas. Con el paso del tiempo, este hidróxido cálcico se combinaba con el dióxido de carbono presente en el aire, formando, de nuevo, carbonato cálcico. Las transformaciones químicas implicadas en el ciclo de la cal no atrajeron a técnicos y científicos —salvo casos aislados, como los célebres trabajos de Vicat—, que los consideraron simples y poco interesantes aun hasta muy avanzado el siglo XX. Incluso no se aplicaron estudios científicos más profundos ni técnicas de análisis más modernas sino hasta que se empezó a reflexionar

¹ “Precisamente el término *calcinar* proviene de la cocción de las rocas calizas a altas temperaturas, hasta su descomposición. Es muy reciente el significado que se le va dando a la palabra como sinónimo de *carbonizar*, que algunos lingüistas rechazan drásticamente” (L. F. Carreter, *El nuevo dardo en la palabra*, pp. 82-83).

acerca del papel fundamental del hidróxido cálcico generado en el proceso de fraguado del cemento pórtland.

Realmente, el proceso físico-químico del fraguado de los morteros de cal dista mucho de ser simple: influyen, en primer lugar, los diferentes tipos de carbonato cálcico que se hayan empleado en la calcinación: rocas calizas, rocas dolomíticas, creta, mármoles, etc.; después, la temperatura y duración de la cocción; asimismo, son variadas las formas de apagado: al aire, en tongadas cubiertas de arena por aspersión, en cestos por inmersión, en pasta por fusión en maseras, etc. A menudo se utilizaba directamente cal viva sin apagar, o calizas trituradas parcialmente calcinadas. En cuanto a los agregados,² se usaban arenas de los ríos cercanos, de lechos secos o incluso de la orilla del mar que, además, podían estar lavadas, cocidas, cribadas, etc. La granulometría era muy distinta: de muy fina a gruesa, homogénea y gradual, o de tamaños mezclados, a veces con grandes guijarros incluidos. En definitiva, el tipo de áridos era consecuencia de diversas recetas. También se recurría a materiales reactivos de tipo cerámico, minerales de hierro, carbones o aditivos —como huevos, sangre, cáscaras e incluso materiales fibrosos—, para mejorar la resistencia mecánica, por no hablar de las arcillas u otros materiales silíceos, que aportaban hidraulicidad.

Todo ello muestra cuán ingeniosos eran los constructores antiguos al momento de preparar sus recetas de morteros, por

² “Dejando aparte las adiciones activas, el término *inerte* aplicado a los agregados podría ser objeto de discusión. Muchos de los agregados utilizados en la fabricación de morteros tienen un cierto grado de reactividad con la matriz del mismo, aunque no se haya buscado intencionadamente. Éste es el caso de las arenas de sílice, que en muchos casos se han combinado parcialmente con la cal aérea para producir silicatos calcáreos, que generan fases hidráulicas hidratadas en el mortero fraguado. Lo cual ha confundido en ocasiones los resultados en la caracterización de morteros históricos” (M. Frizot, “L’analyse des mortiers antiques: Problèmes et résultats”, en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, p. 332).

lo que es lógico suponer que cada grupo de canteros o albañiles haya tenido sus propios secretos profesionales, bien guardados, así como que deben haber dejado pequeñas diferencias entre las recetas de cada uno de ellos, a modo de patrón o “especificación”.³

En cuanto a los morteros utilizados en la antigüedad, se trataba de materiales de construcción, cuyos principales componentes eran los agregados, cementantes y agua, a los que, como veremos más adelante, en algunos casos, y con el fin de mejorar sus propiedades, se le añadían diferentes aditivos: puzolanas, materiales cerámicos, etcétera.

Los morteros en los antiguos tratados de construcción

Hasta este momento podríamos decir que la historia de los morteros y sus diversas adiciones se da en dos etapas: por un lado, tendríamos el conocimiento del desarrollo y la evolución de los morteros durante la época romana, donde todo el estudio y la sofisticación de este material radica en la adición de materiales inertes, específicamente, de puzolanas; por el otro, con la caída del Imperio romano, también se perderían el interés y el desarrollo de estos morteros, y no será sino hasta el Renacimiento cuando se retome la preocupación por elaborar y mejorar los morteros de cal, en este caso, con adiciones orgánicas.

Otro de los componentes del mortero de cal es el agregado, cuya naturaleza también es importante a la hora de evaluar las propiedades de aquél. Lo usual, sobre todo en las épocas antiguas, en las que había mayor problema de comunicaciones, era la utilización de agregados que se encontraran en las proximidades

³ H. Jedrzejewska, “Ancient mortars as criterion in analyses of old architecture”, en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, pp. 311-329.

de la zona en la que se colocaría el mortero en preparación. Esto originó una gran diversidad de materiales que funcionarían como agregados, entre los que cabe destacar los silíceos (arena blanca o de río), las piedras trituradas (comúnmente, basalto) y los arcillosos (arcillas sedimentarias, en su mayoría).

Se puede constatar, gracias a los tratados de construcción que se escribieron durante cada una de las épocas mencionadas, el minucioso cuidado que se ponía en explicar la selección de los materiales, la calcinación y la selección de la piedra caliza y, posteriormente, la recomendación de adiciones naturales.

De los agregados en los morteros antiguos

Históricamente se ha dado una adaptación de la arquitectura a los materiales disponibles, por lo que se puede hacer una lectura de la evolución de los sistemas constructivos históricos en paralelo al perfeccionamiento en la elaboración de los materiales de construcción o al descubrimiento de otros nuevos.

Para el caso de la época romana, la adición de materiales inertes en los morteros —caso concreto: las puzolanas— se practica y, por lo tanto, se conoce, desde hace más de 2 000 años. Este hecho se demostraría no sólo por el tipo de construcciones que posibilitó, y que han llegado hasta nuestros días, sino por referencias escritas tan importantes para el conocimiento de los materiales y las técnicas constructivas del arte romano, como puede ser el tratado *Los diez libros de la arquitectura*, de Vitruvio, quien dedica por completo el capítulo VI del Libro segundo a hablar de un material agregado específico, el polvo de puzol, del que dice:

Hay también una clase de polvo que, por su propia naturaleza, produce efectos maravillosos. Se le halla en [...] las cercanías del Vesubio. Este polvo mezclado con la cal y la piedra machacada no

sólo consolida toda clase de edificaciones, sino que incluso las obras que se hacen bajo el agua del mar tienen solidez.

A continuación se atreve a dar una explicación de este comportamiento:

en las entrañas de aquellos montes hay tierras y numerosas fuentes de agua caliente, que no existirían si no estuviesen debajo fortísimos fuegos, alimentados o por azufre o por alumbre o por betún. [...]

Y por tanto, cuando estas tres cosas producidas de la misma manera por la violencia del fuego llegan a mezclarse al recibir de repente por absorción de agua, se condensan y se endurecen por instantes, y se consolidan tan intensamente en el líquido, que no bastan a separarlas o disolverlas ni las olas ni la fuerza del agua.⁴

Vuelve a referirse a estos materiales en el capítulo XIII del Libro quinto, que trata

de los puertos y de las obras de albañilería bajo el agua —y dice—: Las obras de fábrica que haya que efectuar en el mar deberán ser hechas de esta manera: acarrése una clase de tierra que hay en algunos lugares desde Cumas hasta el promontorio de Minerva, y mezclando dos partes de ella con una de cal, se hará un mortero.

En varias ocasiones hace referencia, asimismo, a la conveniencia de añadir polvo de ladrillo a los morteros de cal; en el capítulo V del Libro segundo dice:

Una vez que la cal esté apagada, se mezclará una parte de ella con tres de arena, si es de cantera, y con dos si es de río o de mar. Ésta será la más justa proporción de la mezcla. Además, se hará bastante

⁴ Vitrubio, *Los diez libros de arquitectura*.

más firme y sólida si se mezcla arena de río o de mar con una tercera parte de ladrillos molidos y cernido el polvo resultante.

De la misma manera, más adelante, en el capítulo IV del Libro séptimo, cuando habla “de los enlucidos en lugares húmedos”, dice: “Hecho esto, se revestirá la pared con mortero en el que se haya puesto ladrillo machacado...”. Y añade: “Aplicado el repellamiento, se hace el primer revoque, que también debe ser de ladrillo machacado...”.

Este producto, denominado *cocciopesto*, se ha encontrado de manera regular en los análisis de morteros romanos. Su presencia será una constante en la composición de las argamasas a lo largo de la historia, aunque nunca con tanto auge y conciencia como en la arquitectura romana. Sobre este producto, Bakolas y Biscontin⁵ nos dicen que

fue profusamente utilizado en la arquitectura romana para recubrimientos impermeables (en cisternas, pozos y acueductos) y para la preparación de morteros, especialmente en estructuras horizontales. Los morteros de *cocciopesto* son materiales compuestos (*composites*), constituidos por cal, fragmentos y/o polvo cerámicos, y otros agregados pétreos. La naturaleza de estos materiales se considera hidráulica, sobre la base de las posibles interacciones entre el hidrato cálcico y la cerámica, probablemente formando silicoaluminatos cálcicos hidratados.

En Théra, se introducía en la mezcla de cal y arena el polvo volcánico, llamado *tierra de Santorin* o *terra theraica*,⁶ obtenido

⁵ G. Biscontin y A. Bakolas, *Caratteristiche microstrutturali delle malte storiche a Venezia*, p. 405, disponible en <<http://www.buildingconservation.com/articles/lime-gauging/limecaratteristiche.html>>.

⁶ A. Moropoulou y G. Biscontin, *Technology and Behavior of Rubble Masonry Mortars*, p. 119.

en la isla, pero esta puzolana natural también se utilizaba fuera de ella. Así, se ha encontrado tierra de Santorin en estucos que ornamentaban estatuas del Héphaístéion.

Volviendo a los romanos, consiguieron un enorme grado de sofisticación en la elaboración y puesta en obra de sus morteros, lo que no deja de contribuir a la perfección del resultado final de la argamasa;⁷ incluso llegaron a utilizar morteros multicapa, con tres estratos de diferente función aplicados por separado, en los que emplearon adiciones de cenizas y puzolanas cerámicas con diferentes cometidos, según los casos, como ha estudiado Malinowski⁸ en el acueducto de Cesarea.

Según la opinión de algunos especialistas (Malinowski, Slatkine y Ben Yair,⁹ Furlan y Bissegger¹⁰) en la Edad Media (admitiendo las circunstanciales variaciones geográficas y temporales) se pierde el conocimiento clásico de los materiales de construcción, así como sus sistemas de selección y puesta en obra. Esta afirmación se ajusta sustancialmente a lo que se refiere a los morteros utilizados en las fábricas para recibir y asentar los sillares o cualquier otro elemento con el que se organice el muro.¹¹ Desde

⁷ J. I. Álvarez, A. Martín y P. J. García, “Historia de los morteros. Materiales y técnicas”, en *PH Boletín Informativo*, núm. 13, p. 56: “Para algunos, entre los que nos encontramos, no son éstos (calidad, selección, dosificación y puesta en obra) factores secundarios en el resultado, sino que determinan la diferencia entre los morteros romanos y otros posteriores fabricados con parecidos ingredientes”.

⁸ R. Malinowski, “Concretes and mortars in ancient aqueducts”, en *Concrete International*, vol. 1, issue 1, p. 71.

⁹ R. Malinowski, “Ancient mortars and concretes. Durability aspects”, en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, pp. 347-348.

¹⁰ V. Furlan, “Causes, mechanisms and measurement of damage to mortars, bricks and renderings”, en N. S. Baer, C. Sabbioni y A. I. Sors, *Science, Technology, and European Cultural Heritage*, p. 149.

¹¹ J. I. Álvarez, A. Martín y P. J. García, *op. cit.*, p. 56.

el punto de vista de la técnica constructiva, tradicionalmente la calidad de obra romana se ha definido por la evidencia formal y funcional de la aplicación de estos principios en los morteros de sus construcciones. Estos aspectos cualitativos de la arquitectura clásica han sido referencia obligada al analizar la edificación medieval, sus antecedentes históricos y sus avances técnicos.

En los extensos estudios sobre las construcciones del periodo gótico, se encuentran referencias que ponen en tela de juicio los conocimientos y la capacidad técnica de los arquitectos y constructores medievales. No obstante, la excelencia y buena conservación de muchas catedrales góticas que conocemos parecen contradecir estas posturas. En cualquier caso, éste no es el sitio para indagar la clave de este aparente contrasentido, ni para juzgar los conocimientos que exhiben los arquitectos medievales a través de sus obras. Tan sólo interesa lo concerniente al empleo de algunos de sus materiales tanto para recibir piedras como para decorar los interiores de las catedrales: cal, yeso y arena.

Los romanos no tuvieron que afrontar las dificultades de estabilidad que se plantearon a los constructores medievales. Realizaban sus bóvedas mediante encofrado o por arcos sucesivos de morteros, de forma que cuando este material había endurecido, absorbía en parte el empuje sobre los muros. Por tal motivo, aunque se desconociesen los mecanismos de funcionamiento de las estructuras y los materiales que intervenían en sus construcciones,¹² la sencillez de los diseños y la efectividad de los materiales eran suficientes para garantizar la estabilidad y duración de sus obras. Para este tipo de arquitectura, la dilatada experiencia práctica en el empleo de los materiales supuso un conocimiento real que era transmisible sin el concurso de prouarios teóri-

¹² No es sino hasta comienzos del siglo XIX cuando empieza a conocerse de manera científica el comportamiento de los conglomerantes inorgánicos. Antes de esa fecha, el empleo de tales materiales se guiaba siempre por procedimientos totalmente empíricos.

cos, más allá de la sencilla compilación de recetas, a la manera que se observa en Vitrubio.¹³

La ausencia del empleo de materiales puzolánicos en la época medieval es uno de los aspectos que han puesto en entredicho la pervivencia de la tradición clásica, a la vez que han supuesto un cierto desconocimiento empírico en el trabajo con los materiales de construcción.¹⁴

Por otra parte, en las edificaciones medievales de piedra de Córdoba se han detectado morteros completamente diferentes de los usados en las construcciones islámicas. Según Castro Villalba:¹⁵

son de color oscuro en cuya composición interviene la cal en muy pequeña proporción, predominando la arena y elementos usados en los siglos XIV y XV aparecen a la vista parduzcos, con gruesos

¹³ El hecho de que en Vitrubio encontremos el registro exacto y pormenorizado de ciertas técnicas relacionadas con el uso de los morteros no implica necesariamente que éstas se difundieran gracias a tratados como el suyo, que, en definitiva, no harían sino consignar lo que la experiencia ya había consolidado. Parece lógico suponer que los conocimientos se transmitían fundamentalmente por el ejercicio de la práctica en el seno del gremio de artesanos dedicados a los diferentes oficios. Existen numerosos ejemplos de obras romanas en las que la realidad de lo construido no se ajusta a las minuciosas y explícitas prescripciones que aparecen en su tratado.

¹⁴ “Sin embargo, una afirmación como ésta debe matizarse siempre con la consideración sobre la necesidad que un conocimiento de este tipo tendría para una construcción como la medieval. Como ya hemos apuntado, es probable que sus morteros sólo sirvieran para la puesta en obra o el asiento de los sillares, sin otro requerimiento mecánico-resistente. La razón del empleo de morteros en fábricas de piedra estaría más en relación con la puesta en obra: las operaciones de calce y empotramiento de los pesados sillares son mucho menos trabajosas si el sobrelecho de las piedras inferiores se encuentra ‘lubricado’ con un mortero de fraguado lento como el de cal. En el caso de la mampostería, el único modo de acoplar las piezas y dar organización y resistencia

fragmentos de piedra o ladrillo en su interior, con un aspecto mucho más tosco.

No sabemos qué entiende Castro Villalba por parduzcos, dado que el carácter graso de las cales depende de la ausencia de carbonatos magnésicos en las materias primas que, tras la cocción, se traducen en cualidades como la untuosidad, la trabazón o la blancura de la masa conglomerante. Probablemente, por analogía con los materiales arcillosos que sirven para la fabricación de productos cerámicos, no se trate del carácter más o menos dolomítico de la caliza de partida, sino que se refiere a la presencia de agregados o fragmentos de cerámicas, polvo de ladrillo, etc., en la pasta endurecida.¹⁶

Tampoco son claros los resultados de estas mezclas, pues este autor afirma que en los enlucidos de los muros de tapial, como los de la muralla del Marrubial, se aplicaba una fina capa de cal con un alto contenido en arcillas, “de lo que resulta una mezcla muy depurada, cuya superficie presenta en la actualidad tonos ocres o castaños oscuros, posiblemente originados por una fuerte carbonatación”. Esta afirmación no se entiende, pues es sabido que el carbonato cálcico es de color blanco, lo que no explica cómo ha podido favorecer la carbonatación, ni cuáles son los indicadores de ésta.

De hecho, esta técnica de inclusión de grandes fragmentos de ladrillo y guijarros será utilizada desde el siglo XIV hasta el siglo XVIII en las edificaciones de Córdoba y Sevilla, donde se distinguen dos tipos de usos,¹⁷ por ejemplo, en morteros de regulari-

al conjunto de la fábrica es envolviéndolas con argamasas” (V. Furlan, *op. cit.*).

¹⁵ A. Castro Villalba, *Historia de la construcción arquitectónica*, p. 105.

¹⁶ S. Petrick Casagrande y R. Castillo Blanco, “Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas”, en *Building and Environment* (Science @ Direct), núm. 41, p. 565.

¹⁷ A. Castro Villalba, *op. cit.*, p. 112.

zación y revestimiento de muros, como en la torre de El Carpio y en la iglesia del convento de Santa Clara (siglo XIV), en donde se utilizó “una cama de argamasa con inserción de numerosos fragmentos de tejas y ladrillo en la pared, como paso previo a su enlucido”, y, en la capa de nivelación de suelos: “Dicha nivelación se conseguía mediante la realización de lo que en los contratos de obras del siglo XV denominaban *alcatifa*, una gruesa capa de broza o relleno, integrada por argamasa de cal o arena, fragmentos de ladrillo rascado, teja cortada y otros elementos”.

Este uso de gruesos fragmentos pétreos o cerámicos en las juntas de mortero puede tener su origen en la arquitectura bizantina que sirvió, entre otras cosas, de fuente para los constructores árabes.

En el Renacimiento, los tratados de construcción arquitectónica de León Battista Alberti: *De re aedificatoria* o *Los diez libros de la arquitectura* (Florencia, 1485); de Giorgio Martini: *Tratado de arquitectura, ingeniería y arte militar* (1482), y Andrea Palladio: *Los cuatro libros de la arquitectura* (Venecia, 1570), seguirán mencionando las aplicaciones de los ladrillos triturados, pero tomando la información del tratado de Vitrubio, sin añadir ni aclarar nada, aunque en análisis de morteros venecianos de los siglos XIV al XVIII se han encontrado fragmentos de *cocciopesto*,¹⁸ que indican el uso de la tecnología de los morteros hidráulicos basados en los materiales puzolánicos, al menos en estos periodos.

No es sino hasta el siglo XVIII cuando Francesco Milizia, en su tratado *Principi di architettura civile* (1781), no sólo volverá a mencionar este uso del polvo de ladrillo, sino que intentará dar una explicación científica del fenómeno, comparándolo con los efectos de las puzolanas naturales.¹⁹

En general en el Renacimiento, pero sobre todo en el Barroco, se dará una pérdida de interés por las adiciones puzolánicas a los morteros, frente a la proliferación del uso de aditivos orgánicos.²⁰

¹⁸ G. Biscontin y A. Bakolas, *op. cit.*, p. 405.

Aunque no se sabe a ciencia cierta el lugar y el inicio del uso y aplicación de los morteros de cal con aditivos naturales como un elemento implícito en cualquier edificación, la existencia de documentos conocidos, como los tratados de construcción, manifiestan que desde la época romana se conocían las propiedades físicas y mecánicas de la cal, como expresa el tratado de Vitrubio (cap. V del Libro segundo):

Elegida la mejor arena para el mortero se ha de poner no menos diligencia en la cal, haciéndola de piedra blanca o de pedernal. La de piedra densa y dura será mejor para fabricar; la de piedra más porosa, para los revoques. Después de apagada, se hará el mortero en esta forma: si la arena fuere de mina, a tres partes de ella se pondrá una de cal, incorporándolo todo bien: y si fuere de río o mar, a dos partes de arena, una de cal: esta regla debe de seguirse en la composición del mortero. Si a la arena de mar o río se añadiese una tercera parte de polvos cernidos de ladrillo cocido, hará una mezcla de mucha mejor calidad.²¹

Por otro lado, en el ámbito regional prehispánico se han encontrado, de manera paralela, vestigios que datan del año 500 d. C. de aplanados y enlucidos de cal con pigmentaciones en estructuras prehispánicas, como en los casos de Teotihuacan, Calakmul, Monte Albán y Palenque; por sus características físicas, puede considerarse que el conocimiento existente sobre estos morteros era amplio, ya que a la fecha se conservan en buen estado.

¹⁹ G. Baronio, L. Binda y N. Lombardini, “The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks”, en *Proceedings of the 7th North American Masonry Conference*, p. 35.

²⁰ V. Papageorgiou, *Additives in Historic Mortars. A Study in Relation to the Conservation of Mediterranean Architecture*.

²¹ J. F. Ortiz y Sanz, *Los Diez libros de arquitectura de Marco Vitruvio Polión*, pp. 35-36.

Con lo anterior queda entendido que el uso de los morteros de cal se utiliza desde la época de los romanos en el continente europeo y, aunque posterior, de manera casi paralela a éste, en la época prehispánica en América.

Las adiciones orgánicas

Sin duda alguna, el tema del uso de aditivos orgánicos en la elaboración de morteros de cal, que ha sido una práctica desde la antigüedad, es muy interesante, como lo es estudiar su comportamiento y función en la aplicación de morteros en diferentes elementos. Sin embargo, debido a que es muy extenso, en esta investigación no se abordará sino a manera de registro, con lo que en este documento sólo se dejan plasmados la existencia y el uso de estos aditivos desde épocas romanas.

Los tratados de construcción —que durante siglos fueron los instrumentos oficiales para la obtención del conocimiento de edificar— pueden ser una fuente de información sobre el posible origen del empleo de estos materiales orgánicos como aditivos de los morteros. En ellos se describen los estilos, los elementos y las partes de la arquitectura, y contienen conocimientos técnicos constructivos que llegan a profundizar aun hasta el grado de conocer el material que se ha de utilizar.

En Europa no es sino hasta la época renacentista cuando la edificación empieza a regirse por normas y reglas de construcción, orientadas, básicamente, al rescate de la arquitectura griega, las cuales se obtenían de los tratados antiguos, como los 10 libros que componen *De architectura*, redactado entre el 35 y el 25 a. C., cuyo destinatario fue, con toda seguridad, el emperador Augusto. *De architectura libri decem* es, por lo tanto, el tratado más antiguo de arquitectura que se conoce; los italianos redescubren este documento siglos más tarde y lo toman como referencia para la recuperación de la arquitectura grecolatina.

En el capítulo V del Libro segundo de su tratado: “De la cal, y elección de la piedra para cocerla”, Vitrubio explica los diversos morteros que se deben usar en la edificación: “Para los enlucidos, utilícese cal apagada y confeccionada de mucho tiempo; engañase quien imagina, que esta cal añeja se empleaba en los enlucidos sola, y sin arena, mármol, ni otro material con que formase mortero o estuco”.

Es en esta época renacentista, cuando del gusto por restaurar la arquitectura griega surgen tratadistas apasionados por la belleza arquitectónica de los órdenes clásicos, como Andrea Palladio, con su tratado *Los cuatro libros de la arquitectura*, publicado en Venecia en 1570 y sustentado en la doctrina vitrubiana, en cuyo capítulo V: “De la cal y modo de amasarla”, menciona la importancia de la cal y de la elaboración de los morteros:

Toda piedra es buena para la cal como esté seca, sea frágil, y no contenga otra materia, que consumida por el fuego, minore su volumen. Así será mejor cal la de piedra durísima compacta y blanca; y que después de cocida pierda sólo la tercera parte del peso que la piedra tenía antes. [...] Toda piedra, sea de monte ó río, se cuece más ó menos pronto según el fuego que se le hace. Lo regular es cocerse en sesenta horas.²²

De la misma manera, en el año de 1450 León Battista Alberti escribió en latín *De re aedificatoria*. Se trata de una obra dirigida no a especialistas, sino al gran público con formación humanística, tomando como modelo los 10 libros de arquitectura de Vitrubio, que en aquel momento circulaban en copias manuscritas sin corregir filológicamente. Este tratado también se divide en 10 libros, y en el segundo dedica un apartado a la cal y sus usos: “Diversas especies de cal y yeso y las conveniencias de natura

²² J. F. Ortiz Sanz, *Los cuatro libros de la arquitectura de Andrea Palladio, vicentino*, pp. 6-7.

y inconveniencias, y acerca de estas cosas, otras algunas no indignas de ser sabidas”, en el que Alberti describe sus experiencias y legados testimoniales, que a su vez él encontró en otros documentos antiguos, acerca de la mejor manera de elaborar morteros:

Y tiene por averiguado que con esta formentacion la cal añade mucho a la virtud [se refiere al proceso de apagado de la cal]. Yo he visto en muy antiguas y vigessimas escrituras haber sido dexada por quinientos años, haber sido hallada poco ha mojada y liquida (por decirlo asi), madura en tanto grado, que con la blancura q sin comparación sobre pujaua las mieles y los meollos de los huesos²³ [...] y es para hacer un buen mortero que tiene que pensarse en alguna de estas tres arenas, la de hoyas, la de rio y la de mar. La mejor de todas es la de hoyas y esta es de muchas maneras, negra, cana, roja y carbúnculo y llena de guijas.²⁴

Durante la época mencionada surgieron muchos tratadistas más: Serlio, Viñola y Scamozzi, quienes, de la misma manera, tuvieron como base a Vitrubio e hicieron mención del uso común de los morteros de cal, del proceso empírico de apagado y de los diversos agregados; sin embargo, hasta este momento en ninguno de los tratados mencionados se abordaba el uso de aditivos naturales en la elaboración de morteros, lo cual no sucederá sino hasta el siglo XVIII: de acuerdo con los usos en los que éstos se van a aplicar, en diversos tratados sobre edificación se especifican tales aditivos:

y para unir piezas de estatuas, o una piedra con otra, o piedra con madera, es cosa muy buena, y firme el quajaron, que se hace de

²³ L. B. Alberti, *Los diez libros de la arquitectura*, traducidos de latín a romance, con privilegio en casa de Alonso Gómez, impresor de su majestad, p. 54.

²⁴ *Ídem*, p. 75.

quajada de leche, y cal viva, la que se mezclara de modo, que haga una massa muy aquosa.

[...] Para que un estanque, u otro grande receptáculo resista a mucha cantidad de agua, se unen las piedras con diversos betunes, compuestos de polvos de piedras de cantería, con aceyte de linaza, estopa, &c. La mejor composición en mi juicio, y cuyo efecto mas veces he observado, es la siguiente: un quartillo de polvo de piedra de cantería, ocho quartillos de limaduras de hierro, doce quartillos de cal viva, seis quartillos de arina de toba, quatro quartillos de harina de vidrio, mocho [*sic*] quartillos de polvo de ladrillo, y quatro onzas de litargio;²⁵ todo esto molido, y pasado por un zedazo de cerdas de caballo, se amassara con tres azumbres de aceyte de linaza: después se bate bien, hasta que este la massa blanda, y se le mezclaran y batirán unos pelos de cabra silvestre, o de algodón.²⁶ [...] y agregaras un quarto de esta proporción de sangre de borrego para que el estuco se pegue bien a la piedra...²⁷

De esta manera, durante los siglos XVIII y XIX son comunes los tratados de construcción que especifican en su contenido el uso de adiciones naturales orgánicas y minerales como complemento en la elaboración de morteros de cal, e incluso aun hasta inicios del siglo XX algunos tratados y manuales también consignan esta información. Así, lo que se observa es que el uso de los aditivos naturales en la elaboración de los morteros de cal ha existido desde la época renacentista en Europa, de donde

²⁵ Material obtenido en el proceso metalúrgico de separar la plata del plomo (Raya de color rojo. Brillo graso. Color rojo. Dureza 2. Densidad 9.25 g/cm³), llamado así en 1917 por una palabra griega dada por Diocorides.

²⁶ Ch. Rieger, *Elementos de toda la arquitectura civil*, con las más singulares observaciones de los Modernos, pp. 226-228.

²⁷ A. Plo y Camín, *El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor*, dividido en tres libros, p. 125.

se retomaron estas técnicas y se emplearon en la Nueva España para la edificación de los edificios civiles y religiosos.

En la siguiente tabla expresamos, de manera sintetizada, el conjunto de tales obras:

Lista de materiales orgánicos que se deben utilizar como aditivos en las mezclas de los morteros de cal,²⁸ para la edificación según tratados de construcción en distintas épocas.

| | <i>Los diez libros de la arquitectura, Marco Vitrubio Polión</i> | <i>Los cuatro libros de la arquitectura, Andrea Palladio</i> | <i>Tratado breve sobre las ordenanzas de la Villa Madrid y policia en ella, Juan de Torija</i> | <i>Elementos de toda la arquitectura civil, Christiano Rieger</i> | <i>El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor, Antonio Plo y Camín</i> | <i>Observaciones sobre la práctica y el arte de edificar, Manuel Fornes y Gurrea</i> | <i>Manual de construcciones de albañilería, P. C. Espinosa</i> | <i>Tratado de construcción civil, Florencio Ger y Lobez</i> | <i>Breve compendio de la</i> |
|------------------|--|--|--|---|---|--|--|---|------------------------------|
| Azúcar | | | | | | | | | |
| Arroz | | | | | | | | | |
| Vino | | | | | | | | | |
| Malta | | | | | | | | | |
| Manteca de cerdo | | | | | | | | | |
| Jugo de higo | | | | | | | | | |
| Yema de huevo | | | | | | | | | |
| Leche cuajada | | | | | | | | | |
| Leche | | | | | | | | | |
| Sangre | | | | | | | | | |
| Cera de abejas | | | | | | | | | |
| Cola animal | | | | | | | | | |

Tabla I. Relación de aditivos orgánicos y su manifestación en los tratados de construcción

²⁸ L. B. Sickels, "Organic additives in mortars", en *Edinburgh Architecture Research*, vol. 8, p. 15.

Como se observa en la tabla anterior, varios de los materiales orgánicos que describen los tratados son los mismos que se expresan en los estudios y bibliografía de varios inmuebles, por lo que posiblemente los contenidos de aquéllos tuvieron alguna injerencia en el momento de su edificación o restauración. Aunque todavía queda la incógnita de cuál era el uso y la función de estos materiales en la elaboración de morteros de cal, los estudios realizados hasta la fecha en morteros antiguos nos han dado la posibilidad de concebir la función que desempeñaban.

Con el fin de modificar algunas de las propiedades del mortero, tradicionalmente se le han adicionado diferentes materiales. Éstos han ido cambiando a lo largo de los años. En las primeras épocas, las adiciones eran de materiales y sustancias que podemos denominar naturales: arcillas molidas, que confieren al mortero propiedades hidráulicas; clara de huevo, sangre, jugo de higo, arroz, etc., que aceleran el fraguado, actúan como plastificantes, etc. En algunos morteros romanos se ha encontrado la presencia de pelos de animales, que, se supone, se añadían para aumentar la resistencia a la flexotracción de los morteros de cal.

Por su parte, las adiciones actuales son generalmente sustancias más elaboradas, en su mayoría sintéticas, como resinas acrílicas, resinas epóxicas, siliconas, sustancias poliméricas, etc. Además de las anteriores, se utilizan como aditivos sustancias minerales naturales, como pueden ser las escorias o las puzolanas.

Las adiciones, tanto las actuales como las utilizadas en la antigüedad, tienen la misión de mejorar ciertas propiedades de los morteros: porosidad, resistencia, adhesión, etc.; sin embargo, esto los hace más vulnerables a los ataques de los agentes agresivos externos.

Los antiguos constructores tenían que confiar en la experimentación o información transmitida oralmente por sus antepasados, y con ello tenían que entender y aprender de las distintas propiedades que los aditivos orgánicos y naturales le conferían a

los morteros, así como los efectos que producían en ellos. En la Nueva España era común que los constructores tuvieran de vez en cuando la oportunidad de acceder a la literatura existente, en la mayoría de los casos, tratados. Hoy en día, los restauradores son más afortunados, ya que cuentan con información sobre estudios y análisis de morteros antiguos, como son los casos de estudios enfocados en diferentes adhesivos o cementantes, como yesos, y morteros.

Con estos resultados y en esas tempranas fechas de preocupación por restaurar con un material que diera las características necesarias para la conservación de los inmuebles históricos, a inicios del siglo XX se utilizaron estas mezclas en varios proyectos. Bankart encuentra el uso de la sangre en los morteros para la catedral Rochester y, más tarde todavía, el empleo de la orina en los morteros de la catedral de Rouen, donde la intención era usar la primera con yema de huevo como adhesivo, y la malta y la orina como actores para el mejoramiento de la durabilidad de los morteros.

Para 1964, Hodges²⁹ encuentra en sus estudios morteros con muy baja resistencia mecánica, por lo que era común que le agregaran fibras o vellos animales mezclados para aumentarla, como en el caso de la iglesia de Juan Bautista, en Constantinopla.

Las características y el desarrollo del mortero dependen no sólo de sus componentes sino también de las técnicas utilizadas en el proceso, entendido éste desde la calcinación hasta la puesta en obra del mortero, pasando por la mezcla, la preparación e incluso las condiciones en las que se producirá la carbonatación.

Localmente, el aditivo natural orgánico que por costumbre se incluye en los morteros es el mucílago de nopal, cactus opuntia Blanco. El nopal, nombre coloquial de los cactus de hojas planas espinosas, tiene un lugar importante en la cosmogonía mexicana; su cultivo se realiza en tierras de poca calidad y con escasez de

²⁹ H. Hodges, *Artifacts*, p. 63.

agua. El mucílago puede obtenerse por métodos diferentes: sin acción de calor, remojándolo en agua a temperatura ambiente, o hirviéndolo, asándolo y sumergiéndolo en agua. Este material se ha utilizado en otras investigaciones para la estabilización de arcillas en recubrimientos.

En la siguiente tabla se presenta un esquema de la evolución de los diferentes cementantes utilizados en la construcción a lo largo de los años.³⁰

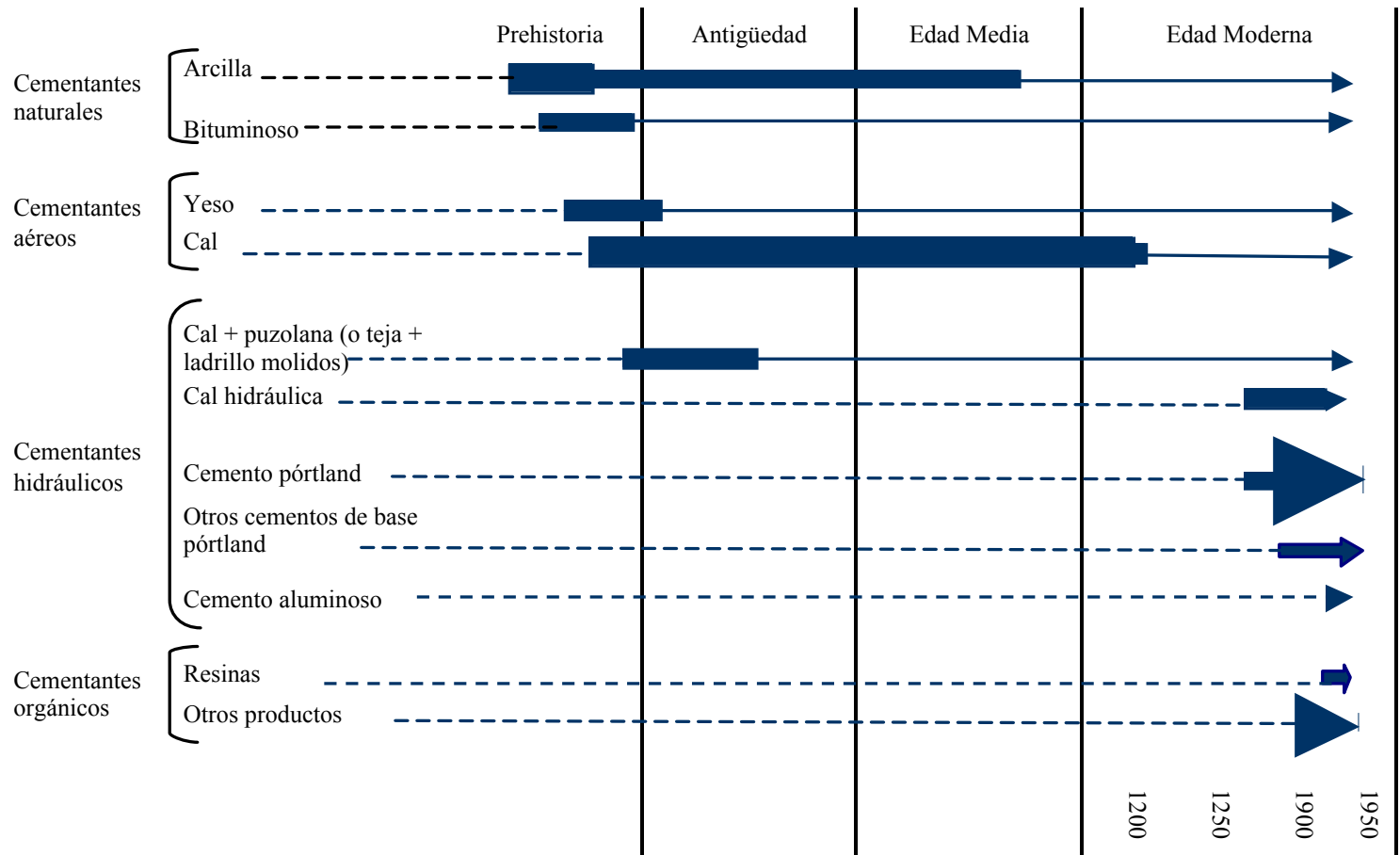


Tabla 2. Línea del tiempo y el uso de los aglutinantes

³⁰ El esquema se realizó con base en la información bibliográfica en la que, en términos generales, se mencionan los materiales de construcción del momento.

Desde la época prehispánica, y sólo en algunas regiones, se conoce cómo la cal se produce mediante la calcinación de piedras calizas u otros materiales ricos en carbonato de calcio, como las conchas o los corales, con los que se obtiene el óxido de calcio, o cal viva. Este material, mezclado posteriormente con agua, da como resultado la cal apagada, que a su vez se mezcla con agregados para formar una pasta que se aplicaba o modelaba sobre las superficies arquitectónicas.

Sin el conocimiento científico, los prehispánicos observaban que, tras el secado, la cal endurecía y reaccionaba con el dióxido de carbono del aire para formar otra vez carbonato de calcio.³¹ Al producto obtenido entre la mezcla de cal y arena para su uso en acabados se lo conoce como *estuco*, término generalmente empleado en la arqueología mesoamericana para los materiales de cal empleados en la arquitectura.

La investigación en los aspectos técnicos de la arquitectura mesoamericana ha mostrado poco interés en la cal, pese a que se empleó como material constructivo en muchas de las culturas mesoamericanas, fue fundamental en la arquitectura prehispánica y jugó un papel primordial en el desarrollo de estas civilizaciones. No obstante, la concordancia de la información derivada de las fuentes históricas y las investigaciones etnográficas, así como los ejemplos donde se han documentado zonas de producción de cal en el registro arqueológico, confirman el sofisticado conocimiento que algunas culturas mesoamericanas tuvieron de este material y que continúa siendo una práctica viviente.

Los datos históricos y las fuentes etnográficas nos aportan información acerca de la producción de cal desde el siglo XVI, con base en lo cual se pueden realizar deducciones y analogías para el entendimiento de su uso en épocas prehispánicas. En el siglo XVI, fray Diego de Landa describió, en su *Relación de las cosas de Yucatán*,³² la abundancia de la piedra caliza y del *saccab*

³¹ R. S. Boynton, *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, p. 86.

(*sascab*, o *saskab'*) en esa entidad: una tierra blanca que hasta la fecha se utiliza, de la misma manera que en aquella época, como elemento de carga para la fabricación de materiales de cal. Landa también dejó descrito el uso de sustancias orgánicas extraídas de cortezas de árboles, las cuales se mezclaban con la cal para mejorar las propiedades de los pisos y aplanados.³³

Por otro lado, Hernando Ruiz de Alarcón³⁴ escribió sobre el quemado de la cal en comunidades nahuas de las tierras altas de México, en donde se conjuraba al viento y al fuego para que naciera la mujer blanca, *yztaccihuatl* o *iztaccihuatl*, la personificación de la cal. Estas prácticas coinciden perfectamente con las descripciones de Schreiner³⁵ en contextos mayas actuales, como se explica más adelante.

Los primeros estudios etnográficos que documentaron la producción de cal en comunidades mayas contemporáneas los llevó a cabo el Instituto Carnegie de Washington. Morris³⁶ documentó detalladamente la producción de cal efectuada por maestros mayas para los trabajos de restauración en Chichén Itzá. Para ello se construyó una pira de troncos de madera que formaban un cilindro de 5.5 m de diámetro y 2 m de altura, sobre la que se colocaron las piedras calizas para ser calcinadas.

Se sabe también que la producción de cal en la zona maya se concibe como un nacimiento o transformación, en donde nace la mujer blanca o *SakChu'pal*, el equivalente maya de *Iztaccihuatl*,

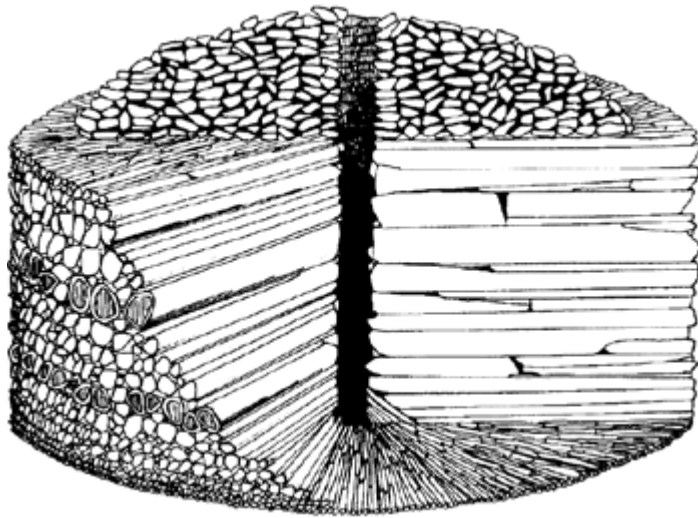
³² A. M. Tozzer, *Landa's Relación de las cosas de Yucatán*, p. 176.

³³ *Ídem*, p. 178.

³⁴ H. Ruiz de Alarcón, *Treatise on the Heathen Superstitions that Today Live Among the Indians Native to this New Spain, 1629*, p. 341.

³⁵ T. P. Schreiner, "Aspectos rituales de la producción de cal en Mesoamérica: Evidencias y perspectivas de las tierras bajas mayas", en *Memorias del Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2002*, pp. 480-487.

³⁶ E. H. Morris, J. Charlot y A. A. Morris, *The Temple of the Warriors at Chichén Itzá, Yucatán*, p. 415.



en tanto que la concepción de útero está relacionada con la pira donde se caliza la piedra caliza, por lo que la cal y su producción están asociados con la feminidad, la pureza y la fertilidad,³⁷ simbología que coincide con los relatos del siglo XVII mencionados anteriormente.

La cal se usó de manera abundante en las tierras bajas mayas debido en parte a que la península de Yucatán está constituida por una gran plataforma de calizas formada durante el Cenozoico.³⁸ A pesar de la fácil obtención de la piedra caliza, la cal se empleó de manera diferencial en los distintos niveles socioeconómicos de los sitios de esta civilización; basta com-

³⁷ T. P. Schreiner, *op. cit.*, pp. 104-117.

³⁸ L. Espinosa, M. Cerón y Y.A. Sulub, "Limestone rocks of the Yucatan Peninsula. Description of the Lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory tests", en *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 35, pp. 410-411.

parar la arquitectura pública monumental de mampostería, que contiene grandes cantidades de cal, con los ejemplos de arquitectura doméstica, en donde prevaleció la arquitectura de tierra con lechadas de cal en esta región. El uso preferencial de la cal se debe probablemente a la alta inversión laboral que este material demanda, lo que con toda probabilidad causaba que la cal en la arquitectura fuera considerada como un material de prestigio.

Sin embargo, la producción y el uso a gran escala de la cal en la arquitectura no debe confundirse con el consumo en el ámbito doméstico, en donde su empleo para el reblandecimiento del maíz, o nixtamalización, seguramente permeaba todos los estratos de la sociedad, como todavía se puede ver en comunidades indígenas. Este proceso, que consiste en remojar el maíz en agua de cal o algún otro medio alcalino, como la ceniza, reblandece el pericarpio del grano y aumenta considerablemente su valor nutricional, al acrecentar el contenido en aminoácidos y calcio.³⁹

A pesar de la gran cantidad de cal que se produjo en épocas prehispánicas para la construcción de templos y diversas estructuras monumentales en algunas culturas, son pocos los ejemplos en los que se ha estudiado y detectado la producción de cal,⁴⁰ lo cual, de cierta manera, se debe muy probablemente a lo que varios autores han asumido: que la cal durante esta época prehispánica se producía a cielo abierto, sin ninguna estructura permanente de quemado.⁴¹

³⁹ S. H. Katz, M. L. Hediger y L. A. Valleroy, "Traditional maize processing techniques in the New World", en *Science*, vol. 184, pp. 765-773.

⁴⁰ E. M. Abrams, "The evolution of plaster production and the growth of the Copan Maya State", en *Arqueología Mesoamericana: Homenaje a William T. Sanders*, vol. 2, pp. 193-208.

⁴¹ En una gran mayoría, los autores que han escrito sobre el tema coinciden en la manera de calcinación de la cal a cielo abierto.

Conclusión

Desde la consolidación de la civilización romana, el uso de morteros de cal se generalizó y se extendió. Esto trascendió por generaciones hasta el siglo XVIII, cuando surgen cementantes hidráulicos, los cuales empiezan a reemplazar parcialmente a la cal. Estos nuevos materiales endurecieron más rápidamente y desarrollaron resistencias mecánicas superiores. En el siglo XIX, la invención del cemento pórtland revolucionó el mundo de los materiales para la construcción, y sustituyó por completo el uso de la cal en todo tipo de construcciones civiles y militares.

Tradicionalmente, con el propósito de modificar y/o mejorar algunas de las propiedades de los morteros, estos productos han evolucionado a través del tiempo y se han hecho mixtos: junto con los componentes básicos, se mezclaron adiciones de productos diferentes de los agregados comunes. En la época de la Colonia, con toda la tradición constructiva generada por los tratados de construcción, algunas mezclas estaban compuestas, como se ha mencionado, por sustancias naturales (sangre, el jugo del higo, la grasa del cerdo, la yema de huevo, etcétera). Subsecuentemente, desde hace mucho tiempo los morteros como elemento constructivo han tenido una misión doble: por un lado, fungen como eslabón entre los materiales de construcción (fundamentalmente, mampostería de piedra) y, por el otro, cubren y protegen las superficies de columnas, paredes, fachadas o algún otro elemento arquitectónico.

De cierta manera, en gran medida los morteros han sido la piel del edificio, por lo que es obvio que sus funciones son vitales para la conservación del “monumento”, y revelan la importancia de estos materiales en la herencia histórica.

Bibliografía

- Abrams, Elliot M.
1996 “The evolution of plaster production and the growth of the Copan Maya State”, en *Arqueología mesoamericana: Homenaje a William T. Sanders*, vol. 2, México: INAH.
- Alberti, León Battista
152 *Los diez libros de la arquitectura*, traducidos de latín a romance, con privilegio en casa de Alonso Gómez, impresor de Su Majestad.
- Álvarez, J. I., A. Martín y P. J. García
“Historia de los morteros. Materiales y técnicas”, en *PH Boletín Informativo*, núm. 13, Sevilla: IAPH, pp. 52-59.
- Bankart, George Percy
1908 *The Art of the Plasterer*, Londres: General Books.
- Baronio, G., L. Binda y N. Lombardini
1996 “The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks”, en *Proceedings of the 7th North American Masonry Conference*, Notre Dame: University of Notre Dame.
- Biscontin, G. y A. Bakolas
1994 *Caratteristiche microstrutturali delle malte storiche a Venezia*, Tisbury: Cathedral Communications, disponible en <<http://www.buildingconservation.com/articles/lime-gauging/limecaratteristiche.html>>, consultado el 19 de junio de 2008.

Boynton, Robert S.

1980 *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, 2.a ed., Londres: Wiley.

Carreter, Lázaro F.

2004 *El nuevo dardo en la palabra*, Madrid: Santillana (Punto de Lectura).

Castro Villalba, Antonio

1995 *Historia de la construcción arquitectónica*, Barcelona: UPC (Quaderns d'Arquitectes 12).

Espinosa, L. M. Cerón y Y.A. Sulub

1996 "Limestone rocks of the Yucatan Peninsula. Description of the Lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory tests", en *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 35, issue 4-5, 7 de junio.

Frizot, M.

1982 "L'analyse des mortiers antiques: Problèmes et résultats", en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, Roma: ICCROM.

Furlan, V.

1991 "Causes, mechanisms and measurement of damage to mortars, bricks and renderings", en N. S. Baer, C. Sabbioni y André I. Sors, *Science, Technology, and European Cultural Heritage*, Bolonia: Elsevier Science (Pergamon).

Hodges, Henry

1964 *Artifacts*, Londres: John Baker.

Jedrzejewska, H.

1982 "Ancient mortars as criterion in analyses of old architecture", en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, Roma: ICCROM.

Katz, S. H., M. L. Hediger y L.A. Valleroy

1974 "Traditional maize processing techniques in the New World", en *Science*, vol. 184, núm. 4138.

Malinowski, R.

1979 "Concretes and mortars in ancient aqueducts", en *Concrete International*, vol. 1, issue 1, Detroit: ACI.

1982 "Ancient mortars and concretes. Durability aspects", en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, Roma: ICCROM.

Moropoulou, A. y G. Biscontin

1997 *Technology and Behavior of Rubble Masonry Mortars*, Oxford: Elsevier Science (Construction and Building Materials, vol. 11 (2)).

Morris, Earl H., Jean Charlot y Ann Axtell Morris

1931 *The Temple of the Warriors at Chichén Itzá, Yucatán*, Washington: Carnegie Institute of Washington.

Neuburger, Albert

1930 *The Technical Arts and Sciences of the Ancients*, Londres: Kegan Paul.

Ortiz y Sanz, Joseph Francisco

1787 *Los Diez libros de arquitectura de Marco Vitruvio Polión*, traducidos del latín y comentados, Madrid: Imprenta Real.

1797 *Los cuatro libros de la arquitectura de Andrea Palladio, vicentino*, Madrid: Imprenta Real.

Papageorgiou, Vassilios

1996 *Additives in Historic Mortars. A Study in Relation to the Conservation of Mediterranean Architecture*, York: The Institute of Advanced Architectural Studies, pp. 40-41, disponible en <<http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler-/rep594.pdf>>, consultado el 21 de junio de 2008.

Petrick Casagrande, Susana y Ronald Castillo Blanco

2004 “Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas”, en *Building and Environment* (Science @ Direct), Elsevier, núm. 41.

Plo y Camín, Antonio

1767 *El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor*, dividido en tres libros, Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar.

Rieger, Christiano

1763 *Elementos de toda la arquitectura civil*, con las más singulares observaciones de los Modernos, impreso en latín, traducidos al castellano por el P. Miguel Benavente, Madrid: Joachin Ibarra.

Ruiz de Alarcón, Hernando

1984 *Treatise on the Heathen Superstitions that Today Live Among*

the Indians Native to this New Spain, 1629 (trad. y ed. de J. Richard Andrews y Ross Hassig), Norman: University of Oklahoma Press (The Civilization of the American Indian Series).

Schreiner, Thomas P.

2003 “Aspectos rituales de la producción de cal en Mesoamérica: Evidencias y perspectivas de las tierras bajas mayas”, en *Memorias del Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, 2002, Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología.

Sickels, L. B.

1981 “Organic additives in mortars”, en *Edinburgh Architecture Research*, vol. 8, pp. 7-20.

Tozzer, Alfred M.

1966 *Landa's Relación de las cosas de Yucatán*, Nueva York: Kraus (Papers of the Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University, XVIII).

Vitrubio

1982 *Los diez libros de arquitectura* (trad. de Agustín Blánquez, ed.), Madrid: Iberia (Colección Obras Maestras).