



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE ARQUITECTURA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

ADITIVOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN
MORTEROS DE CAL: REVISIÓN HISTÓRICA
PARA SU APLICACIÓN EN INTERVENCIONES
ACTUALES

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN ARQUITECTURA,
INVESTIGACIÓN Y RESTAURACIÓN DE
SITIOS Y MONUMENTOS

PRESENTA:

ARQ. MARÍA GUADALUPE DÍAZ CALDERÓN

ASESORA:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Morelia, Michoacán; Febrero de 2016.

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE ARQUITECTURA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ADITIVOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN MORTEROS DE CAL:
REVISIÓN HISTÓRICA PARA SU APLICACIÓN EN
INTERVENCIONES ACTUALES

ARQ. MARÍA GUADALUPE DÍAZ CALDERÓN

SINODALES:

Directora de tesis: Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Sinodal 1: Dr. J. Alberto Bedolla Arroyo

Sinodal 2: Dra. Ma. del Carmen López Núñez

Sinodal 3: Dr. Héctor Javier González Licón

Sinodal 4: Dr. Luis Alberto Torres Garibay

AGRADECIMIENTOS

“Doy gracias a la arquitectura porque me ha permitido ver el mundo con sus ojos”

Rafael Moneo

Al apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de los programas de becas para realizar estudios de maestría y becas mixtas para realizar estancias de investigación en el extranjero.

A mi directora de tesis, la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por la oportunidad que me brindó para realizar esta investigación, su confianza, apoyo e impulso a lo largo de estos años. Sobre todo agradezco el trato humano y su constante interés en mi formación.

Al Dr. Antonio Jaramillo Morilla, por su hospitalidad y disponibilidad durante mi estancia de investigación en la Universidad de Sevilla.

Al cuerpo académico del programa de Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y monumentos, por las horas dedicadas a nuestra formación y las enseñanzas otorgadas.

A mi familia y amigos por su apoyo constante y por la confianza depositada en la realización de este proyecto académico.

GRACIAS..

DEDICATORIA

A quienes partieron antes de empezar este proyecto, pero me acompañaron en todo momento.

A quien siempre ha estado a mi lado.

Con el descubrimiento de productos sintéticos para incrementar el desempeño mecánico de los morteros, se generalizó su uso en los procesos de restauración, y se remplazaron los morteros tradicionales en la mayoría de las construcciones modernas, pero también en las intervenciones de edificios históricos. Es hasta investigaciones recientes cuando se comienza a observar la aceleración en los procesos de deterioro debido al uso del cemento Portland, causando daños irreversibles a nuestro Patrimonio Arquitectónico.

Hoy en día los especialistas enfocan su atención hacia el pasado en la búsqueda de una afinidad entre la argamasa y el material original de la fábrica, numerosos estudios optan por el uso de materiales con características similares como la cal para la conservación del inmueble. Los resultados de la restauración a partir del uso de la cal han sido mejores, pero aún se busca la mejora de sus propiedades para hacerlos más duraderos, una de las alternativas exploradas es el uso de aditivos.

Este trabajo informa sobre los diferentes aditivos indicados en la literatura histórica, su efecto sobre las propiedades de los morteros y los resultados de la evaluación de la trabajabilidad al recrear morteros con una serie de materiales orgánicos e inorgánicos en condiciones de laboratorio. El objetivo principal de este trabajo es verificar el efecto físico que el material aporta al mortero por medio de la experimentación y la observación.

Se pretende además contribuir a las investigaciones referentes a la conservación del Patrimonio Arquitectónico, al proporcionar una base histórica de las técnicas constructivas, para el diseño de nuevos morteros adaptados para aplicaciones en el campo tomando en cuenta los requisitos actuales de costo y tiempo de edificación.

Palabras clave

Mortero | Cal | Aditivo | Conservación | Restauración | Histórico | Patrimonio

With the finding of synthetic products to increase the mechanical performance of mortars, its use in restoration processes became widespread, and traditional mortars were replaced in most modern buildings, but also in historic buildings interventions. Until recent research is when is started to observe the acceleration in the process of deterioration owing to the use of Portland cement, causing irreversible damage to our architectural heritage.

Today specialists focus their attention to the past in search of an affinity between the mortar and the original material fabric, numerous studies choose for the use of materials with similar characteristics as lime for the conservation of the property. The results of the restoration from the use of lime have been better, but still improving their properties looking for durability, one of the alternatives explored is the use of additives.

This paper reports the various additives indicated in the historic literature, their effect on mortar properties and evaluation results of the mortar workability recreating a series of organic and inorganic materials in laboratory conditions. The main objective of this work is to verify the physical effect that the material gives the mortar through experimentation and observation.

It is also intended to contribute to research concerning the conservation of architectural heritage, to provide a historical foundation of construction techniques, for the design of new mortars adapted for applications in the field, taking into account the current requirements of cost and time of building.

Keywords

Mortar | Cal | Additive | Conservation | Restoration | Historical | Heritage

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
ESTADO DEL ARTE.....	5
MARCO DE REFERENCIA.....	12
MARCO METODOLÓGICO.....	15
CAPITULO 1	
MATERIALES Y MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE MORTEROS ANTIGUOS.....	21
LOS MORTEROS EN LA HISTORIA, TIPOLOGÍAS Y USOS.....	22
CLASIFICACIÓN.....	30
PROPIEDADES DE LOS MORTEROS.....	32
MATERIALES BÁSICOS DE LOS MORTEROS	37
DISOLVENTE: EL AGUA.....	38
AGREGADOS: ARENA.....	38
CONGLOMERANTE O CEMENTANTE: LA CAL.....	40
ADITIVOS Y ADICIONES.....	48
AGENTES DE DETERIORO EN MORTEROS.....	49
HUMEDAD.....	51
TEMPERATURA.....	52

SALES.....	52
OTROS FACTORES.....	53
REFLEXIONES.....	53

CAPITULO 2

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PRESENCIA DE ADITIVOS Y ADICIONES EN MORTEROS.....	55
USO DE ADITIVOS Y ADICIONES EN LA PRODUCCIÓN DE MORTEROS DE CAL	56
PROPIEDADES DE ADICIONES Y ADITIVO.....	58
ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE ADITIVOS EN MORTEROS.....	60
RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS.....	64
MORTEROS PREHISPANICOS.....	70
MORTEROS EN EL PERIODO VIRREYNAL EN MORELIA.....	73
REFLEXIONES.....	76

CAPITULO 3

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ADITIVOS EN LOS MORTEROS DE CAL.....	79
ELABORACIÓN DE MORTEROS DE PRUEBA.....	80
MATERIALES UTILIZADOS.....	80
PROCESO DE ELABORACIÓN.....	84
MUESTREO.....	89
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS EN ESTADO FRESCO	89
PROPIEDADES MECÁNICAS DE MORTEROS DE CAL DURANTE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN	91
RESULTADOS DURANTE ETAPA DE MUESTREO.....	93

ADITIVOS ORGÁNICOS.....	94
ADITIVOS INORGÁNICOS.....	99

CAPITULO 4

EL DISEÑO DE MORTEROS PARA SU APLICACIÓN EN OBRAS DE RESTAURACIÓN	103
CRITERIOS EN LOS PROCESOS DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN.....	104
<i>CUALIDAD ESTÉTICA</i>	106
EL USO DE MORTEROS DE CAL CON ADITIVOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN LA CONSERVACIÓN.....	108
<i>RECUBRIMIENTOS</i>	109
<i>REINTEGRACIÓN VOLUMÉTRICA</i>	111
<i>CONSOLIDACIÓN Y FIJADO</i>	112
<i>REJUNTADO</i>	113
METODOLOGÍA PARA LA RESTAURACIÓN DE MORTEROS ANTIGUOS.....	114
<i>ETAPAS</i>	115
ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN.....	116
<i>CONSERVACIÓN EMERGENTE</i>	116
<i>CONSERVACIÓN PERMANENTE</i>	117
<i>CONSERVACIÓN PREVENTIVA</i>	117
<i>CONSERVACIÓN DIRECTA</i>	117
USO RECOMENDADO DE ADITIVOS DE ACUERDO A SU FUNCIÓN.....	118
REFLEXIONES.....	119

CONCLUSIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	125
GLOSARIO.....	135
ANEXOS.....	141
ANEXO 1. PINTURA DE CAL.....	142
PINTURA AL FRESCO.....	143
ANEXO 2. USO DE JABON Y ALUMBRE COMO IMPERMEABILIZANTE.....	145
ANEXO 3. APAGADO DE LA CAL.....	147
ANEXO 4. COMPARATIVA ENTRE CAL Y CEMENTO.....	148
ÍNDICE DE FIGURAS.....	151
ÍNDICE DE TABLAS.....	152

Quien mira el milagro de la arquitectura, seguramente, alaba las maravillosas areniscas, el resistente ladrillo, y la dura madera, pero no piensa en el siempre leal sirviente, ‘el mortero’, que conserva unidas las mágicas paredes.¹

INTRODUCCIÓN

Durante varios años, con la aparición de los productos sintéticos, se generalizó su uso en los procesos de restauración, ya que ofrecían facilidad en su uso y aplicación, prometían durabilidad, resistencia y estabilidad. Es hasta recientes estudios cuando se comienza a observar los efectos negativos de éstos productos sintéticos, los cuales aceleraron el deterioro de los materiales originales, lo que se manifestó en la pérdida de la estabilización estructural, alteración estética y en algunos casos la pérdida total de muchos de ellos.

En el campo de la conservación del patrimonio cultural, el empleo de morteros de cal en intervenciones, tanto de cal apagada in situ como el uso de cal en polvo, es un recurso aceptado y utilizado por los profesionales del campo, gracias a los resultados satisfactorios que ofrece. El mortero de cal presenta ventajas respecto al de cemento Portland y sus derivados, al permitir la “transpiración” de la piedra a la que está unido y por su composición, inhibe la formación de sustancias inestables y dañinas en las

¹ Max Hasak (1856-1934), Berlín.

obras de construcción.² Pero también se han encontrado problemas comunes en el manejo, aplicación y las características que presentan.

Hoy en día existe una gran variedad de empresas que se dedican a la investigación, desarrollo, fabricación y comercialización de aditivos químicos, que brindan al mortero características especiales, sin embargo no todos estos materiales son compatibles con inmuebles edificados con materiales tradicionales. Una de las alternativas exploradas para su mejora es el uso de aditivos naturales.

Desafortunadamente, el abandono en el uso de técnicas tradicionales de morteros de cal, trajo consigo el desconocimiento de la fabricación tradicional, lo que hace difícil reproducir la calidad que en otros tiempos el producto había alcanzado. El renovado interés hacia el estudio de estos materiales ha permitido el estudio de sus propiedades y con ello identificar los aditivos adecuados en función de su utilización.

Para entender el comportamiento de los morteros, se identifican primero los materiales: se define como mortero a la mezcla formada por un conglomerante, agua, arena y materiales complementarios.³ Los materiales complementarios pueden ser aditivos, en términos generales la definición del término aditivo se entiende como la sustancia que se agrega a otras con la finalidad de proporcionarles cualidades de las que carecen o para mejorar las cualidades que ya tienen,⁴ estos pueden ser de origen orgánico, inorgánico, sintético o mineral y tienen la función de alterar las cualidades de las argamasas.

El uso de los aditivos destinados a las mezclas de cal para remplazar morteros deteriorados en las acciones de conservación o restauración, pretende mejorar las propiedades de estos en función de las necesidades del tratamiento a aplicar.

² Anna Arizzi, *Design of ready-to-use rendering mortars for use in restoration work*, tesis doctoral, Granada, Universidad de Granada, 2012, p. viii.

³ Fernando García Salinero, *Léxico de alarifes de los siglos de oro*, Madrid, Real Academia Española, 1968, p. 160.

⁴ Claudia García Solís y Yareli Jáidar Benavides, "El uso de aditivos orgánicos en mezclas de morteros de cal en el área maya" en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia, propiedades y usos*, México, UNAM/Instituto de Investigaciones Antropológicas/ANFACAL, 2013, p. 115.

El objeto de estudio de esta investigación es identificar el efecto de la adición de materiales orgánicos e inorgánicos sobre los morteros elaborados con cal en edificios citados en la literatura histórica, para la propuesta de morteros de restauración, con el conocimiento actual de las propiedades de los mismos.

Para el desarrollo de la investigación se tienen la tesis de que de manera empírica, los albañiles del pasado emplearon morteros de cal con diversos aditivos para la manufactura de inmuebles. Dichos materiales y técnicas se perdieron por la utilización de materiales contemporáneos, pero su uso proporciona a las argamasas las propiedades y características adecuadas para su aplicación en los diversos procesos de restauración y conservación. Actualmente es posible identificar las cualidades que presentan, para con ello proponer métodos generales de intervención que garanticen la compatibilidad entre el mortero de restauración y el material pétreo del edificio.

OBJETIVOS

Refiriéndose a la necesidad de identificar las cualidades de los materiales, Ignacio Garate Rojas asevera que conviene aclarar las alternativas que tienen los aditivos orgánicos en los morteros, sus ventajas e inconvenientes en su comportamiento, e investigar las propiedades y garantías para elegir los más idóneos.⁵ El objetivo de esta investigación es identificar los aditivos orgánicos e inorgánicos más eficaces de acuerdo a su uso y función en el proceso de restauración, con el conocimiento del comportamiento de los materiales adicionados a morteros de cal, mediante el estudio de las propiedades físicas y las cualidades que otorgan al mortero.

Para cumplir con el objetivo general, se deben plantear una serie de etapas intermedias, en razón de lo anterior se establecen los siguientes objetivos particulares:

⁵ Ignacio Gárate Rojas, *Artes de la cal*, Madrid, Instituto Español de Arquitectura, 2002, p. 147.

- I. Identificar el uso y la función de los morteros de cal utilizados a lo largo de la historia, y con ello promover el registro y recuperación de técnicas tradicionales empleadas en el manejo de morteros de cal y aditivos.
- II. Reproducir una serie de morteros, basados en descripciones históricas, susceptibles a ser utilizados en técnicas de intervención, para comprobar cómo afecta físicamente su comportamiento el uso de aditivos orgánicos e inorgánicos.
- III. Proponer líneas guía para la preparación de morteros de cal, aplicados para técnicas de intervención con adiciones y aditivos, diseñadas para cada caso en particular y con conocimiento sobre sus prestaciones.

Una vez planteados los objetivos del proyecto, surgen una serie de cuestionamientos que dan origen a la investigación, en primer lugar se requiere saber: ¿Cuáles eran los aditivos utilizados de manera común en los morteros de cal en la construcción de edificios que hoy son patrimonio cultural y qué cualidades presentaban, de acuerdo a lo indicado en la literatura histórica?, como posible respuesta, se tiene que a lo largo de la historia se utilizaron aditivos orgánicos e inorgánicos en los morteros de cal para la edificación de inmuebles de forma empírica, de acuerdo a la disponibilidad del material y a la cultura constructiva local.

Estos aditivos proporcionan al mortero determinadas características de acuerdo a su función, pero pocas veces se tenía ese conocimiento, como segunda pregunta se tiene: ¿Qué cambios físicos otorgaban los aditivos a los morteros elaborados con cal?, se plantea que a pesar de no realizar los análisis correspondientes, la adición de materiales orgánicos e inorgánicos, proporcionan a los morteros mayor resistencia, otorgan propiedades plastificantes, retracción lenta, fácil trabajabilidad y adherencia.

Finalmente, una vez realizados los experimentos correspondientes surge la duda de: ¿Qué morteros son compatibles para ser utilizados en las técnicas actuales de restauración en inmuebles considerados como Monumentos históricos? Esta pregunta será respondida a través de las observaciones de las muestras realizadas en laboratorio, al ampliar el conocimiento del efecto de la adición de aditivos a morteros

de cal y es posible seleccionar los morteros más eficaces y menos degradables para ser utilizados en intervenciones actuales.

Como se observa, se pretende estudiar el uso de los morteros de cal en las prácticas de restauración, con el objetivo de que se utilicen los morteros adecuados, respondiendo a una función determinada, enfocada a las propiedades que otorgan los aditivos en los morteros de cal.

Para proponer los morteros a estudiar, se seleccionan los materiales más comúnmente utilizados y en base a ellos se determinarán las características que poseen y los beneficios que otorgan, estas unidades de análisis son los morteros de cal con diversos materiales, entre los aditivos orgánicos se tienen; sangre, leche, huevo, mucilago de nopal, manteca de cerdo, fécula de maíz, pelo de cabra, plumas, lana, algodón y miel; mientras que los aditivos inorgánicos serán materiales pétreos como: polvo de cantera, ceniza volcánica, polvo de ladrillo y arcilla.

ESTADO DEL ARTE

El efecto de los aditivos y adiciones sobre los morteros de cal, es analizado desde diversos campos de investigación como son: la arquitectura, ingeniería civil, química, física, historia del arte, etc. En este apartado se muestra un panorama de cómo ha sido abordado el tema de morteros de cal en sus diferentes enfoques, así como los métodos aplicados para su estudio.

En la actualidad la preocupación por la conservación y restauración del patrimonio ha ido en aumento, los profesionales prestan especial atención hacia los materiales, métodos y criterios de intervención. El creciente interés en los morteros de cal para la reparación de estructuras históricas ha dado lugar a numerosos proyectos de investigación, centrándose principalmente en las características de los morteros en relación con sus componentes, aditivos y diferentes proporciones de mezcla. Sólo en

raras ocasiones se han considerado los parámetros de procesamiento, a pesar de que tienen una influencia significativa en la calidad final de los morteros.⁶

El interés por el estudio sistemático de morteros antiguos es relativamente nuevo. En 1981 una primera tentativa se levanta (favorecida por el ICCROM⁷) para establecer una estrategia de investigación de morteros antiguos, así como de morteros para la restauración. En España también se ha manifestado el interés por más de una década. Los diferentes grupos de investigación de CSIC,⁸ junto con otros investigadores de las universidades españolas están trabajando en algunos proyectos de funcionamiento. Los estudios sobre los morteros antiguos han sido principalmente centrados en la caracterización e identificación de sus componentes (punto de vista cuantitativo) en el orden de su época.⁹

La mayoría de los estudios existentes referente al tema de morteros antiguos, se basan en morteros utilizados en países europeos, sin embargo se tiene conocimiento de que el pensamiento y arte hispánico, es heredero cultural del romano y de influencia islámica, tal es el caso de Francisco Javier Alejandro, que en su obra *Historia, Caracterización y Restauración de morteros*, hace una reseña histórica de los morteros, desde los orígenes neolíticos hasta los constructores bizantinos del siglo III al XII, en las civilizaciones de Europa, Asia y África, estudia los materiales, tipos y usos de morteros.¹⁰

En el primer capítulo de su libro hace un estudio de la evolución de los morteros a lo largo de la historia, desde los orígenes neolíticos de la cal, la manipulación del yeso y el comienzo de las primeras adiciones, hasta llegar a los morteros modernos. Establece que en los primeros morteros, las funciones básicas de los materiales que

⁶ Kerstin Elert, et al., "Lime mortars for the conservation of historic buildings" en *Studies in Conservation*, Vol. 47, Núm. 1, 2002, pp. 62-75.

⁷ Centro Internacional de Estudios y Restauración de Bienes Culturales.

⁸ Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España)

⁹ A. Palomo, et. al., *Los Morteros Históricos: La caracterización y durabilidad de las nuevas tendencias para la investigación*, Madrid, CSIC, 2008.

¹⁰ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *Historia, caracterización y restauración de morteros*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2002.

los componen no estaban bien delimitadas, por lo que se desarrollaban con una gran variedad de materias, con mayor o menor grado de aptitud.

El segundo capítulo, plantea la metodología para la restauración de morteros antiguos, donde establece las siguientes etapas; descripción del proyecto, observación y valoración, recopilación de información, análisis de la situación y diagnóstico, proyecto de intervención, intervención y mantenimiento. En el capítulo tres presenta las etapas para la caracterización de morteros históricos, la interpretación de los resultados y habla de un caso práctico en la comarca de los Alcores (Sevilla). Finalmente el último capítulo lo destina a las consideraciones generales en la sustitución de morteros, control de calidad y su conservación.

Uno de los mayores representantes en el estudio de aditivos históricos es Lauren B. Sickels, la cual realiza una serie de estudios referente a los periodos en los que se utilizaron los aditivos orgánicos,¹¹ marca pautas para la selección de los morteros para los proyectos de conservación, así como uso de la cal durante los siglos XIX y XX, y sostiene la teoría de que es el material adecuado para la industria de la construcción.¹²

Mariano González Cortina estudia las propiedades que tienen los morteros realizados con cal durante la época de los romanos, pretende desarrollar los morteros con propiedades hidráulicas, realiza distintos tipos de morteros de cal con diversas dosificaciones y aditivos.¹³ Referente al tema de la hidraulicidad y la compatibilidad con los conglomerantes históricos, Alberto Sepulcre Aguilar en su tesis favorece el diseño de morteros de restauración mediante el empleo de cal con adiciones hidráulicas, puzolánicas y tixotrópicas, además de estudiar la relación con las cales

¹¹ Lauren B. Sickels, "Organic aditives in mortars" en *B.A.R.*, Vol. 1, 1981, p. 15.

¹² Lauren B. Sickels y Philip D. Allsopp, "Lime and its place in the 21st century: combining tradition, innovation, and science in building preservation" en *International Building Lime Symposium 2005*, marzo, 2005.

¹³ Mariano González Cortina, *Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales*, tesis doctoral, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.

naturales, fabrica varias series de morteros de cal aérea, en las que estudia las propiedades físicas y mecánicas mediante técnicas modernas.¹⁴

Con la finalidad de identificar la composición de los morteros, se realizan diversos estudios de caracterización que se centran en el análisis de morteros presentes en edificios reconocidos como Patrimonio Cultural, con los datos obtenidos es posible deducir el tipo de mortero más adecuado para sustituir en el monumento histórico. M. P. Luxhn y F. Dorrego,¹⁵ Luxhn, F. Dorrego y A. Laborde,¹⁶ J. Igea,¹⁷ y Guido Biscontin.¹⁸ El objetivo de estos estudios es suministrar el conocimiento científico con el fin de identificar los materiales de construcción propias de las fases históricas, aplicaciones y evaluar el comportamiento de los materiales en las condiciones ambientales del lugar.

Para los problemas de conservación de las fortificaciones en Brasil, María Isabel Kanan¹⁹ traza una metodología para el uso de la cal en obras de conservación y restauración, ofrece una síntesis de los métodos de producción y las principales características de los componentes de argamasas elaboradas a partir de cal y orienta sobre el uso de la cal en obras de conservación.

El conocimiento de los aditivos y sus diversas formas de aplicación permite estudiar su eficiencia al momento de aplicarlos en el edificio histórico, para ello varios autores

¹⁴ Alberto Sepulcre Aguilar, *Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico*, tesis doctoral, Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 2005.

¹⁵ M.P. Luxhn, y F. Dorrego, "Ancient XVI Century mortar from The Dominic Republic: Its characteristics, microstructure and additives" en *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, Núm. 6, 1996, pp. 841-849.

¹⁶ M.P. Luxhn, F. Dorrego y A. Laborde, "Ancient gypsum mortars from St. Engracia (Zaragoza, Spain): Characterization, identification of additives and treatments" en *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, Núm. 8, 1995, pp. 1755-1765.

¹⁷ Igea, J., et al., "Caracterización de morteros mudéjares de la iglesia de San Gil Abad (Zaragoza, España): investigación de la tecnología de fabricación de morteros históricos de yeso" en *Materiales de Construcción*, Vol. 62, Núm. 308, 2012, pp. 515-529.

¹⁸ Guido Biscontin, Marta Pellizon Birelli y Elisabetta Zendri, "Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars" en *Journal of cultural Heritage*, Núm. 3, 2002, pp. 31-37.

¹⁹ María Isabel Kanan, "Argamasas de cal en las fortificaciones" en *Apuntes*, Vol. 19, Núm. 1, 2006, pp. 8-21.

estudian los aditivos presentes en los morteros, John J. Hughes,²⁰ Aida Liliana Barbosa,²¹ Guofeng Wei,²² Ç. Tekin y S. Kurugöl,²³ y Ur Ivan Hernández Toledo,²⁴ explican que el diseño eficaz de un mortero depende de un claro conocimiento de su composición. Cada tipo de mortero debe cumplir con requisitos específicos que le permitan realizar su función, dependiendo de la exposición al medio ambiente y su papel en el elemento de mampostería, las propiedades del mortero se pueden ajustar variando sus ingredientes y proporciones para cumplir con determinados requisitos técnicos, así como la disponibilidad del material donde se realiza el mortero.

A su vez Juan Carlos Ochoa Botero²⁵ y P. Giraldez,²⁶ seleccionaron algunos aditivos en base a sus propiedades y su uso, entre ellos, opuntia, proteínas y ácidos grasos. Los morteros de cal se midieron con pruebas de resistencia a la compresión, resistencia al agua, la velocidad de carbonatación, porosidad, textura y composición mineral. Proponen morteros de cal nuevos que aumentan las propiedades mecánicas y de resistencia al agua, y resultan ser compatibles con los materiales de construcción tradicionales.

En nuestro país, se han desarrollado diversas investigaciones para la conservación de materiales históricos. Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso recopilan una serie de estudios donde analizan el uso de la cal en zonas arqueológicas, los sistemas

²⁰ John J. Hughes, "The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars" en *Rilem Technical Committee*, UK, 2012.

²¹ Aida Liliana Barbosa, et al., "Caracterización fisicoquímica de un biomaterial marino con fines de restauración de bienes culturales" en: *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, Vol. 35, Núm. 136, 2011, pp. 303-314.

²² Guofeng Wei, et al., "An experimental study on application of sticky rice-lime mortar in conservation of the stone tower in the Xiangji Temple" on: *Construction and Building Materials*, no 28, 2012, pp 624-632.

²³ Ç. Tekin, y S. Kurugöl, "Çeşitli organik katkıların kirecin karbonizasyonu üzerindeki etkisi" (Turkish) on *Journal Of The Faculty Of Engineering & Architecture Of Gazi University*, Vol. 27, Núm. 4, 2012, pp. 717-728.

²⁴ Ur Iván Hernández Toledo, et al., "Cenizas de coco y hojas de pino para su uso como puzolana" en *Naturaleza y Desarrollo*, Vol. 2, Núm. 7, 2009, pp. 33-44.

²⁵ Juan Carlos Ochoa Botero, *Uso de licor de plantas agaváceas como aditivo en morteros y hormigones*, Tesis Doctoral, Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.

²⁶ P. Giraldez, et al., "Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics" en: *Construction and Building Materials*, Vol. 8, Núm. 25, 2011, p. 3313.

constructivos, los agregados y aditivos, y sobre cómo ha sido el uso de este material en la conservación del patrimonio.²⁷

Durante el periodo prehispánico se reporta el conocimiento de la utilización de diversos aditivos, en específico de la utilización de especies de árboles que proveen sustancias glutinosas. Claudia García Solís y Yareli Jáidar Benavides estudian los aditivos utilizados por los habitantes de ciudades prehispánicas mayas y en base a su investigación, realizan un estudio de las características de cuatro especies de árboles: el *chakaj*, el *chukum*, *pixoy* y *jolol*. Comprueban por medio de la experimentación y de la práctica de la conservación que las mezclas de estos extractos con el mortero son eficientes, tanto antes como después del fraguado.²⁸

La Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía “Manuel del Castillo Negrete”, como parte de su programa académico, ofrece el Seminario-Taller de Conservación y Restauración (Fig. 1 y 2), donde han realizado estudios de los métodos de extracción de mucílago y goma de nopal, con el objetivo de emplearlo como aditivo en morteros, como consolidantes y fijativos. Los resultados obtenidos indican que su uso mejora la plasticidad y propiedades de fraguado en morteros de cal, además de las ventajas que presenta su obtención.²⁹

²⁷ Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *op. cit.*

²⁸ Claudia García Solís y Yareli Jáidar Benavides, “El uso de aditivos orgánicos en mezclas de morteros de cal en el área maya” en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia..., op. cit.*, p. 115.

²⁹ Nora A. Pérez, Denise Charua y Sarahy Fernández, “Extracción y purificación del mucilago de nopal para su uso en conservación” en *Estudios Sobre Conservación, Restauración y Museología*, Vol. 2, pp. 156-165.



Figura 1. Trabajos de los alumnos de la ENCRyM, donde utilizan el nopal como aditivo en mortero de cal. (Foto: MGDC, 2014)



Figura 2. Maqueta de ensayo con la utilización de materiales tradicionales. (Foto: MGDC, 2014)

En Campeche, el Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) desarrolla una línea de investigación, sobre la degradación de bienes tangibles de interés histórico, referente al estudio de los morteros de cal para ser usados en los trabajos de restauración, en diversas escuelas dedicadas a la investigación se han hecho estudios referentes al tema.

Wilfrido Martínez Molina elabora morteros con mucilago de cactáceas, debido a que son utilizados actualmente en la ciudad de Morelia para recubrir los muros de los monumentos, el material presenta buenas características mecánicas.³⁰ En otro estudio se realiza una evaluación de la sangre como aditivo.³¹ Yareli Jáidar Benavides en su tesis, caracteriza cuatro extractos vegetales provenientes de árboles locales, que fueron utilizados para incrementar las propiedades fisicoquímicas de los morteros de cal y estudia mucilago de nopal como aditivo.³²

³⁰ Wilfrido Martínez Molina, et al., “Las adiciones de cactus opuntia blanco y su efectos sobre los morteros de albañilería elaborados con cal” en *Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*, Santiago de Chile, Chile, 2010.

³¹ Wilfrido Martínez Molina, et al., “Adición de sangre producto del sacrificio de ganado bovino en morteros antiguos de albañilería elaborados con cal; su efecto en la resistencia mecánica” en *Ciencia Nicolaita*, Núm. 46, 2007, pp. 135-146.

³² Yareli Jáidar Benavides, *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*, Tesis de licenciatura, México, ENCRyM, 2006.

Alberto Bedolla Arroyo³³ explica las ventajas de usar los morteros de base cal para la preservación de las edificaciones, usando en estos, materiales orgánicos que provocan cambios en las propiedades mecánicas y su durabilidad, hacen un recorrido histórico acerca de los aditivos empleados más comúnmente, y la función que desempeñaban estos como complementos en los morteros. Aurelio Álvarez Pérez³⁴, estudian el tapial y los morteros de Cal en Tiripitío, tomando como referencia los morteros prehispánicos en los que se utilizaban aditivos orgánicos en las mezclas.

Como se observa, son diversos los estudios que se tienen sobre la historia del uso de morteros, las propiedades que los aditivos otorgan a los morteros de cal, los métodos para su estudio y caracterización. Las características del mortero no solo dependen de los materiales que lo componen, sino también de las técnicas utilizadas durante el proceso de preparación, la aplicación en obra y las condiciones en las que se presenta.

Por lo anterior se acentúa la necesidad de fijar criterios de intervención con características y proporciones establecidas, para que los profesionales dedicados a la conservación del patrimonio cultural edificado, recurran al uso de técnicas adecuadas que proporcionen beneficios a los inmuebles intervenidos, en específico el estudio va enfocado para su uso en la intervención de inmuebles edificados con materiales de origen pétreo.

MARCO DE REFERENCIA

El uso de los materiales en la arquitectura tienen su origen en el lugar donde se emplaza, antiguamente se recurrió al uso de materiales locales, ya que son accesibles y de fácil manejo, a partir de esta tradición, el conocimiento constructivo se da a través de la transmisión de conocimientos populares, transferidos oralmente por medio de varias generaciones. En el caso de Morelia, al estar sobre un banco de ingnimbrita, la mayoría de sus construcciones se realizan de este material.

³³ Juan Alberto Bedolla Arroyo, et al., "Aditivos orgánicos en morteros de cal apagada en la edificación histórica" en *Ciencia Nicolaita*, Núm. 51, 2009, pp. 153-166.

³⁴ Aurelio Álvarez Pérez, et al., "El tapial y los morteros de Cal en las construcciones históricas de Tiripitío (Morelia, México)" en *Macla*, Núm. 11, 2009, pp. 23-24.

Explica Luis Fernando Guerrero que una cultura constructiva tradicional consiste en “la manifestación de respuestas lógicas a necesidades locales, así como a las condicionantes y recursos que ofrece el medio natural.”³⁵ Cada sitio desarrolla un sistema constructivo propio, en el cual refleja como habita su mundo y la forma de percibir su territorio, cuando el modo de vida que sustente el sistema constructivo tradicional desaparece, es inevitable la desaparición de este.

Un sistema constructivo puede definirse según J. Monjo Carrió, como “el conjunto de elementos y unidades de un edificio que forman una organización funcional con una misión constructiva común”.³⁶ A su vez Sepulcre Aguilar lo define como “un conjunto de macropiezas elementales (unidades pétreas) entre las que se dispone un material más o menos continuo (mortero), con distintas funciones según los casos.”³⁷

El mortero de manera más específica se establece como “una mezcla homogénea de un material cementante, un material de relleno, agua y en algunas ocasiones aditivos”³⁸ con la finalidad de mejorar sus propiedades. Sepulcre Aguilar de manera más amplia desarrolla el término y lo define como:

Material artificial compuesto, hecho de mezcla de un producto conglomerante, un esqueleto rocoso más o menos inerte y en ocasiones una serie de aditivos para mejorar las propiedades finales del conjunto. Todo ello unido al uso del agua, bien sea para facilitar el amasado, compactado y modelado del mortero, o bien para que, al combinarse químicamente con el conglomerante, desencadene las reacciones de fraguado correspondientes.³⁹

³⁵ Luis Fernando Guerrero Baca, “Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva” en *Apuntes*, Vol. 20, Núm. 2, 2007, pp. 182-201.

³⁶ J. Monjo Carrió, “La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización” en *Informes de la Construcción*, Vol. 5, Núm. 800, España, 2005.

³⁷ Alberto Sepulcre Aguilar, *op. cit.*, p. 3.

³⁸ Libia Gutiérrez de López, *El concreto y otros materiales para la construcción*, Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 2003, p. 115.

³⁹ Alberto Sepulcre Aguilar, *op. cit.*, p. 14.

Los morteros son materiales que han sido utilizados desde tiempos remotos con una doble función; de revestimientos y como materiales de unión. Rodrigo Salamanca Correa⁴⁰ clasifica los morteros de acuerdo a su función en:

- 1) Estéticos, cuando son destinados a dar un acabado al muro, de color, textura, etc.
- 2) Estructurales, para unir las unidades de mampostería o proporcionar refuerzo en las juntas.

De acuerdo a los materiales con los que están compuestos Libia Gutiérrez de López⁴¹ los clasifica en: calcáreos, morteros de yeso, morteros de cal y cemento, y morteros de cemento. En este caso, se presta especial atención a los morteros calcáreos. Primeramente se entiende que “la cal es un material derivado de la piedra caliza.”⁴² Este material fue el principal elemento de unión empleado para la formación de morteros, revestimientos y pinturas en general durante un largo periodo de la historia. La cal es un elemento blanco en estado puro y proviene de la calcinación de la piedra caliza.⁴³

Se puede establecer por lo tanto, que un mortero de cal es una mezcla de un conglomerante calcáreo, el material de relleno, la arena, la presencia de agua y en ocasiones aditivos, los cuales, tanto antiguos como actuales, tienen la función de mejorar determinadas propiedades en el mortero.

En el texto se ha utilizado continuamente el término de “mortero de restauración” por lo que se pretende establecer las el concepto que se tendrá para los fines de la presente investigación. El término restauración es definido en La Carta de Venecia como:

La restauración es una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y

⁴⁰ Rodrigo Salamanca Correa, “La tecnología de los morteros” en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Núm. 11, Bogotá, 2001, pp. 43.

⁴¹ Libia Gutiérrez de López, *op. cit.*, pp. 115-119.

⁴² Wilfrido Martínez Molina, *et al.*, “Las adiciones de cactus...”, *op. cit.*

⁴³ Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A.C., 2007.

se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos. Su límite está allí donde comienza la hipótesis: en el plano de las reconstituciones basadas en conjeturas, todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento.⁴⁴

Tomando en cuenta esta definición, se entiende que el termino restauración pretende mantener el aspecto inicial del edificio antes de sufrir un daño, Ma. del Sagrario Martínez, expresa que “el termino restauración supone admitir que lo restaurado adquiere un aspecto similar al original, previo al menoscabado sufrido,”⁴⁵ por lo que un mortero de restauración tiene varias funciones en el ámbito de la restauración, como lo es; consolidar, rellenar o funcionar como revestimiento. Por lo que en este caso se pretende destinar los morteros para obras de restauración, y para el desarrollo de la propuesta se establece una metodología.

MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de la presente investigación, de manera general, se pretende definir una metodología mixta, como lo menciona Héctor Maletta, se pueden combinar métodos o técnicas cualitativas y cualitativas.⁴⁶ Es decir, la tesis se divide en dos apartados generales; un estudio histórico y posteriormente un trabajo experimental y práctico.

En base a los lineamientos que establece Juan Samaja y que son retomados por Héctor Maletta, se plantea un proceso compuesto por instancias, fases y momentos. La primera instancia se refiere a la validación conceptual, donde en la primera fase se identificó el problema, es decir, la falta de técnicas de investigación unificadas para la

⁴⁴ Carta de Venecia, 1964.

⁴⁵ Ma. del Sagrario Martínez Ramírez, *Desarrollo de nuevos morteros de reparación resistentes al ataque biológico. Empleo de sepiolita como material soporte de los biocidas*, Tesis Doctoral, Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 1995.

⁴⁶ Héctor Maletta, *Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica*, Lima, CIES-CEPES-Universidad del Pacífico, 2009, p. 161.

intervención de edificios antiguos, a partir de este estudio fue posible la formulación de hipótesis y un diseño previo de estrategias que permitan abordar el problema.

La segunda instancia es la validación empírica, donde de manera general se diseña la investigación, se identifican las unidades de análisis y además se realiza el diseño de procedimientos, donde se establece el diseño del muestreo, plan y tratamiento de análisis, plan de actividades y el diseño de los instrumentos para la recolección de datos.

En la instancia de validación operativa, se refiere a la ejecución de la investigación, que en este caso se realizan las reproducción de morteros en laboratorio para realizar las pruebas correspondientes, que permitan la obtención de datos válidos para ser tabulados y graficados, lo que permitirá su posterior análisis y discusión. Los datos serán analizados y discutidos ampliamente, lo que permitirá corroborar o refutar las hipótesis planteadas en la primera instancia y establecer conclusiones.

Finalmente y como última instancia se recurre a la validación expositiva, donde se presentan los informes parciales, el balance de actividades y el ordenamiento de resultados. Como última fase del proceso se realizan las correcciones correspondientes al trabajo y se desarrollan las argumentaciones para ser presentadas las conclusiones finales.

Este proceso aunque se plantea de una manera lineal, tiene variantes, debido a que la investigación avanza de manera que las fases pueden superponerse a medida que se obtienen avances precisos (Fig. 3). Lo anterior se resume en la siguiente gráfica:

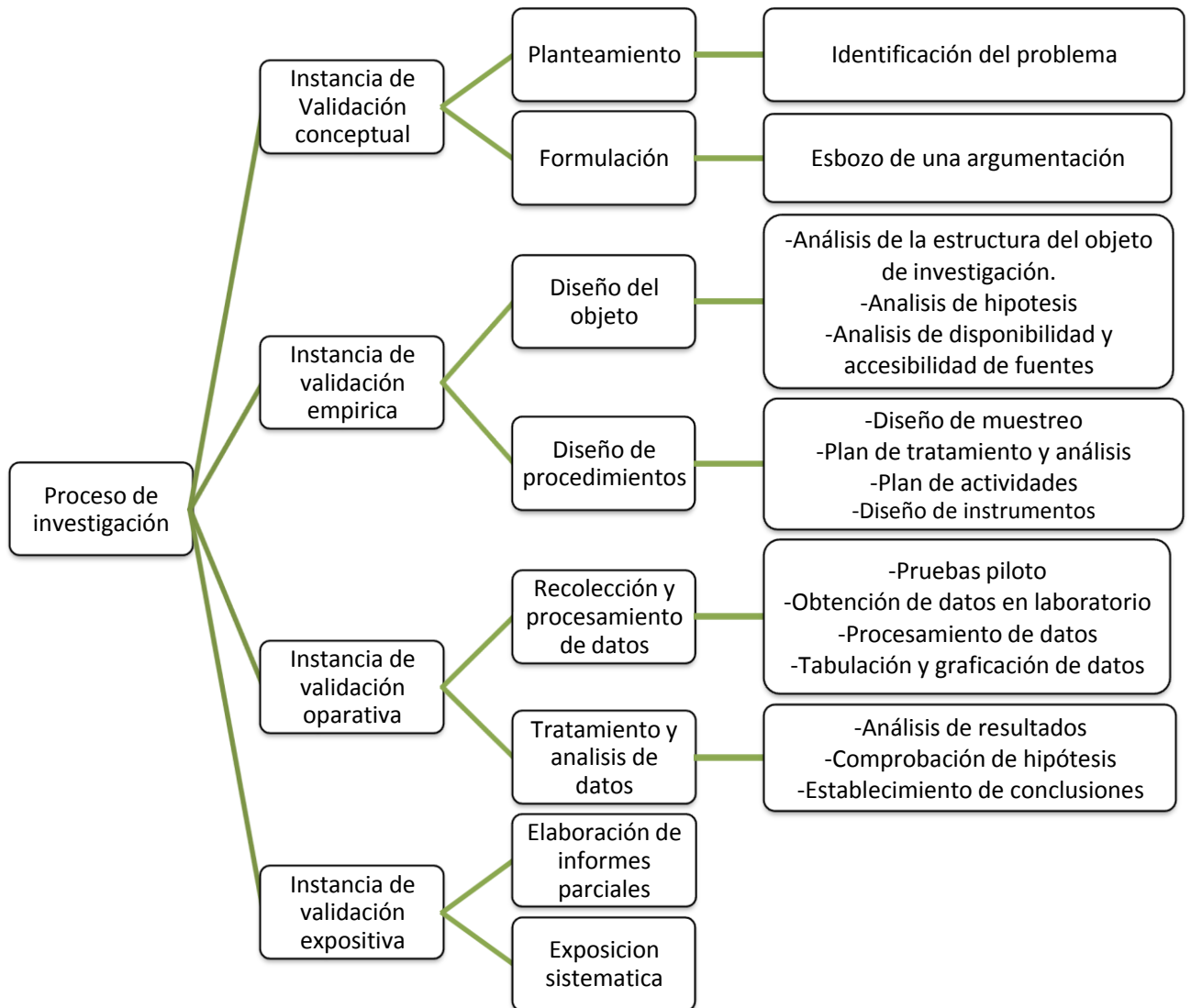


Figura 3. Proceso de investigación en base a los lineamientos planteados en; *Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica* de Hector Maletta.

En base al procedimiento ya establecido, se plantea dividir la tesis en dos apartados generales y estos a su vez en capítulos. El primer apartado de la tesis, describe el sustento teórico de la investigación, mismo que se basa en una recopilación bibliográfica. La investigación se apoya en el análisis de diferentes textos publicados sobre las experiencias llevadas a cabo en diversas construcciones. En este apartado se pretende identificar los materiales utilizados en la construcción como aditivos para

morteros, y una vez identificados rescatar las técnicas empleadas para su posterior uso en técnicas de intervención.

Esta parte se centrará en la revisión bibliográfica, con la finalidad de identificar la presencia de las sustancias naturales en los morteros a lo largo de la historia, los aspectos que influyeron en su utilización y que criterios son los adecuados para utilizarlos, prestando especial atención a sus características y técnicas de aplicación. Debido a que el uso de aditivos en los morteros se inició de forma empírica, se considera necesario realizar una investigación que acerque a los materiales y su utilización en la edificación, para identificar la tradición constructiva.

El apartado se divide en dos capítulos, el primero será destinado al estudio de los materiales de los morteros, como es el caso de conglomerantes (orgánicos e inorgánicos), áridos, solventes y sus dosificaciones, y un estudio específico sobre la evolución histórica de los morteros y la propiedades de la cal, además de ampliar el estudio histórico de las dosificaciones apropiadas. El segundo capítulo se dedicará a las propiedades que brindan los aditivos a los morteros, además de realizar un estudio histórico que muestre de manera general como se han utilizado los aditivos y adiciones en los morteros a través del tiempo y las técnicas constructivas que se utilizaron. A partir de la información obtenida, se delimitan los materiales que serán estudiados.

Se pretende realizar una reseña histórica, donde se indica el origen y desarrollo de aditivos en los morteros de cal a lo largo de la historia desde sus orígenes prehispánicos hasta el uso que tuvo en la ciudad de Morelia durante la etapa virreinal donde se indique las características intrínsecas que contribuyeron a su utilización, el proceso de extracción del material y su uso en los inmuebles de interés histórico, con el objetivo de conocer a manera local los materiales que se usaron, y como ha influido la experiencia en los proceso de construcción y restauración.

Se tienen como fuente principal el Archivo General de la Nación, Archivo General de Indias, libros, tratados, revistas científicas y tesis, para la revisión y clasificación de la información se recurre al apoyo que proporcionan las fichas bibliográficas, fichas de

resumen y base de datos electrónicos. Con ello se logra un proceso completo de revisión de los diferentes morteros usados desde la época colonial hasta nuestros días, destacando las tipologías, características, técnicas de aplicación y usos.

Esta etapa será destinada a identificar los materiales que serán reproducidos en el laboratorio, para ello se recurre a un diseño de experimentos, que sea eficiente para llevar a cabo las pruebas en los tiempos establecidos. A la par de la investigación bibliográfica, se comienza con el diseño de experimentación y la realización de reproducción de morteros en laboratorio, en base a los morteros utilizados tradicionalmente.

El segundo apartado se refiere al desarrollo experimental, correspondiente a la instancia de validación operativa, con la finalidad de evaluar las propiedades de los morteros con diversos aditivos, en la primera fase se estudian los morteros, materiales y métodos de aplicación. Las pruebas piloto que se realizan son registradas en la bitácora de laboratorio, donde se especifican los datos obtenidos en el proceso de producción, mismos que posteriormente serán organizados para realizar los correspondientes análisis.

En el tercer capítulo se llevarán a cabo una serie pruebas de morteros con diferentes proporciones en condiciones de laboratorio, los ensayos serán sometidos a pruebas físicas y químicas con el objeto de determinar sus propiedades, el proceso de elaboración y la mezcla se hará forma manual así como la preparación de varios tipos de especímenes, con diferentes dosificaciones, para con ello realizar ensayos que simulen los procesos de alteración y degradación, además de estudiar sus propiedades físicas y estéticas.

La realización de los especímenes con los diversos aditivos se efectúa en las mismas condiciones, en el mismo sitio y con los mismos materiales, en tiempos cercanos:

- Se realizan pruebas de calidad al mortero fresco como revenimiento, cohesión, trabajabilidad y sangrado, para la prueba de adherencia se

- Se determina la fluidez o revenimiento del mortero fresco por el método del asentamiento del cono de Abrams.
- De cada mezcla se fabrican cilindros para realizar las pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, porosidad y absorción.
- Se construyen bloques de mortero con dimensiones de 5 cm x 5 cm x 5 cm, con proporciones diversas, los especímenes se construyen en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”

En un último capítulo se reportan los resultados obtenidos en laboratorio, comparando con los resultados encontrados en la literatura histórica, para identificar las composiciones de los morteros compatibles para ser utilizados en restauración. Se compararán los resultados esperados y los resultados observados. En específico en la primera parte del capítulo se hará un estudio de los criterios generales de intervención, en donde se analizarán diversas posturas sobre la reposición de morteros en edificios de interés histórico.

Las propuestas de intervención se realizan por medio del cruce de información obtenida en la instancia de validación empírica y los datos generados en el laboratorio. Los resultados de los estudios obtenidos, serán expuestos a manera de discusión, mediante lo cual será posible la elaboración de conclusiones. En este último capítulo se realiza un análisis de los datos y la propuesta de los métodos adecuados para la intervención de los inmuebles construidos con materiales pétreos, de carácter preventivo, curativo o urgente.

De esta forma, después de una investigación bibliográfica y del análisis de los resultados obtenidos en laboratorio, se llega a la propuesta de técnicas de intervención, con la certeza de que los aditivos orgánicos e inorgánicos proporcionan características y propiedades positivas para ser utilizados en morteros de cal, otorgando una opción para resolver las problemáticas que enfrentan los restauradores en la actualidad.

Los morteros de cal, con una adecuada composición, según su aplicación, por sus propiedades, son los más idóneos para la restauración, pues con ellos se construyeron y se revistieron los edificios que ahora se han de restaurar.⁴⁷

MATERIALES Y MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE MORTEROS ANTIGUOS

Los materiales y las técnicas utilizadas para la elaboración y ejecución de los morteros en la antigüedad, han constituido la base de los empleados hoy en día, teniendo siempre en cuenta una evolución tecnológica, la cual ha permitido la mejora de la calidad de los materiales.⁴⁸ El estudio de las propiedades que ofrecen los materiales al mortero, permitirá avances en la investigación sobre la conservación de bienes considerados como patrimonio.

En este capítulo se exponen las características de los materiales que conforman los morteros, se definen y explican cada una de sus propiedades, su función y la importancia de usar las proporciones adecuadas. Por otra parte se exponen los métodos para prepararlos adecuadamente, y finalmente se explican las propiedades y características que deben tener los morteros para usarse con fines de conservación.

⁴⁷ María Dolores Robador González, “Enoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta” en Francisco Javier Alejandro Sánchez, *et al.* (coord.), *La cal: Investigación, patrimonio y restauración*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2014, p. 191.

⁴⁸ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *Historia, caracterización y restauración de morteros*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2002, p. 10.

LOS MORTEROS EN LA HISTORIA, TIPOLOGÍAS Y USOS

Para entender la evolución del significado de mortero se establece una de las primeras acepciones que tuvo a lo largo de la historia, para ello, Martín Sisí nos dice que “(...) los albañiles de la antigua Roma cuando hablaban del mortero se referían a la gaveta o cuevo en el que amasaban y transportaban la cal y la arena (...)”,⁴⁹ este concepto fue cambiando para referirse ya no solo al recipiente, sino también a la mezcla contenida en él.

Al momento de datar los primeros morteros, uno de los aspectos problemáticos se debe a la invalidez del concepto de mortero en la antigüedad, se puede suponer que las funciones básicas de los materiales que los componían, no estaban bien delimitadas, pudiendo desarrollar una gran variedad de materias, con un mayor o menor grado de aptitud.⁵⁰

El origen de los morteros está ligado al de los conglomerantes, uno de los primeros ejemplos es el mortero de tierra encontrado en la villa neolítica de Çatal Hüyük, en Anatolia (Turquía, 6,600-5650 a.J.C.), rico en cenizas y restos de hueso.⁵¹ Al norte de Chile se encontraron las primeras obras de piedra unidas por conglomerantes hidráulicos procedente de la calcinación de algas. Posteriormente se empiezan a utilizar materiales con una mayor capacidad conglomerante como lo son la cal y el yeso,⁵² los cuales proporcionaron mayor capacidad cementante.

⁴⁹ Martín Sisí, citado por Yareli Jáidar Benavides, *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*, Tesis para obtener el título de licenciada en restauración de bienes muebles, México D.F, ENCRyM, 2006, p.67.

⁵⁰ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *Historia, caracterización y restauración de morteros*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2002, p. 9.

⁵¹ *Ibidem*.

⁵² Oscar Rodríguez-Mora, *op. cit.* p. 8.

Cronológicamente pueden diferenciarse varias etapas en la utilización de distintas clases de mortero para la fabricación de mampostería, Salamanca Correa identifica las primeras construcciones de mampostería elaboradas con piedras y morteros de barro y arcilla.⁵³ Con el descubrimiento de la cal apagada, a partir de la cal viva, los morteros de cal y arena son utilizados en mampostería, estos morteros presentan baja trabajabilidad, pero buena resistencia a la compresión y de fraguado rápido, son ampliamente usados hasta la aparición del cemento Portland.

Como se mencionó anteriormente, una de las culturas más antiguas del Neolítico, Çatal Hüyük, utilizó mortero para la construcción de las paredes, con tierra, cenizas y restos de huesos, este tipo de materiales arcillosos funcionaban como conglomerantes y otorgaban gran trabajabilidad, y por ser materiales abundantes en la naturaleza fueron los primeros en ser utilizados por el hombre.⁵⁴

Otra cultura antigua es Jericó, en ella se encuentra uno de los primeros usos de los morteros de cal en la denominada Máscara de Jericó (Fig. 4), una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido, además del uso de los morteros para la ejecución de los pavimentos, ya que además de encontrarlas en Jericó, se han encontrado en Nevali Çori (Turquia, 10000 al 8000 a.J.C.), en Yuftah El (Galilea, 7000 a.J.C.) y en otras excavaciones situadas en el Mediterráneo Oriental y en Europa.⁵⁵

A pesar de no tener datos precisos sobre la técnica utilizada para la fabricación de la cal, es posible afirmar que desde el neolítico conocían los procesos de calcinación de la piedra caliza y la aplicación de la piedra caliza, gracias a los vestigios encontrados.

⁵³ Rodrigo Salamanca Correa, "La tecnología de los morteros" en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina I*, Núm. 11, Bogotá, 2001, pp. 41-48.

⁵⁴ José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Pérez, y Pedro J. García Casado. "Historia de los morteros" en *Boletín informativo*, Vol. 3, Núm. 13, 1995, pp. 52-59.

⁵⁵ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, p. 11.



Figura 4. Máscara de Jericó. Fuente: “sobre la cal”, <https://sobrelacal.wordpress.com/>

En el área definida por los ríos Tigris y Eufrates, se desarrolló la construcción basada en la arcilla con un nivel sofisticado, la tradición constructiva mesopotámica se remontan al 4000 a.J.C., en las primeras ciudades sumerias de Caldea. En Mesopotamia existía una gran cantidad de pozos de betún,⁵⁶ material que utilizaron como argamasa, como revestimiento y posteriormente, dadas sus propiedades impermeabilizantes, también se hicieron capas aisladoras a base de lechos de juncos o cañas impregnadas de betún, representados en los Jardines Colgantes de Babilonia.⁵⁷ Posteriormente el betún cae en desuso, aunque se desconoce la razón, prefiriéndose argamasas de cal o de tierra.

Las construcciones egipcias estuvieron condicionadas a la geología y a las condiciones climáticas del valle del Nilo, la presencia de piedras y cañas, las cuales entrelazadas y conglomeradas con fango formaban el muro tapial. Posteriormente se introduce la fabricación de ladrillos a partir del fango, para las edificaciones

⁵⁶ El betún es uno de los materiales de construcción más antiguo que existen, este material proviene de los crudos petrolíferos o se obtiene por medio de la destilación de sustancias de origen carbonoso, llegan a ser sustancias de color negro, solidas o viscosas. En México es comúnmente conocido como asfalto, bitumen o chapopote.

⁵⁷ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.* p. II.

domésticas y funerarias.⁵⁸ Estos materiales fueron cambiados por la piedra caliza, afirma Garate que los egipcios fueron los primeros en utilizar la escayola⁵⁹ para unir los bloques de la pirámide de Keops. Se puede afirmar que los egipcios lograron el mayor conocimiento de la técnica para la preparación y la aplicación del yeso.

En Egipto los yesos se utilizaban en función de su aplicación, Álvarez Galindo⁶⁰ los identifica como: yesos de colocación, utilizado como lubricante para facilitar la colocación de grandes bloques de piedra, en dichos yesos se detecta la presencia de carbonatos y trazas orgánicas; yesos de acabados, utilizados para tapar las irregularidades de la superficie; y por último yesos de colocación, empleados como enlucidos. La presencia del yeso en los morteros egipcios es notable y es posible descartarla presencia de la cal para la construcción.

El empleo de la cal como material ligante en el mortero, tiene sus orígenes en los griegos y los romanos. La utilización de morteros de cal en Grecia para la construcción se empleó para el revestimiento y construcción de muros. En su mayoría se tiene que los constructores griegos utilizaron los morteros de cal para la realización de revocos coloreados y estucos,⁶¹ además de este aporte, José Ignacio Álvarez Galindo, indica que los griegos aplicaron una técnica denominada pulimentada, que consistía en la trituración de la cal, del carbonato o de la puzolana de mortero, que mejoraba la fuerza y durabilidad del mortero.⁶² Esta técnica sería adoptada posteriormente por los romanos.

El imperio romano conquistó a Grecia a un nivel militar y territorial, y se convirtieron en los herederos directos de la tecnología y de la construcción griega,⁶³ pero a su vez mejoró los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de la puesta en práctica de

⁵⁸ *Ibidem*.

⁵⁹ Sulfato de calcio semihidratado obtenido por cocción del yeso a 120°C.

⁶⁰ José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*

⁶¹ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, p. 11.

⁶² José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*

⁶³ F. Ortega Andrade, *Historia de la Construcción. Libro segundo: Romana y Paleocristiana*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Las Palmas de La Gran Canaria, 1994.

los morteros, explotó las propiedades de este material y expandieron la técnica por todo el imperio.⁶⁴

La cal fue uno de los materiales de construcción asumidos por los romanos, aunque fue utilizada con anterioridad, es posible afirmar que la civilización romana mejoró los procesos de fabricación de la cal y aplicación de los morteros. Más allá del uso de morteros de cal, el gran avance de los romanos fue el descubrimiento del “concreto” es decir, la mezcla de la piedra volcánica, cal y se le añadían áridos gruesos durante la ejecución.⁶⁵ Alejandro Sánchez retoma la clasificación que se tenía en la antigüedad para los morteros utilizados para sus aplicaciones relativos a los paramentos del muro⁶⁶:

- 1) *Opus Signinum*: un pavimento impermeable por 3 o 4 capas de espesor decreciente,
- 2) *Opus Marmóream*; estuco compuesto por cal hidráulica y polvo de mármol, que servía como acabado.
- 3) *Opus Albarium*: se denomina así a la pasta de cal grasa, de gran finura, con la que blanqueaban los muros y sobre la que se pintaban los frescos.

La calidad de los morteros romanos ha pasado a la historia de la construcción, se cree que se obtiene esta calidad debido al uso de materiales de buena selección, a la homogeneidad, la correcta dosificación de las mezclas, la cocción, el apagado de la cal y además al cuidado con el que se aplicaba el mortero una vez preparado.

Posterior al avance tecnológico que los romanos proporcionaron a la construcción, durante la Edad Media se careció de un progreso técnico destacable, los morteros eran en general mediocres, debido a la pérdida de los procedimientos romanos de fabricación de la cal y al descuido en su elaboración, a pesar de ello, la construcción islámica, que partía de materiales sencillos y abundantes como lo son la tierra, la cal y el yeso, fue capaz de crear morteros de gran calidad y durabilidad.⁶⁷

⁶⁴ Ignacio Gárate Rojas, *Artes de la cal*, Madrid, Instituto Español de Arquitectura, 2002, p. 81.

⁶⁵ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, p. 17.

⁶⁶ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, pp. 17-18

⁶⁷ José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*

A partir del siglo XV, en Alemania, se tiene una actividad constructiva alta y se cuenta con la disponibilidad de la piedra caliza. En este periodo el morteros se prepara en un caso o en un marco de madera (Fig. 5), el proceso de apagado o “apagado de la cal seca” se llevaba a cabo con la presencia de polvo de cal y contenedores de agua, la preparación del material estaba a cargo del fabricante del mortero el cual trabajaba para los constructores.⁶⁸



Figura 5. Preparación del mortero de cal en el siglo XVI. Fuente: Cornelia Marinowitz, Claudia Neuwald-Burg, y Matthias Pfeifer, *Historic Documents in Understanding and Evaluation of Historic Lime Mortars*, Vol. 7, Springer Netherlands, 2012, pp. 15-24.

⁶⁸ Cornelia Marinowitz, Claudia Neuwald-Burg, y Matthias Pfeifer, *Historic Documents in Understanding and Evaluation of Historic Lime Mortars*, Vol. 7, Springer Netherlands, 2012, pp. 15-24.

En 1824 Joseph Aspdin, patentó un cemento que afirmaba ser “tan duro como la piedra Portland”,⁶⁹ de ahí se desprende el cemento Portland, producto industrializado que se usó con éxito en varios países y se generalizó su uso en México a partir de 1905 para la construcción y para fines de conservación, en respuesta de la necesidad de un mortero más resistente, durable y adhesivo, con el objetivo de solo realizar una intervención. Con el tiempo fue posible observar deterioros considerables en el material original además de presentar deficiencias al ser expuesto al interperismo.

Con la fabricación del primer cemento Portland (1824), la cal comienza a caer en desuso, el cemento Portland pasa de ser el principal conglomerante de la construcción. El cemento se comienza a producir con medios y criterios industriales (Fig. 6), garantizando cierta homogeneidad y constancia en sus cualidades, lo que suponía una gran ventaja, especialmente en una época en que la fabricación de las cales seguía un proceso artesanal y cuya calidad dependía de la habilidad del calero y de la naturaleza geológica de las canteras de caliza, lo que explica la disminución de la cal como material habitual de la construcción.



Figura 6. Cemento Portland de la Marca Cemex.

Como ya se ha mencionado, los morteros de Cemento Portland presentan múltiples inconvenientes al ser utilizados en los inmuebles construidos con materiales tradicionales, entre los principales inconvenientes se encuentran: la escasa porosidad del muro, especialmente se es de piedra o cerámico, ya que el cemento impide la

⁶⁹ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, p. 95.

transpiración del mismo; como consecuencia de lo anterior tampoco es eficaz para regular la humedad ambiental; la degradación físico-química en el caso de muros pétreos; poseen una alta inercia térmica; falta de elasticidad.⁷⁰

Es hasta la década de los 90's, cuando se entiende que el mortero de cal es un material insustituible para determinados trabajos de intervención en edificios antiguos considerados Patrimonio.⁷¹ Sobre todo si se trata de revestir muros que se han realizado con materiales tradicionales, porque además de su impermeabilidad, facilitan la transpiración del muro y son reguladores de la humedad, eliminando así las condensaciones.

En los últimos años, el renacimiento de la aplicación de morteros de cal para la reparación de edificios, ha sido gracias al reconocimiento de las propiedades desfavorables de los morteros con cemento Portland. Incluyendo la fragilidad y el coeficiente de expansión térmica que puede ser dos veces más grande que la de los morteros de cal y la mayoría de los tipos de ladrillo y piedra. Su baja porosidad, y sobre todo la gran cantidad de poros pequeños, que podrían obstaculizar el movimiento del agua en albañilería y causar daños debido a la acumulación de humedad detrás de capas de cemento o de la evaporación y la deposición de sales en piedras o ladrillos adyacentes.⁷²

Por otra parte, las sales solubles, tales como sulfatos de calcio y sales de sodio pueden estar presentes en mortero de cemento Portland. El mortero de cal, por otro lado, tiene un bajo potencial de eflorescencia debido a su relativamente alta pureza química. Adicionalmente, tiene la ventaja de permitir un movimiento limitado dentro

⁷⁰ José María Calama Rodríguez, "Idoneidad de los morteros de cal para revestimientos en restauración patrimonial", en: Alejandro Sánchez, Francisco Javier et al (Coord.), *La cal: Investigación...* *op. cit.*, p. 124.

⁷¹ Mariano González Cortina, *Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales*, Tesis Toctoral, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2000, p. 9.

⁷² Kirsten Elert, et al., "Lime mortars for the conservation of historic buildings" en *Studies in Conservation*, Vol. 47, Núm. 1, 2002, pp. 62-75.

de las juntas de mortero y puede someterse a la curación autógena debido a la disolución y los procesos de la precipitación.⁷³

D. Carrington y P. Swallow, señalan la importancia de que el mortero de cal sea más suave y más poroso que la piedra, actuando como sustrato de sacrificio, el cual puede ser sustituido cuando su deterioro es considerable.⁷⁴ Los materiales de sacrificio son manufacturados para que tengan propiedades mecánicas menores en comparación con las de los materiales originales, con la finalidad de protegerlos.⁷⁵ Además de lo anterior, la cal es un material impermeable, que evita el paso de agua, mientras que permite el paso del vapor de agua y permite crear un ambiente térmico agradable en las construcciones.

CLASIFICACIÓN

Los morteros utilizados en la edificación son muy diversos, se diferencian de acuerdo a los materiales que los componen, la época a la que pertenecieron, el contexto cultural y la función que cumplieron. En cuanto a la función, los morteros presentan diversos usos, Gutiérrez de López los clasifica como: los que pueden ser usados en la construcción como elementos estructurales, en la mampostería donde se usa de relleno, para unir o como recubrimiento.⁷⁶

Morteros de unión: son aquellos interpuestos entre las piezas pétreas del edificio, deben tener cualidades especiales para absorber esfuerzos de tensión y compresión, entre las funciones que presenta están: absorber las irregularidades de las piezas; servir de medio de transmisión o reparto de tensiones mecánicas entre los elementos

⁷³ S. Wisser, K. Kraus, y D. Knöfel, "Composition and properties of historic lime mortars" en *Proceedings of the VI International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, J. CIABACH, 1988, pp. 484-491.

⁷⁴ D. Carrington y P. Swallow, "Limes and lime mortars", en: *Journal of Architectural Conservation*, Vol. 1, 1996, pp. 7-22.

⁷⁵ Isabel Villaseñor y Renata Schneider, "Principios generales para la elaboración de argamasas", en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *op. cit.*, p. 98.

⁷⁶ Libia Gutiérrez de López, *op. cit.*, p. 119.

pétreos; servir como elemento de unión entre las piezas elementales del muro; y finalmente cumple la función de ahorrar el material pétreo natural.⁷⁷

Morteros de relleno: Se utilizan para llenar celdas de los elementos en la mampostería adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión y compresión. Estos morteros se diferencian a los de unión por las diferentes técnicas constructivas que se utilizan y a los requisitos previos relativos a su comportamiento dentro de la estructura.

En los morteros de unión, el mortero funciona como un agente adhesivo que conecta dos elementos constructivos pétreos diferentes, mientras que en el de relleno, el mortero compone el núcleo de un sistema estructural construido a su alrededor, es decir, actúa como un mortero interno.⁷⁸

Morteros de recubrimiento: ya que su función es de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren de una resistencia determinada, sin embargo sí requieren de plasticidad.

Para la preparación y dosificación de los morteros, se establece la cantidad, en peso o en volumen, de los componentes en la mezcla. La dosificación se indica con dos números, el primero indica las partes del conglomerante y el segundo las partes del agregado.⁷⁹

En la presente investigación se presenta especial atención al estudio de las propiedades de los morteros de relleno y de recubrimiento, ya que son los que presentan mayor deterioro en los inmuebles históricos y por lo tanto requieren ser repuestos para evitar que el daño que causan los agentes naturales se propaguen en el inmueble.

⁷⁷ Alberto Sepulcre Aguilar, Alberto, *op. cit.*, pp. 9-10.

⁷⁸ Antonia Moropoulou, Asterios Bakolas, y Katerina Bisbikou. "Investigation of the Technology of Historic Mortars." en *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, Núm 1, 2000, pp. 45-58.

⁷⁹ Juan David Cañón Bermúdez, *Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*, Tesis de licenciatura, Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 2012, p.5.

Teniendo en cuenta los materiales de los que se conforma la mezcla, el nombre que recibe la mezcla se puede fundamentar de acuerdo al aglomerante utilizado en su preparación, así se encuentran morteros de yeso, morteros de cal, morteros de cemento o morteros mixtos.⁸⁰

Los morteros de yeso se preparan con yeso hidratado con agua, su contenido es variable según el grado de cocción, calidad y finura de molido de yeso, comúnmente se agrega el 50%, para estucos se agrega el 60% y el 70% para moldes. El mortero comienza a fraguar a los cinco minutos y termina más o menos en un cuarto de hora.

Los morteros de cemento, se componen de arena y cemento Portland, estos presentan altas resistencias y las condiciones de trabajabilidad son variables de acuerdo a la proporción del cemento y arena utilizados. Es común mezclarlo en obra, ya que al ser hidráulico debe procurarse que haya el menor tiempo posible entre el amasado y la colocación.

Los morteros mixtos son aquéllos en los que intervienen dos aglomerantes, como por ejemplo, yeso y cal, cemento y cal, etc. Los morteros de cal y cemento se utilizan cuando se busca una gran trabajabilidad, buena retención de agua y alta resistencia, es decir superior a los morteros de cal, pero sin perder las propiedades que ofrece, para ello se sustituye parte del cemento por cal. Mientras más alto es el contenido de cemento, la resistencia será mayor y de poco tiempo entre amasado y colocación, en cambio si el contenido de cal es alto tendrá menor resistencia, será más plástico y permeable, pero tendrá mayor retracción.

PROPIEDADES DE LOS MORTEROS

En general un mortero presenta ciertas propiedades dentro de las cuales se pueden identificar dos etapas diferenciadas por su estado físico, denominadas en estado fresco y en estado endurecido. A continuación se muestra una tabla de la clasificación de las propiedades:

⁸⁰ Libia Gutiérrez de López, *op. cit.*, p. 119.

Estado	Propiedad	Definición
Fresco	Fluidez	La fluidez define la manejabilidad o trabajabilidad del mortero.
	Adherencia	De la adherencia depende que el mortero no se desintegre, afecta la adherencia a los mampuestos y su capacidad de soportarlos sin deformarse antes de endurecer.
	Retención	El agua no se debe perder por evaporación o absorción de los mampuestos. Desaparecería el estado fresco
Endurecido	Resistencia	El mortero debe actuar como elemento de unión resistente compartiendo las sollicitaciones del sistema constructivo del que forma parte
	Retracción	Es una contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento.

Tabla 1. Propiedades de los morteros⁸¹

Las propiedades relativas al estado fresco se relacionan con la puesta en obra e influirán principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Los requisitos derivados, por tanto, responden a las exigencias del constructor y operarios. Mientras que las propiedades en estado endurecido son estipuladas por las prescripciones de proyecto y por el cumplimiento de las exigencias normativas y reglamentarias.⁸² Por consiguiente, estas propiedades competen fundamentalmente a la figura del arquitecto o prescriptor.

Las propiedades del estado fresco son determinantes, pues influirán en gran medida en las prestaciones finales que ofrecerá el mortero. Es necesario resaltar que las características de los morteros, tanto en estado fresco como endurecido, dependen de su aplicación de destino, de acuerdo con la clasificación reflejada anteriormente.

⁸¹ Tabla elaborada en base a los datos proporcionados por la Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM), Realizada por MGDC.

⁸² Oscar Rodríguez Mora, *op. cit.*, p. 31.

Los morteros presentan múltiples características, además de las presentadas en la Tabla 1, sin embargo para efectos de la presente investigación, se tomarán en cuenta sólo las ya mencionadas, ya que son las que de forma directa influyen sobre la conservación de los bienes históricos. Al precisar estas propiedades es posible realizar una evaluación y clasificación previa del material a utilizar. A continuación se explican las características

Fluidez. La fluidez, también conocida como consistencia, define la manejabilidad del mortero. La consistencia adecuada se obtiene mediante la adición de cierta cantidad de agua, que varía en función de los materiales presentes en el mortero, así como de las condicionantes ambientales, la presencia de cal mejora la trabajabilidad del mortero.⁸³ La fluidez se determina por la mesa de fluidez, de acuerdo al procedimiento de la Norma NMX-C-061-ONNCCE-2010.

Adherencia. La adherencia se considera tanto en el mortero fresco como en el mortero endurecido. Consiste en la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interface mortero-base. Se refiere, por tanto, a la resistencia a la separación del mortero sobre su soporte.

La adherencia del mortero fresco se debe a las propiedades reológicas de la pasta conglomerante, la adherencia antes de que el mortero endurezca se incrementa cuando mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos. La adherencia se basa en la resistencia a tracción de la unión entre mortero y un soporte definido.

Esta propiedad determina la unión entre las piezas o partes unidas, influyendo en la resistencia del conjunto, así mismo, una baja adherencia puede causar desprendimientos de las piezas de revestimientos interiores o exteriores fijados por morteros. En el caso de desprendimiento de los aplanados, la fachada queda expuesta y por lo tanto desprotegida.⁸⁴

⁸³ Oscar Rodríguez Mora, *Morteros; op. cit.*, p. 30.

⁸⁴ Oscar Rodríguez Mora, *op. cit.*, pp. 35-39.

Retención. La retención de agua se relaciona con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante, y, en general, con la viscosidad de una pasta. Un mortero tiene a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y árido, así como las burbujas de aire incluido. El agua que se encuentra en exceso cederá por succión del soporte sobre el que se aplica. La retención influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determina el ritmo de endurecimiento del mortero.⁸⁵

Resistencia. El mortero en gran parte de sus aplicaciones, debe actuar como elemento de unión resistente, para recibir y enviar las cargas del sistema constructivo del que forma parte. La resistencia del mortero influirá en la capacidad de una fábrica para transportar y transmitir las cargas a las que se ve sometida.⁸⁶ La resistencia a la compresión se efectúa de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE.

Retracción. Con el nombre de retracción se conoce al proceso de reducción de volumen que sufren las pastas, los morteros y los hormigones antes, durante y después del fraguado, cuando son expuestos al aire.⁸⁷ Este fenómeno tiene su origen en dos tipos de retracción: la retracción térmica, se da cuando se presenta una reacción exotérmica que eleva la temperatura de los morteros, al hidratar los compuestos, este calor desprendido lleva al descenso de la temperatura del mortero; y la retracción hidráulica o secado, que se produce al perder la pérdida del agua de amasado por evaporación en el mortero, se origina una presión negativa, causante de la retracción.

Vicat⁸⁸ clasifica los materiales que se mezclan con la cal para fabricar los morteros o argamasas, según el grado de energía que producen con la cal común apagada por el método ordinario para hacerla fraguar en un tiempo dado, y por la dureza que hacen adquirir al mortero sumergido en el agua.

⁸⁵ *Ibidem.*

⁸⁶ *Ibidem*

⁸⁷ Javier A. Sánchez, "La retracción en los morteros de cal" en *Materiales de Construcción*, Vol. 47, Núm. 245, 1997, pp. 17-28.

⁸⁸ Louis Josephine Vicat, *Mortars and Cements*, Londres, Architectural Library, 1837.

Designa como inertes los materiales que, mezclados con la cal referida, formando una pasta de consistencia arcillosa, no hacen variar sus propiedades, es decir no producen el efecto de que fragüen en el agua. Las arenas están en general en este caso; materias poco enérgicas cuando, mezcladas como hemos dicho, al cabo de un año de sumergidas en el agua, adquiere la mezcla una dureza como la de jabón seco; enérgicas cuando fraguan del cuarto al décimo día de inmersión, y al cabo de un año adquieren la dureza de piedra tierna, producen actuando en ellas una serreta, polvo seco; y muy enérgicas cuando fraguan del primero al tercero día de inmersión, y al cabo de un año presenta el mortero consistencia como la del ladrillo cocido, y con la sierra produce polvo seco.

MATERIALES BÁSICOS DE LOS MORTEROS

Los morteros son materiales artificiales, utilizados a lo largo de la historia de la construcción, producto de la mezcla de un producto conglomerante, en este caso la cal, un árido fino, más o menos inerte, y en ocasiones una serie de adiciones y aditivos para la mejora de las propiedades finales, todo ello unido gracias a la acción del agua, tanto para facilitar el amasado, compactado y modelado de la masa, o bien para que al combinarse desencadene las reacciones del fraguado correspondiente.⁸⁹ En cuanto a la composición de los morteros a continuación se muestra un diagrama (Fig. 7) con los materiales que lo conforman:

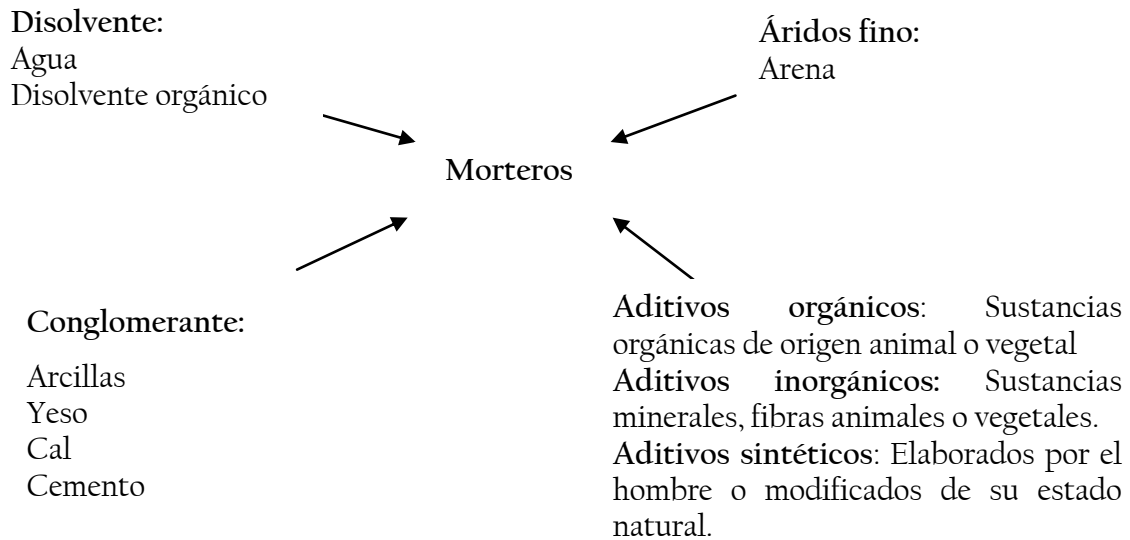


Figura 7. Componentes de los morteros históricos.

⁸⁹ Alberto Sepulcre Aguilar, *op. cit.*, p. 16.

DISOLVENTE: EL AGUA

El agua es uno de los elementos importantes del mortero, puesto que de ella depende la plasticidad que presente la argamasa, la cantidad de agua será la que determine la resistencia de mezcla una vez seca, por lo que el agua utilizada durante el amasado como durante el curado en obra debe ser de naturaleza inocua.⁹⁰

El agua de amasado para morteros será la considerada como potable, y se dosificará de manera que otorgue al mortero la docilidad necesaria para su empleo, nunca se dosificará en exceso, puesto que así será más fluido el mortero y producirá retracciones en su fraguado. Tampoco se debe aumentar la cantidad del mortero añadiendo agua, porque las partículas de la masa sólo pueden retener una cantidad fija, en función de la superficie total de agua y su capacidad de absorción. Por tanto el exceso de agua separa la masa, aumentando la porosidad y perdiendo resistencia.⁹¹

El agua destinada para los morteros debe estar libre de sales ya que retardan o impiden el fraguado, las aguas potables presentan la calidad necesaria para utilizarse, D. Benito Bails recomienda cómo utilizar el agua para el apagado de la cal, “conviene dejar el agua primero algún tiempo al aire; particularmente en verano, con el fin de que vaya perdiendo su frialdad, la cual cerraría los poros de la cal, y así quedaría mal apagada”.⁹²

AGREGADOS: ARENA

Un agregado es definido por Gutiérrez de López como el “conjunto de materiales de composición mineral, naturales o artificiales, generalmente inertes, usados en la construcción de obras civiles”,⁹³ éstos constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad, y estabilidad, ya que ocupan el del 70 a 80% del volumen del mortero, es posible afirmar que conforma el esqueleto del mortero.

⁹⁰ Oscar Rodríguez Mora, *op. cit.*, p. 30.

⁹¹ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, p. 99.

⁹² Benito Bails, *De la Arquitectura Civil*, Valencia, Artes Gráficas Soler S.A., 1983, p. 158.

⁹³ Libia Gutiérrez de López, *op. cit.*

Los agregados son producto de la desintegración de las rocas, que al mezclarse con un conglomerante y agua constituyen el material que forma los morteros, la forma más común de los agregados son las arenas, las gravas y las gravillas⁹⁴, se obtienen por medio de un proceso de fragmentación natural como el interperismo y la abrasión o mediante un proceso físico mecánico hecho por el hombre; en ambos casos conservan determinadas propiedades físicas: densidad, porosidad, textura, morfología, color, resistencia al interperismo y composición mineralógica de la roca madre.⁹⁵

La función que cumple el agregado permite que un mortero al mezclarse con el cementante disminuya su tracción y lo dota de textura y color, además de estabilizar su volumen haciendo el papel de relleno, lo que permite al mortero retener su forma y grosor bajo el peso de subsecuentes cargas.⁹⁶

Indica Alonso Olvera,⁹⁷ que en conservación se suelen utilizar tipos genéricos de agregados que están compuestos de los mismos minerales, ya que esto asegura su comportamiento y su reacción con el conglomerante. Normalmente los agregados se usan puros, es decir, no se mezclan con diferentes tipos provenientes de diversas rocas o minerales.

En el caso de Andrea Palladio clasifica la arena en tres especies que son de mina, de río y de mar, recomienda la de mina que se encuentra de varios colores, negra, roja, blanca o carboncillo, entre las arenas de mina de peor calidad se encuentra la blanca.⁹⁸ Cristiano Rieger también hace recomendaciones sobre la arena;

Si el arena no está bien seca y áspera, no se une bien con la cal. Por esto no sirve la arena mezclada con partículas de tierra, que no convengan a la unión con la cal, con las piedras o con los ladrillos. (...) La arena, ni debe ser muy gorda, ni

⁹⁴ Alejandra Alonso Olvera, "Agregados de morteros y conglomerados de cal" en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *op. cit.*, p. 75.

⁹⁵ Gutiérrez de López, Libia, *op. cit.*, p. 9.

⁹⁶ Alejandra Alonso Olvera, "Agregados de morteros...", *op. cit.* pp. 77-78.

⁹⁷ *Ibidem*, p. 85.

⁹⁸ Andrea Palladio, *Los cuatro libros de la arquitectura*, Madrid, Imprenta real, 1797.

muy sutil, porque la primera no es cómoda para el trabajo, y menos lo es la segunda, que nunca une bien con la cal.⁹⁹

El agregado debe seleccionarse de acuerdo con el tipo de mortero a preparar y su función, para el desarrollo de este estudio se analizan únicamente las arenas, ya que el mortero solo contiene agregados finos. El agregado fino o arena es el material pasante de la malla No. 4 y retenido en la malla No. 200, con tamaños entre 4.76 mm y 0.074 mm.

En la ciudad de Morelia, para la preparación de los morteros de cal se utilizaron arenas de granos redondeados, es decir, arenas de río formadas por fragmentos de diversas rocas, se tiene este conocimiento gracias a las pruebas realizados por Luis Silva Ruelas, quien estudió muestras de morteros de diversos edificios, entre ellos el Acueducto. La arena fue sometida a pruebas de laboratorio que evidenciaron que la arena se cribaba según el tipo de trabajo. Se supone que el origen de estos materiales fueron los playones de material formados por el Río Chiquito antes de su canalización.¹⁰⁰

Para determinar la efectividad de los agregados se requiere explorar el conocimiento de los materiales utilizados localmente por los habitantes para sus construcciones para determinar los criterios de selección y de ser necesario realizar las pruebas necesarias para identificar sus características y verificar su efectividad y así asegurar que se obtengan las mejores propiedades de acuerdo a la función destinada.

CONGLOMERANTE O CEMENTANTE: LA CAL

Uno de los elementos que desempeñan un papel fundamental dentro del mortero es el conglomerante, se entiende este como el “material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que origina nuevos compuestos”,¹⁰¹ en este

⁹⁹ Christiano Rieger, *Elementos de toda la arquitectura civil*, Madrid, Impreso por Joachin Ibarra, 1763, pp. 223-224.

¹⁰⁰ Luis Silva Ruelas, *Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1990, p. 63.

¹⁰¹ Oscar Rodríguez Mora, *op. cit.*, p. 19.

caso se presta especial atención al estudio de la cal como aglomerante en los morteros, al ser el material que ha demostrado ser compatible con el material pétreo del edificio.

Hay dos formas principales en las que se presenta la cal; la cal aérea y la cal hidráulica. “Las cales aéreas son aquellas compuestas fundamentalmente por hidróxido de calcio que con un cierto contenido de humedad y en contacto con el aire se combinan con el CO₂ de éste, para formar carbonato cálcico en el proceso de fraguado.”¹⁰² Este tipo de cal está producida a partir de calizas más o menos puras, de las que, mediante la operación de cocción, se obtiene la cal viva, la cual está compuesta, fundamentalmente, por óxido de calcio.¹⁰³

La cal en las argamasas es la responsable de la cohesión del material fraguado resultante, y de la mayor parte de sus propiedades, fundamentalmente de su permeabilidad.¹⁰⁴ Este material se caracteriza por su versatilidad, siendo uno de los productos con más gama de aplicaciones, teniendo en cuenta cuatro grupos: Industria, construcción, medio ambiente y agricultura.¹⁰⁵

La cercanía geográfica de un material como la cal ha permitido que esté vinculado como material de construcción a través de los siglos, la gran mayoría de nuestro patrimonio arquitectónico construido se asienta sobre los productos derivados de la cal, tanto como material estructural, decorativo o de revestimiento, por lo que su conocimiento es vital para la preservación de los elementos arquitectónicos.

Los conglomerantes se obtienen a partir de materias primas naturales o actualmente pueden ser subproductos industriales. Martínez Molina,¹⁰⁶ explica que la cal como

¹⁰² Alberto Sepulcre Aguilar, *op. cit.*, pp. 16 y 27.

¹⁰³ Juan Alberto Bedolla, Claudia Rodríguez y Salvador García, “Caracterización física y mecánica de la cal viva apagada artesanalmente para uso en la restauración” en Elia Mercedes Alonso Guzmán (Coord.) y Claudia Rodríguez Espinoza (ed.), *Conservación de materiales de interés histórico y artístico*, Morelia, Red temática PROMEP, 2013, p. 167.

¹⁰⁴ Isabel Villaseñor y Renata Shneider, “Principios generales para la elaboración de argamasas” en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *op. cit.*, p. 97.

¹⁰⁵ Rafael Fernández Aller, “Estructura de la producción de la cal en España” en Alejandro Sánchez, Francisco Javier et al. (Coord.), *op. cit.*, p.17.

¹⁰⁶ Wilfrido Martínez Molina *et al.*, *Las adiciones de cactus opuntia...*, *op. cit.*

derivado de la piedra caliza se puede encontrar en tres formas: piedra caliza (CaCO_3 , carbonato de calcio), cal viva (CaO , óxido de calcio) y cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ó hidróxido de calcio. La caliza es una roca de origen sedimentario, formada a partir de sedimentos llevados de manera eólica, pluvial, fluvial. Está compuesta básicamente por carbonato de calcio y por carbonato de magnesio; también contiene impurezas como sílice, alúmina, óxidos de hierro.

La cal es uno de los materiales aglomerantes más antiguas utilizados en la construcción, según Arredondo “se llama cal a todo producto, sea cual fuere su composición y aspecto físico, que proceda de la calcinación de las piedras calizas”,¹⁰⁷ como complemento el Diccionario de la Real Academia la define como “Óxido de calcio. Sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto con el agua, se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor y mezclada con arena, forma la argamasa o mortero”, a partir de esta terminología la cal se asocia a la construcción al ser uno de los elementos principales de los morteros.

El uso de la cal es un hecho prehistórico que apareció tras el descubrimiento del fuego, Mariano González Cortina afirma que “la utilización por el hombre primitivo de las piedras calizas para confinar el fuego, le permitió observar que dichas piedras se desintegraban en unos trozos blancos y que estos, después de la lluvia formaban una pasta blanca y formacea que endurecía al aire”,¹⁰⁸ es decir, la caliza calcinada se apagaba en contacto con la humedad o la lluvia, y el material resultante era un polvo que tenía propiedades ligantes de materiales.

Históricamente, la cal ha sido una de los materiales más importantes en la construcción, Kerstin Elert¹⁰⁹ data los primeros ejemplos de su uso en Palestina y Turquía (12,000 a.J.C.), Se tienen pocos datos sobre la utilización de la cal y sus derivados en la época neolítica, la cultura de Jericó una de las más antiguas junto con Çatal Hüyük, presenta vestigios de la utilización de cal en cisternas, así como la

¹⁰⁷ F. Arredondo y Verdu, “Yesos y Cales” en *Revista de Obras Públicas*, E. T. S. Ingenieros y Caminos, Madrid, 1991.

¹⁰⁸ Mariano González Cortina, *op. cit.*, p. 6.

¹⁰⁹ Kerstin Elert, *et al.*, *op. cit.*, pp. 62-75.

existencia de suelos de morteros cal en casas excavadas por arqueólogos en Djeitun (Turkmenistán).¹¹⁰

En América Central, se tiene la certeza de la utilización de la cal en los centros ceremoniales de la cultura maya (300 al 900 d.J.C.), los aztecas y en las culturas andinas del Perú, la cual fue utilizada sobre todo para los estucos y decoraciones, pero también se empleó la cal mezclada con asfalto para los morteros de mamposterías y también se mezcla la cal con el barro para la estabilización de adobes.¹¹¹

Durante la fusión de la cultura europea con la cultura del nuevo mundo, se dió una mezcla entre los conocimientos constructivos de las dos culturas, Fray Bernardino de Sahagún explica la forma de obtener la cal, en base a sus observaciones en la Nueva España:

El que trata en cal, quiebra la piedra de que hace cal y la cuece, y después la mata; y para cocerla, o hacerla viva junta primero toda la piedra que es buena para hacer cal, y métela después en el horno, donde la quema con harta leña, y después que la tiene cocida o quemada, mácala para aumentarla. Este tal tratante unas veces vende la cal viva, y otras veces muerta, y la cal que es buena sácala de la piedra que se llama cacalótl quemada, o de la piedra que se llama tepélatl.¹¹²

Como se observa, el procedimiento de obtención de la cal, presenta similitudes a las mencionadas por Luis Silva Rúelas, por lo que se concluye que el procedimiento de apagado de la cal se generalizó por la Nueva España. La elaboración artesanal de la cal consiste en la calcinación de la piedra caliza en horno tradicional alimentado con leña hasta transformarla en cal viva.¹¹³

¹¹⁰ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, p. 75.

¹¹¹ *Ibidem*, p. 76.

¹¹² Fray Bernardino Ribeira de Sahagún, *Historia universal de las cosas de la Nueva España*, México, Editorial Pedro Robredo, 1938.

¹¹³ Gema Carrera Díaz y Alessandra Olivi, "Una de cal y una de arena. La producción de cal en atlas del patrimonio inmaterial de Andalucía" Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *op. cit.*, p. 151.

En el Valle de Guayangareo no existían calizas, por lo que eran adquiridas de las vetas de Cal de Cuitzeo, Yuriria, Acámbaro, Iztapa o Etúcuaro.¹¹⁴ La cal es uno de los elementos más importantes del mortero, ya que brinda características cementantes, por lo que será analizado ampliamente en el siguiente apartado.

La noble cal ha acompañado al hombre en su milenaria historia en la construcción de su arquitectura, aportando a todas sus buenas cualidades, enriqueciendo los espacios de la vida. La cal, hoy indudablemente ha de estar presente con auténticos morteros, estucos y jabelgas en el arte de la construcción en arquitectura.¹¹⁵

La cal utilizada en Morelia, se obtenía a través de la calcinación de piedras calizas con leña, resultando la cal viva, la cual debía apagarse agregándole agua. El procedimiento consistía en la creación de una pileta poco profunda con bordos de arena, piedra o arcilla. La cal era colocada y se le agregaba agua, moviendo eventualmente la mezcla con una pala de madera y se dejaba reposar durante dos semanas para ser utilizada como pasta húmeda.

Sin embargo, hacia mediados del siglo XVIII, las cales hidráulicas comenzaron a reemplazar a los morteros de cal común y su uso se redujo aún más con el desarrollo de cemento Portland en la segunda mitad del siglo XIX. Esta tendencia fue sin duda favorecida por las dificultades en cuanto a la aplicación de los morteros de cal, incluyendo producción y tiempos de endurecimiento largos, alta humedad relativa, débiles propiedades mecánicas y baja adherencia interna, así como una alta porosidad, lo que hace el mortero de cal susceptibles a los daños causados por la cristalización de la sal o la congelación.

Las cales hidráulicas deben su nombre al hecho de que el fraguado puede efectuarse en un entorno acuoso; es decir, un mortero fresco aún, aglomerado con cales de este tipo, puede sumergirse tras haberle dado forma sin que su endurecimiento se vea

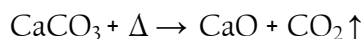
¹¹⁴ Luis Silva Ruelas, *op. cit.*, p. 62.

¹¹⁵ María Dolores Robador González, “Enoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta” en Alejandro Sánchez, Francisco Javier *et al* (Coord.), *La cal: Investigación, patrimonio y restauración*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2014, p. 189.

interrumpido. Este tipo de cal se consigue de rocas calizas que contengan más de 8 % de arcilla.¹¹⁶

Los morteros de cal han sido parte de los procesos de edificación, al introducir adherencia a las piezas de construcción y mantener la estabilidad de las estructuras a través del tiempo, en este proceso se desarrollan diversas funciones complementarias, gracias al fenómeno de la carbonatación de hidróxido de calcio,¹¹⁷ la cal antes de ser empleada en los morteros debe pasar por un proceso exotérmico que lo convierte en el producto hidratado

La producción de la cal, parte de la extracción y trituración de la piedra caliza, y posteriormente se procede a la calcinación de las piedras calizas, las propiedades de la cal para la elaboración de morteros se determinan por la participación de distintos compuestos químicos que forman el llamado “ciclo de cal”, Isabel Villaseñor y Renata Schneider, explican que este ciclo comienza cuando las rocas calizas, las conchas, el mármol o los corales son sometidos a temperaturas altas entre 700 y 900°C.¹¹⁸ Cuando se alcanzan estas temperaturas se llega a un punto de calcinación en donde el carbonato de calcio y dióxido de carbono dan paso a lo que se conoce como cal viva. Lo anterior se explica mediante la siguiente reacción:



Carbonato de calcio + calor → óxido de calcio (cal viva) + dióxido de carbono (gas)

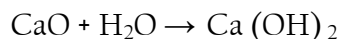
Una vez que el material calizo se convierte en cal viva, debe ser “apagada”, lo cual se realiza mediante la incorporación de agua, en este punto la cal reacciona exotérmicamente con el agua, reacción que puede ser muy violenta, especialmente cuando se trata de una cal muy pura y recién calcinada, como cualquier material reactivo, éste debe agregarse al agua y no el agua a éste. F. Bores indica que la

¹¹⁶ Bedolla, Juan Alberto, Claudia Rodríguez y Salvador García, “Caracterización física y mecánica de la cal viva... *op. cit.*, p. 167.

¹¹⁷ Luis Guerrero, “La cal y los sistemas constructivos”, Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia...*, *op. cit.*, p.53.

¹¹⁸ Isabel Villaseñor y Renata Schneider, “Principios generales para la elaboración de argamasas”, en: Barba Pingarrón, Luis e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia, op. cit.*, p. 98.

reacción química al momento del apagado convierte la cal viva en hidróxido de calcio, es decir la “cal apagada”:¹¹⁹

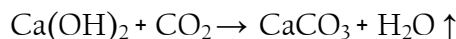


Óxido de calcio (cal viva) + agua → hidróxido de calcio (cal apagada)

Las propiedades físicas que otorgará la cal al mortero, dependerán del tiempo de “apagado”, mientras más se deje apagando mejores serán las propiedades, ya que los cristales de cal se vuelven cada vez más pequeños, mientras mayor sea el tiempo en que ésta permanezca bajo el agua, se logra que los cristales de hidróxido de calcio resbalen entre sí y la cal sea más plástica.¹²⁰

Para la producción de cal con fines de conservación, se recomienda que se almacene en depósitos no metálicos y que se mantenga cubierta de agua, lo que le asegurará una correcta hidratación y una mayor plasticidad. Para la preparación de argamasas se recomienda tomar la cal del fondo del depósito, mientras que para lechadas se puede usar la zona media y superficial.

Para la obtención del mortero de cal, la cal se mezcla con arena y agua en diferentes proporciones, el cual es aplicado en la construcción. Una vez aplicado, comienza el proceso de fraguado, al reaccionar con el dióxido de carbono ambiental, se carbonata y adquiere endurecimiento:



Hidróxido de calcio + dióxido de carbono → carbonato de calcio + agua evaporada

Este proceso es conocido como carbonatación, es originado por la reacción del dióxido de carbono contenido en la atmósfera y que al penetrar en el concreto poroso encuentra el hidróxido de calcio contenido en el concreto.¹²¹ De esta manera se completa el ciclo de la cal (Fig. 8), el cual inicia y termina con el carbonato de calcio,

¹¹⁹ F. Bores, *Historia de la construcción*, La Coruña, Universidad de A. Coruña, 1998.

¹²⁰ Isabel Villaseñor y Renata Schneider, “Principios generales para la elaboración de argamasas” en Barba Pingarrón, Luis e Isabel Villaseñor Alonso (editores), *La cal: historia... op. cit.*, p. 98.

¹²¹ Libia Gutiérrez de López, *op. cit.*, p. 58.

es decir, se forma un material químicamente idéntico a la materia prima que se empleó para la producción de la cal.

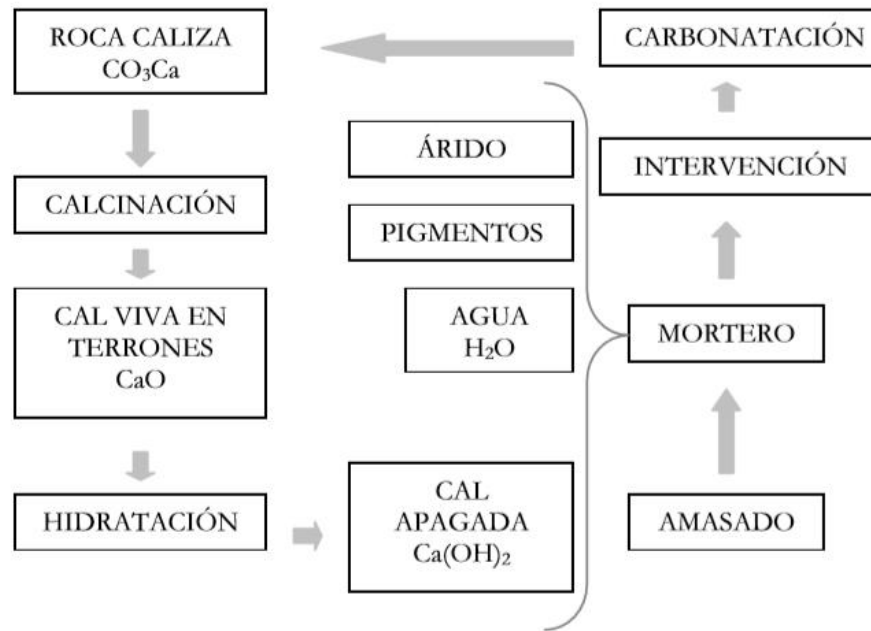


Figura 8. Ciclo de la cal, fuente: Xavier Mas i Barberá, *Estudio y caracterización de morteros compuestos*, p. 44.

Investigaciones recientes, han demostrado que las cales en pasta ofrecen mejores comportamiento que las cales en polvo, además la mejora de las propiedades de estas cales se ven beneficiadas cuanto mayor sea su tiempo de apagado.¹²² En contraposición, se tiene que la reacción de carbonatación es muy lenta, pues empieza a las veinticuatro horas de amasar la pasta y termina al cabo de los seis meses, por lo que las obras en que se emplean los morteros de cal tardan mucho en secarse y adquirir la solidez definitiva,¹²³ por lo que implican más dificultad en su aplicación en obra para obtener dosificaciones precisas.

Por otra parte, la industria de la construcción moderna, se encuentra en una etapa de producción, en donde el tiempo de edificación implica mayor costo, por lo que la

¹²² Jesús Espinoza Gaitán, “Estudios de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla)” en Francisco Javier Alejandro Sánchez, *et al.* (Coord.), *La cal... op. cit.*, p. 40.

¹²³ Juan David Cañón Bermúdez, *op. cit.*, p.6-9.

posibilidad de recuperar las metodologías tradicionales en su totalidad es prácticamente nula, ya que son en su mayoría incompatibles con los requisitos de la industria moderna, donde se prefiere el uso de morteros en forma de polco seco.

En la actualidad existen empresas que se dedican a la producción de cales hidratadas comerciales, también conocidas como “calhidras”, son cales que se venden como bultos de polvo, listos para ser mezclados con agua y agregados para formar la pasta. Además de las calhidras, existen las llamadas cales químicas o cales industriales, las cuales se venden como óxido de calcio o como hidróxido de calcio, estas garantizan mayor pureza que va del 90 al 97%.¹²⁴

Grupo Calidra puntualiza que es más recomendable usar cales químicas que las hidratadas para la construcción, ya que las químicas otorgan una mayor pureza y una menor proporción de material carbonatado, además de proporcionar bajos costos en la construcción, facilidad y rapidez de uso. Rodríguez Navarro, asevera que la cal en polvo no tiene las mismas propiedades reológicas que las cales en pasta, por lo que no se pueden obtener morteros de elevada plasticidad y reactividad, a menos que se le añadan aditivos.¹²⁵

ADITIVOS Y ADICIONES

Durante el amasado de un mortero, normalmente se incorporan sustancias naturales o sintéticas, para mejorar las propiedades físicas de los morteros se requirió de la presencia de aditivos o adiciones. La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción define los aditivos como “aquellas sustancias o productos (inorgánicos u orgánicos) que, incorporados al concreto antes del amasado, durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario, producen la modificación deseada de alguna característica de su comportamiento habitual.”¹²⁶

¹²⁴ Grupo Calidra, 2014.

¹²⁵ C. Rodríguez Navarro *et al*, Nanostructure and irreversible colloidal behavior of Ca(OH)₂: implication in Cultural Heritage Conservation, *Langmuir*, 21, 2005, p. 24.

¹²⁶ CMIC, “¿Qué son los aditivos para el concreto?” en *Construyendo Colima*, Núm. 12, 2009.

Los aditivos que históricamente se han utilizado en la construcción, son divididos en dos tipos de acuerdo con Díaz Arreola:¹²⁷

- Materiales inorgánicos, estos son pétreos y metálicos.
- Materiales orgánicos, éstos a su vez se dividen en:
 - Materiales de origen vegetal: maderas blandas y duras, cactáceas, etc.
 - Materiales de origen animal: estiércol, crines, cebo, cera, cola, huevo, jabón, etc.

En este caso, los aditivos serán los considerados como los productos naturales o las sustancias orgánicas de origen animal o vegetal, mientras que las adiciones serán consideradas como los materiales inorgánicos o sustancias minerales, fibras animales o vegetales. Su empleo histórico se expondrá ampliamente en el siguiente capítulo.

AGENTES DE DETERIORO EN MORTEROS

Los materiales presentes en la edificación, son los elementos que integran el inmueble, con el paso del tiempo son cada vez más frecuentes los deterioros debido a diversos factores. Al conservar los materiales es posible alargar la vida del edificio y conservar su valor.

Toda materia se encuentra expuesta a un proceso de alteración degradación, o descomposición según su estructura química y el medio ambiente al que se encuentra expuesto. Las amenazas naturales son propias de un ciclo continuo de desintegración y reconstrucción que tiene lugar en la tierra. Estos peligros se incrementan cuando la ignorancia, el vandalismo, las guerras, o el propio desarrollo de la civilización, afectan los bienes culturales.¹²⁸

Son diversas las causas de que un edificio se encuentre en mal estado, al analizar cada uno de sus componentes es posible identificar el origen de los problemas y a través de

¹²⁷ Emilia Díaz Arreola, *et al.*, *Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra*, Chihuahua, CONACULTA, CENTRO INAH CHIHUAHUA.

¹²⁸ Xabier Martiarena, “Conservación y Restauración” en *Cuadernos de Sección. Artes Plásticas y Documentales*, Núm. 10, 1992, p. 184.

esto dar una solución, la intervención de diversos especialistas hace posible un diagnóstico más certero y que garantice la integridad del edificio.

Por lo general, los morteros a estudiar, se encuentran adosados o formando parte de edificios, por lo que los procesos de deterioro que presentan son diversos y complejos, ya que la alteración de las estructuras arquitectónicas repercute directamente sobre ellos. Florencio Javier Aspas indica que es indispensable conocer el valor de estos edificios para evitar la pérdida irreparable de sus elementos, debido a las diversas patologías a los que se exponen. Se mencionan tres tipos de patologías:

- **Las que produce el hombre o antropogénicas:** continuas intervenciones, actuaciones de moda, vandálicas, negligentes, la polución, el fuego, usos inadecuados y algunos factores económicos.
- **Las internas al elemento o diagenéticas:** Referentes al diseño del propio elemento y referentes a su ejecución.
- **Las externas al elemento o meteóricas:** agentes naturales que no se pueden controlar como factores climáticos, geológicos o biológicos o naturales.¹²⁹

Dentro de las causas externas al edificio, estas se subdividen a su vez en aquellas de acción prolongada: físicas, químicas y biológicas. Y las de acción temporal u ocasional.¹³⁰

Para comprender los procesos de deterioro es necesario conocer la relación que existe entre las causas y mecanismos que lo producen, ya que cada de uno de ellos afecta el estado de conservación de los elementos decorativos y recubrimientos arquitectónicos. En la mayoría de los casos existen condiciones tanto internas como externas, las cuales están más allá de nuestro control y generan inestabilidad en los elementos, lo cual hace que cualquier intervención que no vaya encaminada a la estabilización de los diferentes factores que intervienen en el deterioro, lleve a un

¹²⁹ Florencio Javier Aspas, "Planteamientos Generales de la Intervención" en Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, *Conservación Arqueológica. Reflexión y debate sobre teoría y práctica*, Junta de Andalucía, 1992, pp. 121-129.

¹³⁰ Ramón M. Bonfil, "Causas de deterioro en los monumentos" en *Apuntes sobre restauración de monumentos*, México, SEP, 1971, pp. 71 - 88.

inminente fracaso. A continuación se mencionan algunos de los principales mecanismos de deterioro que afectan a los morteros.

HUMEDAD

La humedad se presenta a través de diversos fenómenos, por un lado está el deterioro físico debido a la caída de lluvia y por el otro, fenómenos asociados como la capilaridad, la ósmosis, la disolución de materiales y la migración de sales, que aunque no producen daños inmediatos, son más severos a nivel interno.

La capilaridad es un mecanismo por el cual el agua penetra por las cavidades de los materiales porosos, en este caso la piedra y el estuco del que están hechos los elementos decorativos. Durante el proceso el agua ejerce presión sobre las paredes de los poros y las fuerzas ejercidas se reparten irregularmente por la red de capilares, generando puntos débiles que con el tiempo se colapsan y hacen que la consistencia del material se vuelva pulverulenta, dándole a su vez mayor poder de absorción.

La ósmosis se da una vez que el agua ha formado soluciones de sales en el interior de las estructuras. Este proceso hace que las soluciones se unifiquen mediante el traspaso de las sustancias diluidas desde las soluciones más concentradas hasta las menos concentradas, dando como resultado un solo tipo de solución con cantidades uniformes de soluto.

La disolución de los materiales ocurre cuando las moléculas de un compuesto se dispersan en el seno de un líquido. El proceso de hidrólisis de materiales pétreos implica lapsos de tiempo de varios meses o años. Finalmente, la presencia de agua o humedad al interior de los materiales provoca la disolución de sales que, junto con el aumento en la temperatura, inician un movimiento por capilaridad hacia las superficies más cercanas, en los cuales se evapora el agua y las sales se solidifican.

El proceso de cristalización provoca un deterioro de tipo mecánico, el cual ejerce presiones intensas que rompen las estructuras internas de los materiales constitutivos, ya que los cristales se expanden en forma geométricas hasta alcanzar

un patrón cristalino.¹³¹ Es así que la humedad se convierte en una de las causas principales de alteración en los morteros o recubrimientos.

TEMPERATURA

La temperatura es otro factor importante que altera el comportamiento de los materiales constitutivos, principalmente en los casos donde los cambios son extremos, lo que provoca la expansión y concentración de los materiales, además de combinarse con la humedad y favorecer el desarrollo de microorganismos.

El deterioro que puede provocar la temperatura en los materiales no consiste tanto en sus valores absolutos sino en la frecuencia y contraste de sus variaciones, ya que los materiales tienden a dilatarse con temperaturas altas y a contraerse a causa del frío. Esta acción provoca fracturas o fatiga del material. La ruptura se va dando a partir de la superficie y el deterioro avanza a medida que las capas externas se pierden.¹³²

SALES

Otro agente de deterioro son las sales. Pensemos que nuestra geografía posee gran parte de costa y por lo tanto, aire húmedo y salado. Este aire deposita sobre los objetos pequeñas cantidades de sal, que al ser higroscópica mantiene el índice de H.R. alto, facilitando el desarrollo de microorganismos. Estas pequeñas partículas crean en su entorno una elevada humedad produciendo manchas, corrimientos en las tintas, etc. Otra forma de floración de las sales viene dada por las filtraciones subterráneas y por la absorción capilar, tanto del subsuelo, como de los techos; deteriorando los muros y pinturas que se hallan en ellos.¹³³

¹³¹ Blanca Haydeé Oréa Magaña, “La fachada barroca del templo de Santo Domingo de San Cristóbal de las Casas (México) y su reintegración pictórica: una intervención polémica” en *Intervención*, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología, Número 9, enero- junio, 2014.

¹³² *Idem*.

¹³³ Xabier Martiarena, “Conservación y Restauración” en *Cuadernos de Sección. Artes Plásticas y Documentales*, Núm. 10, 1992, p. 186.

OTROS FACTORES

Otro de los factores de deterioro es la erosión causada por el viento, que al llevar partículas de arena, polvo y otros materiales causa abrasión a la superficie, así como el aumento en la circulación del aire favorece la evaporación del agua. La disposición de polvo y otros materiales, así como los excrementos de insectos, aves y murciélagos, además de ensuciar la superficie de los elementos, puede llegar a corroer o crear manchas difíciles de eliminar (*black crusts*).

El desarrollo de plantas superiores se da en recovecos donde encuentran un sustrato grueso y aunque sus raíces no hayan penetrado en las estructuras causando problemas importantes, se recomienda su eliminación para evitar un mayor deterioro debido a la acción mecánica de sus raíces. En cuanto a la presencia de musgos, se desarrollan donde se acumula tierra y humedad, por ejemplo en las juntas y pisos. Finalmente, también están los artrópodos, mamíferos y reptiles que forman sus nidos en recovecos de relieves y aplanados, dañando así la estabilidad estructural de los elementos decorativos.¹³⁴

REFLEXIONES

La cal es un material noble, utilizado para la construcción desde tiempos inmemoriales, su uso en la conservación del patrimonio asegura la compatibilidad y continuidad en el comportamiento estructural de los esqueletos. Como se observó, la cal fue manejada por diversas culturas en diversas formas, por lo que su producción no siempre fue homogénea.

Una observación importante es que la cal apagada en obra no tiene propiedades adherentes y por lo tanto su fijación es mecánica a los huecos de la piedra o el ladrillo, por lo que no modifica las propiedades estructurales de estos materiales, permitiendo su movimiento natural e integrándose a este.¹³⁵

¹³⁴ *Idem.*

¹³⁵ ANFACAL, *La cal viva y su uso en restauración.*

Al buscar nuevos morteros aptos para la conservación, primero que nada se busca tener un antecedente sobre el cual trabajar, sin embargo las características de los nuevos tendrán variaciones en cuanto al mortero anterior, esto se debe a los materiales disponibles y a la aplicación de las técnicas, por ende deben buscarse fórmulas que se adecúen a las necesidades actuales y que presenten buena resistencia al deterioro ambiental.

La calidad del mortero tendrá que depender de la procedencia de la cal, ya sea del proceso de apagado o del tipo de cal industrial, la proporción y naturaleza de los acabados, de la calidad de los agregados, y del cuidado en la preparación, aplicación y secado. El uso de morteros de cal no garantiza soluciones eternas, sino que debe tener un mantenimiento adecuado.

Las experiencias históricas no nos muestran que el camino seguido haya sido el mejor, sino que en todo caso, es solo uno de los muchos posibles; por eso es importante revisar el pasado, buscando alternativas para el futuro.¹³⁶

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PRESENCIA DE ADITIVOS Y ADICIONES EN MORTEROS

El uso de aditivos o adiciones en los materiales constructivos que forman parte de la arquitectura, ha sido constante a lo largo de la historia, su importancia radica en la búsqueda constante de materiales que otorguen determinadas características a las edificaciones para prolongar su ciclo de vida. A pesar de su importancia, la pérdida de la técnica constructiva tradicional, con la llegada de la industrialización, trajo consigo el desconocimiento de sus aplicaciones, las técnicas y los usos para los cuales eran destinados.

Este capítulo tiene por objeto identificar los aditivos y adiciones presentes en los morteros de base cal, cuya presencia queda inscrita en la literatura histórica, estudiar las características principales, las tradiciones constructivas e identificar una serie de mezclas susceptibles a ser reproducidas en laboratorio, para tener como fundamento y posteriormente realizar un estudio comparativo de las descripciones aportadas por distintos autores y los resultados obtenidos por medio de la experimentación.

¹³⁶ Daniel Schávelzon y Víctor Rivera, “La destrucción de Kaminaljuyú” en *Mesoamérica*, Centro de Investigaciones Regionales de Mesoamérica y Plumsock Mesoamerican Studies, Núm. 14, 1987, p. 535.

USO DE ADITIVOS Y ADICIONES EN LA PRODUCCIÓN DE MORTEROS DE CAL

El origen del uso de aditivos en morteros es un tema de constante discusión, principalmente debido al problema de la diversidad de las mezclas que se realizaban, en los primeros morteros las dos funciones básicas de los materiales que los componían no estaban delimitados, por lo que se desarrollaron con una gran variedad de materias. Los morteros se emplearon como material de agarre o unión, revestimiento, decoración e impermeabilización.

Algunos autores consideran que no existe fundamento alguno para la creencia persistente de que se adicionaron proteínas animales a los morteros, de hecho, la adición de tales sustancias como la clara de huevo, leche, caseína o sangre, no está presente de forma continua en la literatura histórica; por otra parte, estos investigadores han examinado muestras de morteros de los siglos XI al XVII en Alemania,¹³⁷ y no han podido establecer la presencia de materias orgánicas.

Para Gárate Rojas, la utilización de aditivos especiales, como albúmina, caseínas y aceites, han sido siempre comentados en las “leyendas esotéricas” de las calces romanas, pero insiste en que su durabilidad se basa en su buena elaboración, el perfecto cocido de las calizas, su buen apagado, la homogeneidad de las dosificaciones y la cuidadosa ejecución, las cuales han sido el secreto fundamental de su realización y lo que ha permitido que conozcamos su legado tras los dos mil años que nos separan.¹³⁸

Otros autores sin embargo, han realizado estudios comparativos entre los aditivos usados por los antiguos constructores, y sobre los que no hay dudas sobre de su empleo y los aditivos nuevos, con el propósito de emplear estos últimos en la restauración de obras históricas, como es el caso de Sickels,¹³⁹ quien se apoya en

¹³⁷ Henning y Bleck (1968), citados por Alejandro Sánchez Francisco Javier, *Historia, caracterización y restauración de morteros*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2002, p. 31.

¹³⁸ Ignacio Gárate Rojas, *Artes de la cal*, Madrid, Instituto Español de Arquitectura, 2002, p. 81.

¹³⁹ Lauren B. Sickels, “Organic vs. synthetics: their use as additives in mortars” en *Symposium on Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, 1981, pp. 23-25.

trabajos previos, que atestiguan el empleo ya desde la Antigüedad de aditivos orgánicos e inorgánicos, como aditivos comunes de los egipcios, hasta el empleo en la época de Vitruvio¹⁴⁰ y crea una relación con fechas aproximadas con la constancia histórica en que fueron empleados determinados aditivos.

Hoy en día, en el ámbito de la conservación, existen numerosas recomendaciones para la elaboración de morteros con aditivos o adiciones, Díaz Arreola, en el *Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra*, recomienda que para proteger los morteros de los agentes patógenos, se requiere añadir sustancias consolidantes que les otorguen mayor resistencia, “los materiales que históricamente se han utilizado en la construcción son de dos tipos: materiales inorgánicos, estos son pétreos y metálicos y los materiales orgánicos, éstos a su vez se dividen en materiales de origen vegetal: maderas blandas y duras y materiales de origen animal: estiércol, crines, cebo, cera, cola, huevo, jabón, etc.”¹⁴¹

La presencia de aditivos utilizados a lo largo de la historia, continua siendo un tema en constante debate, ya que se emplearon de forma empírica obteniendo cambios en los morteros, los cuales en ocasiones proporcionaban buenos resultados. Como fundamento de este estudio, se parte de la idea que los aditivos fueron empleados de manera empírica porque se creía que otorgaban mejoras considerables en los morteros. Respecto al uso de aditivos, en base a los estudios realizados, es importante mencionar que las técnicas constructivas nunca fueron estáticas, por el contrario, se trató de innovar en cuanto a los materiales y las técnicas constructivas de acuerdo con los avances tecnológicos de la época.

¹⁴⁰ Marco Lucio Vitruvio Polion, *Los diez libros de Arquitectura*, traducción del latín y comentarios de: Joseph Ortiz y Sanz, Madrid, Imprenta real, 1797.

¹⁴¹ Emilia Díaz Arreola, et al., *Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra*, Chihuahua, CONACULTA/Centro INAH Chihuahua, p. 7.

PROPIEDADES DE ADICIONES Y ADITIVOS

Algunas de las características¹⁴² que presentaban según lo establece Gárate Rojas son las siguientes:

- **Carbonatación:** para mejorar este proceso se utilizaba la cerveza, vinos jóvenes e incluso el azúcar, que producían CO₂ por fermentación alcohólica.
- **Retardadores:** para aumentar la porosidad del mortero, mejorando su porosidad se utilizaron aceite de lino o de oliva y colas de piel de animales, así como la mezcla de cal viva, leche y azúcar.
- **Pinturas:** para mejorar las cualidades plastificantes, humectantes y cubrientes, y que fuera más homogénea se recurrió al uso de jabones, vinagres, ciertas resinas naturales, aceites y colas de piel de animal.
- **Fijativos:** para fijar pigmentos se utilizó sobre todo el alumbre de potasa, además servía de endurecedor y anti fuego en maderas.
- **Endurecedores:** para endurecer el mortero fueron utilizados aceite de olivo, orines o su mezcla con cerveza y sangre de buey.
- **Hidrófugos:** para disminuir la penetración de agua, y estanqueidad de los vacíos del mortero, pero se tendrá cuidado para no tapar los poros, para estos eran recomendados sebos mezclados a la cal para ser utilizados en acueductos y cisternas, impermeabilizándolas.

Los resultados obtenidos de la aplicación de aditivos y adiciones en restauración no han sido los óptimos, debido al poco control y conocimiento que se tiene de las aplicaciones y la poca existencia de mano de obra especializada, por este motivo es que se recurre al uso de materiales sintéticos, los cuales han demostrado la poca efectividad que presentan para restauraciones.

Por medio de la tradición constructiva, la presencia del uso de aditivos en morteros de cal ha sido constante en diversas culturas, y se ha transmitido hasta nosotros por autores que han datado su utilización, las técnicas del pasado estuvieron en constante evolución, por lo que se realiza un estudio histórico de su utilización.

¹⁴² Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, 94-95.

Hoy en día se realizan clasificaciones de los tipos de aditivos de acuerdo al RILEM, su utilización será determinada por las cualidades exigidas en la puesta en obra y en la finalidad que desempeñe el mortero en su entorno:

TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN EN EL MORTERO
Adhesivos	Aumenta la capacidad de los morteros para unirse a los materiales con los cuales están en contacto.
Aglutinantes y consolidantes	Dar soporte general a una mezcla
Reguladores de cualidades de secado	Regulan el tiempo de secado para que la resistencia se homogénea.
Retardador de fraguado	Aditivo que aumenta el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.
Aireador	Aditivo que permite incorporar durante el amasado una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanece después del endurecimiento.
Acelerador de fraguado	Aditivo que disminuye el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.
Emulsionadores	Producen mayor dureza y estabilidad de la mezcla
Resistencia a heladas	Incluidores de aire y reduce la absorción de agua
Aditivo antiretracción	Aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación.
Modificadores	Modificar la plasticidad para mejorar la Trabajabilidad

Solidificadores, rigidizadores, endurecedores	Cambiar del estado líquido al sólido
Espesadores	Espesa la consistencia de la emulsión
Impermeabilizadores	Propiedad del material, relacionado con el grado de penetración o difusión del agua en su interior a través de su sistema poroso.

Tabla 2. Clasificación de los aditivos por su función en el mortero. Fuente: RILEM

Para efectos de esta investigación, se tomarán en cuenta los aditivos en los que se identifican diversas propiedades para hacer comparativas con un mortero base.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE ADITIVOS EN MORTEROS

Los materiales constructivos, en específico los morteros, constituyen una fuente de información para los investigadores, al constituir un ejemplo de la inventiva y los conocimientos que alcanzaba el ser humano en determinada época. Con los morteros se da un claro ejemplo del aprovechamiento de recursos accesibles para la solución de problemas constructivos.

El uso de aditivos en los morteros de cal, debió ser una práctica común a lo largo de la historia, al pretender realizar mejoras a las propiedades de éstos, el desconocimiento de las características físicas y químicas, debieron dar pauta a la experimentación con los materiales de diverso origen, la presencia de aditivos o adiciones, ha sido constante desde periodos prehistóricos hasta la actualidad y constituye un elemento importante para el estudio de los procesos constructivos.

A lo largo del tiempo, los materiales y procedimientos para la elaboración de morteros estuvieron en constante cambio de acuerdo al desarrollo tecnológico, existe una gran variedad de aditivos empleados en los morteros a lo largo de la historia que son de origen animal y vegetal.

Una de las primeras adiciones datadas en morteros de cal la realiza Álvarez Galindo,¹⁴³ en excavaciones de Jericó (7,000 a.J.C.), donde se encuentran granos de cereales y otros restos orgánicos en el mortero. Aparecen además, en los fragmentos de revestimientos de los hornos de calcinación, mezclados entre los materiales, arcilla, paja o ramas como refuerzo.

Durante este periodo se tienen pocas referencias en cuanto a la utilización de morteros orgánicos, ya que en su mayoría se utilizaron morteros de arcilla y fue utilizado el betún en lugar de mezcla. A. Garciniani indica que es hasta después del reinado de Nabucodonosor, en el área de Mesopotamia, con la caída del uso del betún, se empieza a utilizar la argamasa de cal, y en la ciudad de Nimrud, es combinada con cenizas.¹⁴⁴

Los morteros primitivos tenían poca resistencia, es común encontrar plantas fibrosas e incluso pelos de animales mezclados en ellos para obtener mejores resistencias. Dentro de la investigación histórica se encuentran también la goma arábiga, colas de animales, sangre de hipopótamo, leche de higuera mezclada con yema de huevo y otros productos de adhesivos y aglutinantes. Como retardadores de fraguado y aglutinantes se utilizaron la clara de huevo, jugo de higo, queratinas y caseínas.¹⁴⁵

Se puede afirmar que los morteros de cal, fueron utilizados propiamente por Grecia, de manera general los morteros helénicos estaban hechos a base de cal y arena fina, pero según las necesidades se añadían aditivos.¹⁴⁶ Una de las grandes innovaciones llevada a cabo por los griegos para la mejora de las propiedades de los morteros de cal, fue la utilización de adición de polvo volcánico o puzolana para obtener morteros más resistentes y estables.¹⁴⁷ Es posible afirmar que la adición de materiales puzolanicos mejoraba las propiedades de los morteros de cal, y hoy en día son considerados como el origen de los morteros hidráulicos modernos.

¹⁴³ José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*, 52-59.

¹⁴⁴ A. Garciniani, *Mesopotamia. Problemática y consideraciones generales para un estudio de la construcción*, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II, Historia de la Construcción, EUAT, Sevilla, 1992.

¹⁴⁵ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, p. 147.

¹⁴⁶ José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*, pp. 52-59.

¹⁴⁷ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, p. 16.

Es durante la época de Vitrubio, cuando se tiene la constancia de la aplicación de materiales utilizados en los morteros. Herederos directos de la tecnología y arte de la construcción griega, los romanos utilizaron y desarrollaron las técnicas anteriores y explotaron todas las posibilidades que los morteros otorgaban en la construcción, así como la técnica de añadir a la mezcla diversas sustancias que favorecían las características del mortero, con frecuencia se añadía lava ligera, cenizas, tierra volcánica, tejas, ladrillos o arcillas. Es posible que, para usos particulares, los constructores romanos hicieran uso de aditivos tales como albúmina, la caseína, urea y aceites, sin embargo no existe la certeza de que hayan sido utilizados.¹⁴⁸

Tradicionalmente en esta época se habla ya sobre el empleo de leche de higuera, la pasta de centeno, la manteca de cerdo, la leche cuajada, la sangre, y la clara de huevo, empleadas como reguladores de las cualidades de secado, y en su caso, como retardadores de fraguado, también se utilizaban la sangre y la clara de huevo.¹⁴⁹ Para la aplicación en pavimentos se utiliza como adición el polvo de ladrillo y para estucos se generalizó el uso de polvo de mármol.¹⁵⁰

Durante el periodo medieval, se encuentra la presencia de pelos de animal para alcanzar mayor resistencia; corteza de olmo y agua caliente de cebada para los morteros de estuco. Durante el siglo IX se empleó sangre en los morteros de la catedral de Rochester. Así como el uso de cerveza, cera, jugos de fruta, gluten, goma, arroz, sebo, azúcar y urea.¹⁵¹ Como ya se ha mencionado, el empleo de sustancias orgánicas no se ha podido establecer con claridad, Sickels insiste en que durante dos mil años se dio un patrón de “popularidad y uso continuo de los materiales orgánicos como la sangre, huevos y leche, experimentando solo periodos cortos de desuso.”¹⁵²

¹⁴⁸ José Ignacio Álvarez Galindo, *op. cit.*, pp. 52-59.

¹⁴⁹ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, 2002, p. 147.

¹⁵⁰ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, p. 18-19.

¹⁵¹ *Ibidem.* p. 31.

¹⁵² Lauren B. Sickels y Philip D. Allsopp, “Lime and its place in the 21st century: combining tradition, innovation, and science in building preservation” en *International Building Lime Symposium*, Orlando, Florida, 2005.

A partir del siglo XVIII se producen los aglomerantes hidráulicos, susceptibles a endurecer con el agua las cuales tenían como componente la arcilla, en 1812, Vicat realiza estudio de las mezclas calizas puras y arcillosas y demostró que las propiedades hidráulicas dependen de la cocción entre la cal y los componentes de la arcilla.¹⁵³

Garate Rojas argumenta que ciertos aditivos orgánicos, como la sangre u orina, son medios para la proliferación de floras bacterianas, se forman cultivos de bacterias que dan origen a nitratos que rompen, exfoliando o abombando el mortero, e insiste en la necesidad de realizar las pruebas correspondientes a las antiguas recomendaciones para verificar las cualidades que según ellas debe producir.¹⁵⁴ A continuación se muestra un resumen de algunos de los aditivos utilizados en diversos periodos tiempo y de las propiedades que ofrecían:

Tipo de aditivo	Material orgánico
Adhesivos	Colofonia o resinas de pino, gelatina, colas de animales y vegetales, gluten, caseínas, albumina de sangre y clara de huevo, mucilago de nopal.
Aglutinantes y consolidantes	Albúmina de huevo, zumo de higo, queratinas, caseínas, corteza de olmo, arroz, paja cortada, masa de centeno, copos de algodón, yute, sisal, goma arábica, azúcar.
Reguladores de cualidades de secado	Leche de higuera, pasta de centeno, manteca de cerdo, leche cuajada, la sangre y la clara de huevo
Retardadores	Queratina, sangre, clara de huevo, azúcar, gluten, bórax
Aireadores	Malta, urea, cerveza, queratina.
Aceleradores	Corteza de olmo, agua de cebada, zumo de higo, masa de centeno, manteca de cerdo, cuajada, sangre, almidón, calostros, azúcar.
Emulsionadores	Yemas de huevo, aceites, grasa, ceras, colas, goma arábica, talco, azúcar, zumo de gruta, gluten
Resistencia a heladas	Azúcar
Antiretracción	Cera de abeja
Modificadores	Azúcar, leche, clara de huevo, estiércol, aceite rojo de Turquía, glicerina, glucosa, aceites minerales, resinas, colofonia, higo.

¹⁵³ Louis Josephine Vicat, *Mortars and Cements*, Londres, Architectural Library, 1837.

¹⁵⁴ Ignacio Gárate Rojas, *op. cit.*, p. 147.

Solidificadores, rigidizadores, endurecedores	Azúcar, colas vegetales, colas animales, melazas, mieles,
Espesadores	Sangre, leche agria, caseína, queso, gelatina, goma de tragacanto con agua.
Impermeabilizadores	Colas animales, taninos, betunes, ceras de emulsión, emulsión de aceite mineral cera de abeja

Tabla 3. El uso de aditivos orgánicos y sus propiedades usados hasta 1850. Tabla elaborada con base en los datos proporcionados por Ignacio Gárate Rojas en su libro *Artes de la cal*.

RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

A lo largo de la historia, es notable la presencia de aditivos y adiciones en los textos dedicados a la Arquitectura por parte de diversos escritores. En Italia fue publicada una recopilación bastante detallada de recetas de morteros, en su mayoría estas recetas provienen de tratados teóricos de la arquitectura desde el siglo XV hasta el XIX.¹⁵⁵ En estos tratados se mencionan el uso de los aditivos orgánicos pero sin un carácter técnico específico.

Durante el siglo II a.J.C. los romanos dieron un gran salto en la tecnología constructiva al descubrir el mortero concrecionado o también conocido como *Opus Caementicium*¹⁵⁶, es decir, la argamasa obtenida mediante la mezcla de la piedra volcánica del Puzzoli molturada y la cal, que generaban un mortero al que se le añadían gruesos durante la ejecución, este mortero es descrito por Vitruvio como un ingrediente que permitía fijar y mantener su dureza bajo el agua:

Encontramos también una clase de polvo que encierra verdaderas maravillas, de un modo natural. Se da en la región de Bayas, en las comarcas de los municipios situados cerca del volcán Besubio. Mezclado con cal y piedra tosca, ofrece una gran solidez a los edificios e incluso en las construcciones que se hacen bajo el mar, pues se consolida bajo el agua...

También hace referencia a la conveniencia de usar polvo de ladrillo a los morteros de cal, establece que una vez que la cal este apagada, se mezclará una porción con tres de

¹⁵⁵ Carla Arcolao, *Le ricette del restauro: malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, Marsilio Editori, 1998, p. 42.

¹⁵⁶ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *Op. Cit.*, p. 17.

arena, si es de cantera y dos si es de río o de mar. Además comenta que será más firme y sólida al agregar arena de río o de mar, con una tercera parte de ladrillos molidos y cernido el polvo restante, también habla de que a los morteros a los que se agrega este material son efectivos en lugares húmedos.

Los romanos propagaron el uso del mortero de cal y lograron perfeccionarlo mediante la adición de puzolanas¹⁵⁷. El empleo de adiciones puzolánicas conferían al mortero propiedades hidráulicas, siendo obligatorio su uso en las obras públicas durante el imperio romano, cuando no se disponía de materiales volcánicos, se emplearon otro tipo de sustancias como arcilla cocida y teja picada, con las que obtuvieron una considerable mejora de las propiedades de los morteros.¹⁵⁸

La puzolana no se encontraba en abundancia en el noroeste de Europa, por lo que se tuvieron que buscar otras alternativas, ya que su importación elevaba el costo de la obra. Spackman¹⁵⁹, afirma que se utilizaron materiales artificiales como el magnesio, demostró que mediante la adición de un mineral de hierro calcinado se podía sustituir la puzolana.

Igualmente, en 1570, el arquitecto italiano Andrea Palladio¹⁶⁰ hizo referencia a una cal extraordinaria que resultaba al calcinar una piedra calcárea que poseía propiedades hidráulicas: "La cal obtenida de esta piedra fragua inmediatamente y puede utilizarse tanto para obras en contacto con agua como las que estén expuestas a la alteración de la intemperie". La piedra calcárea a la que Palladio aludía era una caliza margosa. Hoy en día se conoce que, la cal hidráulica también se puede conseguir mediante la mezcla de calizas y arcillas.

¹⁵⁷ Citado en: K. Callebaut, et al., "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven,Belgium) Natural hydraulic lime or cement?" en *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, Núm. 3, 2001, pp. 397-403.

¹⁵⁸ R. Malinowski, "Ancient mortars and concretes. Aspects of their durability" en *Histoire of technology*, Vol. 7, Marsell, U.K., 1982, pp. 89-101.

¹⁵⁹ C. Spackman, *Some Writers on Lime and Cement From Cato to Present Time*, W. Heffer & Sons, Ltd., Cambridge, England. 1929.

¹⁶⁰ Andrea Palladio, *Los cuatro libros de la arquitectura*, Madrid, Imprenta real, 1797.

A partir del Siglo XVI, se encuentran una serie de tratados o recomendaciones constructivas en donde se especifica el uso de aditivos naturales en morteros, de acuerdo al uso al cual será destinado. En 1582, León Baptista Alberti, en su libro séptimo de *Los diez libros de Arquitectura*, al hablar sobre los ornamentos de las paredes sagradas, hace referencia al templo de Minerva, donde advierte el uso de “cal sobada con azafrán y leche” como cubierta, donde la leche mejoraba la plasticidad, mientras que el azafrán, el cual contiene propiedades colorantes y pudo ser utilizado para dar color al revestimiento.

Christiano Rieger, en su obra *Elementos de toda la arquitectura civil*, hace una serie de recomendaciones para unir las piezas de mármol, aconseja el uso de varias mezclas que estarán entre los elementos.¹⁶¹ La mezcla más sencilla que recomienda es de polvo de ladrillo y cal, útil también para unir las piezas de estatuas, o una piedra con otra, o piedra con madera, o también madera con madera, además establece que la mezcla queda muy buena y firme cuando la argamasa se hace de cuajada de leche y cal viva, lo que resulta en una mezcla muy acuosa, esta mezcla se realiza en un estanque o en un receptáculo, el cual deberá resistir mucha cantidad de agua, y para ello las piedras tendrán que ser unidos con diversas mezclas, compuestos de polvos de piedra de cantera, con aceite de linaza, estopa, etc. Hace también otra recomendación que para él, es más efectiva, a continuación se hace la transcripción:

La mejor composición en mi juicio, y cuyo efecto más 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 quartillos de polvo de ladrillo, y quatro onzas de litargirio; 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”

En este caso es notable el uso de adiciones como polvo de cantera, hierro, toba, ladrillo, puzolanas y litargirio, para conferir consistencia a la mezcla. El último

¹⁶¹ Christiano Rieger, *Elementos de toda la arquitectura civil*, Madrid, Impreso por Joachin Ibarra, 1763.

elemento mencionado, el litargirio, es un polvo amarillo, el cual contiene un alto grado de plomo, puede llegar a contener el 80% en su composición, por lo que su uso puede ser riesgoso para la salud. Una vez molidos estos elementos se pasaban por un “zedazo de cerdas de caballo”, el cual era un instrumento para cernir o cribar, que tenía la finalidad de separar lo más fino de las sustancias.

Una vez elegidos los polvos más finos, se mezclaban con aditivos como el aceite de linaza, el cual proporcionaba impermeabilidad a la mezcla y finalmente se agregaban fibras como pelo de cabra o algodón, los cuales garantizaban resistencia y estabilidad. Posteriormente en 1841, Plo y Camin.¹⁶² hace referencia al uso de sangre de borrego para mejorar la adherencia del mortero: “...y agregarás un cuarto de esta proporción de sangre de borrego para que el estuco se pegue bien a la piedra...”.

Las propiedades que otorgan la cal, las hace aptas para ser reutilizadas en la construcción asegura Fornés y Gurrea, quien nombra a esta mezcla como “mortero negro”, el cual indica que al mezclar dos partes de argamasa blanca y otra de tierra de los derribos de las paredes antiguas, se observará una resistencia tenaz, esto se debe a la fuerza que adquiere la piedra de cal calcinada, que mientras más humedad percibe, más se endurece.¹⁶³ Este proceso como ya se mencionó es llevado a cabo en la construcción de la Catedral de Morelia.

A partir de la obra del químico francés Vicat (1814), establece las bases para la preparación de los aglomerantes artificiales, al calcinar mezclas dosificadas de arcilla y cal, y sienta las bases para la utilización de los morteros hidráulicos. Es en 1859, cuando P. C. Espinoza habla sobre las propiedades que describe Vicat con anterioridad, insiste en que la calidad de los polvos se ve comprometida por que están demasiado o muy poco conocidos, y no producen buenos resultados en las construcciones. Considera que el grado de cocción influye en la calidad de las

¹⁶² Antonio Plo y Camin, *El Arquitecto Práctico*, Civil, Militar y Agrimensor, dividido en tres libros, Madrid, Imprenta de Pantaleón Aznar, 1767.

¹⁶³ Manuel Fornés y Gurrea, *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*, Valencia, Imprenta de Cabrerizo, 1841, pp. 12-13.

puzolanas, recomienda utilizar las cenizas de hulla ya que se emplean como puzolanas estando puras, así como la arcilla.¹⁶⁴

Posteriormente en 1898, Florencio Ger y Lobeiz hace una serie de recomendaciones para chapas o revestimientos impermeables, en su obra sugiere el uso de arcilla batida para cerrar las grietas y en los bordes para unirlos y evitar que salga humedad entre ellos.¹⁶⁵ Algunas de las mezclas hidráulicas que recomienda son: la cal recién hecha polvo, arena de río y detritus en partes iguales; el llamado mastic de Vauban y el mastic ferruginoso.

El mastic de *Vauban* está compuesto de cinco a seis partes de cal apagada con aceite de linaza y de dos de teja pasado por tamiz, dejando reposar una noche y al día siguiente batirla por media hora antes de ser usada mientras que el mastic *ferruginoso*, compuesto de una parte de cal viva en polvo y apagada en sangre de buey con dos partes de teja o ladrillo molido y una pequeña parte de limaduras de hierro. Esta mezcla debe batirse para que forme una pasta suave y perfectamente homogénea.¹⁶⁶ En este ejemplo, la sangre no es utilizada como aditivo, sino que sustituye al agua en el proceso de apagado de la cal, lo cual sugiere el autor, proporciona mejores propiedades a la mezcla.

Para la impermeabilización propone el uso de cal apagada en polvo, limaduras de hierro y medio kilogramo de alumbre de roca disuelto en agua puesta al fuego. Se aplica sobre un encascotado de ladrillo nuevo y buen mortero común cuando está bien seco. Se cierran con cuidado las grietas que se abren en el enlucido hasta dejar éste terso. En este estado se va secando con un trapo seco o esponja y varias veces al día la humedad que despida el enlucido hasta dejado seco. Entonces se hace un segundo enlucido con cemento, mortero fino y aun yeso.¹⁶⁷ En intervenciones

¹⁶⁴ Espinosa, P.C., *Manual de construcciones de albañilería*, Madrid, Imprenta a cargo de Severiano Baz, 1859, p. 68.

¹⁶⁵ Florencio Ger y Lobeiz, *Tratado de construcción civil*, Badajoz, La Minerva Extremeña, 1898., p.236.

¹⁶⁶ *Ibidem*.

¹⁶⁷ *Ibidem*

actuales, es común el uso de alumbre para impermeabilizaciones, esto queda establecido en manuales destinados a la conservación.¹⁶⁸

Otra preparación para un revestimiento impermeable que Ger y Lobeze recomienda por su poco coste, es el siguiente: hacer una mezcla de 15 partes en volumen de cal viva, 5 de arena limpia y 80 de ceniza de lignito¹⁶⁹ pasada por tamiz de cenizas de carbón y de turba, o de leña, primero se apaga la cal y después se añade a la mezcla la cantidad de agua suficiente para que se haga plástica sin dejar de ser consistente. Inmediatamente se tiende y se comprime bien con la paleta, y cuando está bien seca esta capa, se le recubre, de una mano de alquitrán o de pintura al óleo.

Para obtener una mezcla hidrófuga se hace hervir en un caldero de hierro, durante 20 minutos, grasa con alquitran, al cual se le agregarán cal apagada seca, se remueve con una espátula de hierro y una vez que este preparada la mezcla, se agrega vidrio molido y tamizado. Para su aplicación se coloca en capas de 2 a 3 centímetros de espesor. En paredes salitrosas se utiliza cera fundida, aceite de linaza cocido con litargirio, para formar un enlucido hidrófugo.¹⁷⁰

El mismo autor hace referencia a una mezcla utilizada para solados, en las que se mezcla la cal hidráulica en polvo, cenizas de polvo y gavilla lavada, una vez realizada la mezcla, se amasa con sangre de buey hasta obtener una masa homogénea. El mortero se prepara dos semanas o un mes antes de su empleo, y tendrá que ser batido diariamente con pisón de hierro.¹⁷¹

Como morteros impermeabilizadores hace la recomendación de colocar una capa de mortero de cal con arena y asientos de aceite¹⁷², así como el uso de jabón untado en las partes interiores del muro.¹⁷³

¹⁶⁸ Torres Garibay, Luis Alberto (Coord.), *Op. Cit.*, 2009.

¹⁶⁹ El lignito es un carbón mineral que se forma por compresión de la turba, convirtiéndose en una sustancia desmenuzable en la que aún se pueden reconocer algunas estructuras vegetales. Es de color negro o pardo y frecuentemente presenta una textura similar a la de la madera de la que procede.

¹⁷⁰ *Ibidem*

¹⁷¹ *Ibidem*, p. 306.

¹⁷² *Ibidem*, p. 419.

¹⁷³ *Ibidem*, p. 505.

MORTEROS PREHISPÁNICOS

En Mesoamérica es notable el uso de la cal en la construcción, la mayoría de las construcciones fueron recubiertas con aplanados o acabados a base de cal, además del uso en pisos, lo que permitió la convivencia urbana en condiciones sanitarias. En Teotihuacán se destaca el uso de la cal, las superficies aplanadas con cal fueron aprovechadas para decorarlas y pintarlas, el uso también se da en una parte fundamental para la estructura, para unir piedras como mortero para dar cohesión y resistencia a las estructuras.

En el México antiguo se emplearon mezclas de cal aérea con vidrio volcánico, tezontle, piedra pómez molida en pisos y recubrimientos en Teotihuacán y el Templo Mayor, obteniéndose elementos arquitectónicos de una dureza excepcional.¹⁷⁴ Otros elementos fueron utilizados como la escoria de fundición y ladrillos molidos, y además se tienen referencias, aunque no comprobadas de la utilización del mucílago de nopal en estas zonas.

La adición de mucílago de nopal a los morteros es poco conocido a nivel internacional, desde la época prehispánica se tienen referencias de que el mucílago de nopal se empleó como aditivo en las pastas a base de cal para facilitar su manejo y aplicación, así como a mejorar sus propiedades una vez fraguadas. Muchos de los usos de la baba de nopal han continuado a través del periodo histórico y hasta la actualidad a través de las técnicas tradicionales de construcción en nuestro país.¹⁷⁵ Fidel Fabián Calderón sugiere el uso la baba de nopal para obras de restauración, en especial para aplanados ya que en su experiencia proporciona adherencia a la mezcla.

Una de las ventajas principales en el uso del nopal, es que como planta cactácea se encuentra fácilmente por todo el territorio mexicano. Sobre su composición Helia

¹⁷⁴ Haydeé Orea Magaña, “El uso de la cal en la conservación de los monumentos arqueológicos e históricos: de la teoría a la práctica” en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal...*, *Op. Cit.*, p. 147.

¹⁷⁵ Sandra Cruz Flores, “El mucilago de nopal como aditivo en las pastas de cal empleadas en conservación” en Luis Barba Pingarrón, e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia, propiedades y usos*, UNAM/Instituto de Investigaciones Antropológicas/ANFACAL, 2013, p. 187.

Bravo-Hollis,¹⁷⁶ reporta la presencia de un alto contenido de agua, componentes minerales como el calcio y el potasio, carbonatos, cloruros y potasios. También se componen de un significativo contenido de carbohidratos, almidón, fibra cruda, sustancias pécticas y ácidos orgánicos, entre los derivados de los procesos metabólicos.

En cuanto a la obtención de la baba de nopal, se han estudiado distintos métodos, el más común es cortarlo en pequeños fragmentos, agregarle agua y dejarlo en maceración por al menos una noche, algunos lo hierven con la intención de acelerar el proceso, sin embargo la mezcla en frío presenta mejores resultados. La baba de nopal, al igual que otros aditivos se añade de forma tradicional de acuerdo con las plantas y árboles de la región geográfica que se trate.

El uso de los morteros de cal como material estructural se aprecia principalmente en la zona maya. “Gracias a este material la cultura maya pudo desarrollar sus bóvedas y sus cresterías, que produjeron una arquitectura más esbelta y elevada, cosa que no pudieron alcanzar en lugares en donde el mortero utilizado era a base de arcillas.”¹⁷⁷

Para la elaboración de las mezclas, el material utilizado de menor proporción es la cal, mientras que los áridos ocupan la mayor parte del volumen. Earl H. Morris en su libro *Templos de los Guerreros de Chichen Itzá*,¹⁷⁸ hace un acercamiento a las técnicas tradicionales de producción de la cal, expone la forma en que se elaboraban los morteros de cal, de acuerdo con los relatos de los trabajadores del sitio, describe las proporciones, la forma en la que se mezclaban los morteros y como se apisonaba el estuco para lograr dureza.

Son muchas las referencias sobre el uso de aditivos para la construcción de edificios en diversas partes del mundo, en el área maya Fray Diego de Landa en su *Relación de las cosas de Yucatán*, hace referencia a la utilización de la corteza de diversos árboles “... y

¹⁷⁶ Helia Bravo-Hollis, *Las cactáceas de México*, México, UNAM, 1978, p. 62.

¹⁷⁷ Luis Barba Pingarrón, “El uso de la cal en el mundo prehispánico mesoamericano” en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia...*, *op. cit.*, p. 23.

¹⁷⁸ Earl H. Morris et. al., *Templos de los Guerreros de Chichen Itzá*, Yucatán, 1931, pp. 223-224.

otros de cuyas cortezas mojadas, hacen un caldo para bruñir con él los encalados, y los hace muy fuertes”.¹⁷⁹ En el área que ocuparon los mayas, se tiene el conocimiento de varias especies de árboles que tienen la cualidad de proveer sustancias glutinosas a partir de la maceración de sus cortezas.

El uso de aditivos orgánicos se dan sobre todo para la realización de acabados, Vázquez de Ágredos encuentra un documento anónimo fechado en 1548, en relación sobre el modo de hacer las pinturas, en la cual se menciona que la cal utilizada para los soportes de pintura mural era preparada con ciertos aditivos orgánicos,¹⁸⁰ así como Fray Diego de Landa, señala la utilización las cortezas de árboles para bruñir encalados y hacerlos más resistentes.

Los aditivos procedentes de las cortezas de los árboles, otorgaban a las pastas de cal mayor dureza, mejor manejo y evitaba la aparición de fisuras durante el proceso de secado, los arboles estudiados fueron el *chukum*, *chakaj*, *pucté*, *jabín*, y *pixoy*.¹⁸¹ Una vez realizados los estudios se concluye que el los morteros con extracto de *chukum*, otorgaba mejoras a las cualidades de los recubrimientos de sacrificio con fines de conservación.

En Michoacán, se contaba con la presencia del imperio purépecha, su construcción más importante, conocida como las *Yácatas*, se edificaban con piedra acomodada a mano, sin aglomerantes, mientras que en la arquitectura habitacional los cimientos eran de piedra con muros elaborados de adobe y techos de madera.¹⁸² El uso de la cal como aglomerante es poco conocido en esta región, es hasta la etapa colonial que su uso se desarrolla.

¹⁷⁹ Fray Diego de Landa, *Relación de las cosas de Yucatán*, Yucatán, manuscrito, 1566, p. 130.

¹⁸⁰ María Luisa Vázquez de Ágredos, et al., "Pigmentos locales e importados en la decoración mural de los palacios de la Acrópolis de La Blanca: caracterización científica e interpretación." en *Técnicas analíticas aplicadas a la caracterización y producción de materiales arqueológicos en el área maya*, México, UNAM, 2012, pp. 11-29.

¹⁸¹ Claudia García Solís y Yareli Jáidar Benavides, "El uso de aditivos orgánicos en mezclas de morteros de cal en al área maya" en Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal...*, op. cit., p. 118.

¹⁸² Luis Silva Ruelas, *Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1990, p. 40.

En Tiripetío Michoacán se edificaron tapiales de adobe, es decir una mezcla de arcilla, arena y paja, para estabilizar la mezcla se utilizaba crín de caballo, heno seco, y excrementos de determinados animales así como también fibras vegetales, además de los tapiales de adobe se utilizaba un mortero artesanal de cal que iba mezclado con aditivos orgánicos, proporcionaban.¹⁸³

MORTEROS EN EL PERIODO VIRREYNAL EN MORELIA

Durante la llamada época colonial y con el sincretismo de dos culturas, se dio paso a una fusión que se ve reflejado en las expresiones formales del periodo y en las tecnologías de producción de cal, las técnicas tradicionales se mezclaron, como lo indica Fidel Fabián Calderón en su tesis;

“En los monumentos prehispánicos los estucos, bruñidos de cal-arena, fueron, muchas veces, el elemento constructivo portante de murales y ornamentaciones, que continuó utilizándose en la fábrica de los edificios a partir del siglo XVI, aprovechando el conocimiento de los naturales.”¹⁸⁴

El colegio San Miguel de Guayangareo fue el primer edificio construido de mampostería en Morelia, como lo señala Carlos Herrejón Peredo “El Colegio funcionó los primeros seis años (1549-1554) en una modesta construcción de adobe. Más tarde se cambió a una sólida residencia de cal y canto,”¹⁸⁵ simultáneamente a esta construcción se edificó el molino, en el cual se utilizó cal traída de Iztapa (Etúcuaro) por los indios, con la finalidad de que un maestro albañil de México dirigiera la construcción.

Cuando se estableció en Valladolid la sede episcopal en 1580, la ciudad contaba apenas con unas cuantas casas, la catedral provisional y el templo de San Francisco, construidos con materiales endebles, es decir de adobe, techo de viguería y cubierta

¹⁸³ Aurelio Álvarez Pérez, *et. al.*, “El tapial y los morteros de cal en las construcciones de históricas de Tiripetío (Morelia, México)” en *Macla*, Sociedad Española de Mineralogía, núm. 11, septiembre 2009, p. 23.

¹⁸⁴ Fidel Fabián Calderón, *Monasterios agustinos michoacanos del siglo XVI*, tesis de maestría, Morelia, UMSNH, p. 121.

¹⁸⁵ Carlos Herrejón Peredo, *El Colegio de San Miguel de Guayangareo*, Morelia, UMSNH, 1989, p. 9.

de tejamanil. Para 1610 el convento y templo de San Francisco serían los primeros edificios realizados de cal y canto.¹⁸⁶

Silva Ruelas en su obra *Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid*, hace un recuento sobre los procesos y materiales de construcción durante los siglos XVI y XVIII,¹⁸⁷ se presume que las referencias a las que hace alusión sobre el uso de aditivos fueron obtenidas de manera empírica, por medio de la transmisión de la tradición constructiva que los trabajadores aún conservan, ya que no realiza análisis físicos o químicos de los morteros utilizados en la ciudad.

Sobre el uso de la cal, menciona que el material provenía del calcinado de la caliza pura, fabricada con piedras de grano fino del tipo más dura, para las partes estructurales, mientras que la cal de piedras porosas servirá para los estucos. En cuanto a las proporciones, especifica que serán de tres partes de arena y una de cal; si se usa arena de río fina o arena de playa marina, se usaran dos partes de arena y una de cal.

En cuanto a los procesos de extracción de la cal a manera local, el mismo autor señala que las calizas para la fabricación de la cal no existen en el valle donde se fundó Valladolid, pero si se localizan en regiones cercanas, las vetas de cal se localizaron en Cuitzeo, Acámbaro, Yuriria y en Iztapa o Etúcuaro. De Etúcuaro se menciona que la cal fue usada para los molinos Colegio de San Miguel.

Para la construcción de la actual Catedral, fabricada en su totalidad de cantera, desde los cimientos hasta la coronación de muros, cúpulas y torres,¹⁸⁸ Sobre la construcción de la Catedral de Morelia, se tienen documentos donde se presentan especificaciones constructivas, respecto al altar mayor y de los Reyes se dice que el constructor

¹⁸⁶ Gabriel Silva Mandujano, "La cantera en la historia de la arquitectura moreliana", en: *Memoria del primer foro internacional, la piedra de cantera en Morelia: Retrospectiva y perspectivas*, Morelia, Dirección de acción social y cultura, 1998, pp. 39-40.

¹⁸⁷ Luis Silva Ruelas, *Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1990, pp. 22, 52, 62.

¹⁸⁸ Gabriel Silva Mandujano, "La cantera en la historia de la arquitectura moreliana" en: *Memoria del primer foro internacional, la piedra de cantera en Morelia: Retrospectiva y perspectivas*, Morelia, Dirección de acción social y cultura, 1998, p. 40.

“Hechó por tercias partes para mezcla, una parte de cal y otra de arena y otra de la misma tierra que sacaba de los cimientos”.¹⁸⁹ En este caso se hace mención del uso de materiales de reciclaje en las nuevas mezclas.

En cuanto al aparejo de los ladrillos, se hace mención a la presencia de una adición: “Y pasado a hacer regulación del costo que (de la) torta, que sobre dicho ladrillo ha de llevar, haciendola de mezcla fina con tezontlale”.¹⁹⁰ Este material, el tezontlale, se refiere a la arena de una piedra ligera y porosa, que se mezcla con cal para la construcción.¹⁹¹

En relación a los aplanados de los edificios de la ciudad, Gárate Rojas¹⁹² también hace referencia al uso de morteros de lodo, mezclados con hierbas, paja o estiércol, esta mezcla se usaba como lechada en el Colegio de las Rosas, el templo de la Merced y el Convento de Charo. Para la fabricación de morteros se utilizaba la proporción ya mencionada “una de cal por tres de arena” en volumen, además menciona el uso de antiguas recetas utilizadas por viejos maestros albañiles del Barrio de San Juan, que agregaban lana de borrego, sangre de animales o leche, según ellos para dar mayor resistencia a la mampostería, además de estos aditivos también menciona el uso de sal para las pinturas:

Para obtener el producto (pintura de cal), se coloca agua limpia en un recipiente, hasta la mitad de la cantidad que se pretende fabricar; se añade pasta de cal apagada in situ poco a poco y se disuelve revolviendo con una pala de madera, hasta obtener una consistencia de atole, se adiciona también un buen puñado de sal de nevar (unos 259 gr por 20 litros de pintura), la cual igualmente debe disolverse agitando el líquido.(...) La pintura de cal puede colorearse con productos comerciales en forma de polvos.¹⁹³

Un elemento distintivo de la ciudad, que en su momento proporcionó a la ciudad el abastecimiento de agua, al sustituir los primeros canales de barro y canoas de madera

¹⁸⁹ AGI, Audiencia de México, Leg. México 375, Ramo 4-1591-1620, Fols. 251-384.

¹⁹⁰ AGI, Audiencia de México, Leg. México 1052, s/f.

¹⁹¹ Esther Hernández, *Vocabulario en lengua castellana y mexicana de fray Alonso de Molina*, Madrid, CSIC, 1996.

¹⁹² Luis Silva Rúelas, *Los Acabados en los Muros de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1991, p. 59.

¹⁹³ Luis Silva Rúelas, *Los Acabados...*, *op. cit.*, p. 59.

por estructuras más resistentes de arquería y cantera. Es a finales del siglo XVIII cuando el obispo fray Andrés de San Miguel, dispuso la reconstrucción del acueducto, que mostraba indicios de arruinarse,¹⁹⁴ José Zavala Paz en su obra *El acueducto en su segunda centuria*, habla del proceso de reconstrucción, donde sugiere el uso de sangre y mucilago de nopal en su estructura;

No pocas dificultades hubo de sortear el hábil señor Huarte tales como la carencia de cal que se traía de las minas de Etúcuaro y que por destinarse a la construcción de la Factoría faltaba de los arcos. Dícese a este respecto que al agua con que apegaban esta cal que destinaban al Acueducto le mezclaban pencas de nopal bien picaditas y sangre de toro para hacerla más coagulante.¹⁹⁵

Como ya se mencionó, los aditivos pueden clasificarse en orgánicos o inorgánicos, los materiales orgánicos presentan dificultades al momento de identificarlos y comprobarlos científicamente debido a las características fisicoquímicas de los productos, ya que al ser materiales orgánicos pasan por un proceso de degradación. Además de las referencias obtenidas en fuentes escritas sobre el uso de aditivos a los morteros, se sabe de ellos a partir de la tradición oral. A lo largo del tiempo los maestros constructores o personas involucradas con el manejo de los materiales han transmitido sus conocimientos por generaciones.

Estas referencias proporcionan información para corroborar la hipótesis de que se utilizaron aditivos y adiciones en morteros de cal de manera empírica, no solo en la cultura oriental, sino también se tienen referencias de aditivos usados en América antes y después de la conquista, y que su utilización, a pesar de no estar comprobada de manera científica, fue constante a lo largo del tiempo y ha llegado hasta nuestros días.

REFLEXIONES

Como se ha observado hasta ahora, la presencia de los aditivos en la historia ha estado presente a través de la literatura y de la transmisión oral, por medio de

¹⁹⁴ Gabriel Silva Mandujano, *op. cit.*, p. 44.

¹⁹⁵ José Zavala Paz, *El acueducto en su segunda centuria*, Morelia, ELECTROLETRAS, 1985, p. 87.

diversas investigaciones se ha corroborado la presencia del uso de aditivos, pero aún no se ha llegado a establecer claramente cuáles son los que se han utilizado y las proporciones en las que se deben utilizar.

Los aditivos y adiciones han sido un componente importante en la tecnología tradicional de los morteros de cal. Estas sustancias por lo general proveen mayor trabajabilidad, dureza, y una menor permeabilidad al vapor de agua, lo cual debe considerarse cuando son utilizados con fines de restauración, sin embargo, el tema aún sigue siendo muy complejo, debido a las variables geográficas y físicas, así como a la técnica utilizada para su elaboración. Las proporciones de los aditivos y adiciones varían en cada caso, dependiendo de la experiencia del restaurador o de los trabajadores, también es variable el proceso del tratamiento del material calcáreo, se requiere unificar el proceso de producción, tomando como base las técnicas tradicionales, pero siempre procurando un avance en su tecnología.

A través de la literatura revisada es posible tener un acercamiento al modo en el que eran elaborados, además de esta revisión bibliográfica, se requiere de poner en práctica la reproducción de morteros con aditivos, para corroborar, o en su defecto, descartar las propiedades que se dice otorga al mortero, y con ello proponer métodos de intervención más acertados que garanticen la permanencia del patrimonio de la humanidad.

En nuestro país, los mejores resultados se han obtenido con mezclas tradicionales, así se asegura la compatibilidad del material de intervención con el original, sin embargo a pesar del buen funcionamiento de estos morteros, es necesario controlar algunas de sus propiedades, como son, la plasticidad, el tiempo de fraguado, manejabilidad, durabilidad, resistencia, etc.

En nuestra ciudad, es necesario promover estudios específicos sobre el uso de aditivos en morteros, son pocos los autores que de forma breve mencionan su utilización, se pretende reunir la información disponible en esta investigación, y con ello el fomento del rescate de la cultura constructiva local, para proporcionar a los

restauradores técnicas de intervención compatibles y al mismo tiempo abrir nuevas líneas de investigación.

Casi cada reparación para albañilería histórica requiere el uso de mortero. La importancia de la selección de un mortero adecuado, ya sea para rejuntado o reconstrucción, no puede ser subestimada debido a las funciones estructurales y estéticas que el mortero tiene en la construcción de mampostería.¹⁹⁶

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ADITIVOS EN LOS MORTEROS DE CAL

El conocimiento de las propiedades de los aditivos orgánicos e inorgánicos presentes en los morteros de cal, proporciona una noción más objetiva de los beneficios que otorgan estos materiales a las mezclas.¹⁹⁷ Los aditivos mencionados en la bibliografía, así como en las recomendaciones de los constructores, fueron estudiados en relación a las características otorgadas a los morteros, para corroborar que su uso influye en sus propiedades físico-mecánicas.

La adecuada calidad de los morteros de restauración que serán utilizados en trabajos de intervención es primordial para garantizar su durabilidad, por lo que los materiales reunidos deben contar con cualidades técnicas eficaces, compatibles con el

¹⁹⁶ Lorraine Schnabel, “Mortar Analysis” en *Practice Points*, Núm. 5, 2008, p. 10.

¹⁹⁷ Sandra Cruz Flores, “El mucilago de nopal como aditivo en las pastas de cal empleadas en conservación” en Luis Barba Pingarrón, e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia, propiedades y usos*, UNAM/Instituto de Investigaciones Antropológicas/ANFACAL, 2013, p. 190.

soporte de la obra.¹⁹⁸ En este capítulo se realizaron una serie de pruebas en morteros de cal en combinación de diferentes aditivos de origen orgánico e inorgánico. Los fueron seleccionados de acuerdo a su presencia histórica pero también, aquellos que actualmente son utilizados. El objetivo es el diseño de morteros para revestimientos, juntas constructivas, consolidantes e impermeabilizantes, posibles para ser utilizados en edificios de materiales pétreos. En este caso se tomaron en cuenta estos aspectos para el diseño de morteros de restauración:

- 1) Selección de los componentes de los morteros que cumplan con el requisito de compatibilidad para hacerlos apropiados para intervenciones de restauración.
- 2) Identificación de las dosificaciones adecuadas, en cuanto a las proporciones de agua y aditivos, para adquirir las propiedades en estado fresco y endurecido.

ELABORACIÓN DE MORTEROS DE PRUEBA

La preparación de los morteros se realizó en base a la norma NMX-C-085-ONNCCE-2010, la cual establece el método estándar para efectuar el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos. Este método de ensayo se aplica cuando se quiere mezclar pastas o morteros de cementantes hidráulicos para obtener una trabajabilidad o consistencia definida.

Pero ya que no se tiene una norma específica para el estudio de morteros de cal con aditivos, se realizaron modificaciones en algunas etapas del procedimiento de acuerdo a los requerimientos de cada uno de los materiales, ya que se encontró que cada muestra es diferente en relación a las características que presenta el aditivo.

MATERIALES UTILIZADOS

La experimentación se realizó en morteros con adiciones porcentuales de acuerdo a las características particulares de los aditivos, en algunas ocasiones se buscó sustituir una cantidad determinada de agua por los aditivos y en ocasiones éstos fueron

¹⁹⁸ Jesús Espinosa Gaitán, “Estudios de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervenciones del IAPH (Sevilla)”, en Alejandro Sánchez, Francisco Javier *et al* (Coord.), *La cal: Investigación, patrimonio y restauración*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2014, p. 40.

adiciones a las proporciones ya establecidos. Se elaboraron una serie de muestras con aditivos y sin aditivos, sirviendo como referencia y comparativo del comportamiento. Los materiales que se utilizaron en la presente investigación son los siguientes:

Disolvente: como disolvente se utilizó agua potable, ya que al estar libre de sales proporcionan las cualidades para que el mortero pueda fraguar. El agua es dosificada en volumen, de manera que proporcione al mortero la docilidad necesaria para su empleo. Para la elaboración de morteros compuestos únicamente por cal y arena se requieren grandes cantidades de agua para el amasado. Lo cual lleva a una elevada retracción durante el secado, por lo que se propone reducir el uso del agua por medio del uso de aditivos líquidos específicos.

Conglomerante: El material encargado del proceso de fraguado y endurecimiento en este caso fue la cal. La cal empleada para la elaboración de las muestras fue cal grado construcción, ya que el proceso de preparación es más rápido, y por lo tanto se disminuyen los tiempos y costos de preparación en obra, además se garantizan propiedades más homogéneas y un 90% de pureza hidróxido de carbono.¹⁹⁹

En este caso se utilizó la cal tipo comercial o también conocida como “cal Muro” (Fig. 9), de la empresa michoacana “Calizas de Michoacán”, la cual tiene sus yacimientos en Piedras de Lumbre, Municipio de Jungapeo y actualmente cuenta con una sucursal en la carretera de San José-Zinapécuaro, San José de la Trinidad, Morelia.

¹⁹⁹ Cal Muro para construcción. Cal apagada hecha a base de piedra caliza calcinada a altas temperaturas, hidratándole después para obtener un producto de la más alta calidad. La cal Hidratada es envasada en bolsas de papel kraft de 25 kg.



Figura 9. Cal Muro

Propiedades de la Cal:

- ✓ Contenido de Hidroxido de Calcio $Ca(OH)_2$
- ✓ Pureza >90%
- ✓ Impermeable
- ✓ Apariencia uniforme
- ✓ Permeabilidad
- ✓ Durabilidad

Las cales artesanales en pasta ofrecen muy buenos resultados en cuanto a la calidad técnica y durabilidad, cuando la cantidad de agua durante el amasado está debidamente controlada, pero también se ha encontrado que las cales en polvo otorgan resultados suficientemente buenos a los morteros y no tienen el inconveniente de de la puesta en obra de la cal en pasta, la cual requiere un añejamiento considerable.

USO DE LA CAL EN MORTEROS			
Cal preparada “in situ”		Cal en polvo industrializada	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ● Garantía de composición 	<ul style="list-style-type: none"> ● Selección de materias primas. ● Espacio para apagar la cal. ● Tiempo de apagado de la cal. ● Dosificación en peso ● Costo de mano de obra. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Menor espacio (solo requiere almacenaje). ● Dosificación correcta. ● Listo para aplicar una vez se amase. ● Control de calidad en fábrica. ● Certificación del control de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Desconocimiento de la composición

Tabla 4. Uso de la Cal en Morteros. Elaborado por MGDC.

Árido: La norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 especifica que la arena utilizada para elaborar los especímenes debe ser de cuarzo, de grano redondeado y sin pulir. La

arena graduada se debe manipular de modo que se evite la segregación, ya que las variaciones en su granulometría causan variaciones en la consistencia del mortero. Se recomienda que los sacos de arena al ser entregados al laboratorio se vacíen y mezcle su contenido por medio de una pala o cucharón. Después, si así se desea, puede volverse a llenar el saco y tomarse la arena directamente de él, según se vaya necesitando.

El árido que se utilizó en este caso es arena de río, extraída de la corriente del Río Huajumbaro, perteneciente a la región hidrológica “Balsas”, en el estado de Michoacán, municipio de Hidalgo, con latitud $19^{\circ}24'37.00$ y longitud $-102^{\circ}00'06.00$ " (Fig. 10). La arena fue cribada entre las mallas malla No. 4 y retenido en la malla No. 200, con tamaños entre 4.76 mm y 0.074 mm, según lo establecido en la norma ASTM para arenas utilizadas para experimentación en laboratorio.



Figura 10. Localización del banco de materiales. Imagen: Google Earth.

Aditivos: los aditivos utilizados fueron de origen orgánico e inorgánico, seleccionados de acuerdo a las propiedades que proporcionan al mortero y a su idoneidad para la

restauración de acuerdo a la investigación histórica previamente realizada. Entre los aditivos orgánicos se encuentran; sangre, leche, huevo, manteca animal, azúcar, miel, fécula de maíz y mucílago de nopal, así como fibras orgánicas como son; pelo de cabra, algodón, y lana. Entre los aditivos de origen inorgánico destacan el polvo de cantera, ceniza volcánica, polvo de ladrillo y arcilla.

Son diversas las propiedades que los aditivos ofrecen a los morteros de cal, en primer lugar como modificadores de plasticidad, con la finalidad de mejorar la fluidez y por lo tanto la Trabajabilidad, se eligieron el mucílago de nopal y la leche. Como adhesivos se estudiaron la sangre, clara de huevo y mucílago de nopal. Como retenedores se tienen: leche, manteca y sangre, los cuales se presume evitan la pérdida del agua por evaporación o por absorción del mampuesto.

En estado sólido se utilizan los aditivos que proporcionaron aumento de resistencia y aquellos que evitaron que el mortero disminuya de volumen durante el proceso de fraguado: yema de huevo, fécula de maíz, fibras (algodón, pelo, plumas, lana), aditivos minerales, miel y mucílago de nopal. Y por último se estudia la manteca animal, sangre, huevo y leche, los cuales fueron utilizados en acueductos para minimizar la pérdida del líquido que transportaban o como impermeabilizantes en los edificios.

PROCESO DE ELABORACIÓN

El método de elaboración se realizó en base a la normativa Mexicana NMX-C-085-ONNCCE-2010 y como complemento NMX-C-061-ONNCCE-2010, la cual establece el método de ensayo de resistencia a la compresión utilizando especímenes cúbicos de 50 mm de arista, a continuación se especifica el método utilizado:

- 1) Dosificación de los componentes.
- 2) Mezcla de los materiales áridos y conglomerantes.
- 3) Adición de aditivos orgánicos e inorgánicos.
- 4) Amasado.
- 5) Enmoldado y compactación.
- 6) Desmoldado.

- 7) Conservación de las probetas en condiciones de laboratorio, en la sección de resistencia (Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”).
- 8) Curado al aire.
- 9) Pruebas mecánicas.

La proporción de los materiales secos para elaborar el mortero estándar debe consistir de una parte de cemento y 2.74 de arena graduada, usando una relación de agua-cemento de 0.485 para todos los cementos portland ordinarios. Para otros cementos diferentes al cemento Portland ordinario, la cantidad de agua de mezclado debe ser la que produzca una fluidez de $110 \pm 5\%$, y se debe expresar en un porcentaje del peso del cemento. Las cantidades necesarias de materiales se deben mezclar al mismo tiempo. El mezclado debe hacerse mecánicamente, de acuerdo con lo indicado en la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE. Como guía para un ensayo inicial de fluidez, se puede considerar el uso de una relación agua-cemento en peso de 0.49.

Para la elaboración de los morteros compuestos de cal, se eligió la proporción de aglomerante-árido de 1:2.75, al ser la más recomendada en la investigación documental para la composición de morteros antiguos y para la elaboración de morteros de restauración.

En cuanto a la proporción del agua con relación al mortero, se determina una proporción inicial de 1:2, es decir, un volumen de agua por dos volúmenes de mezcla. Sin embargo en casos específicos, por ejemplo en la adición de materiales líquidos orgánicos, se recurre a la sustitución para evitar el exceso de agua durante el amasado y por consecuencia la elevada retracción durante el secado.

Los componentes se mezclan en seco de manera manual con la finalidad de integrar la mezcla lo mejor posible (Fig. 11), posteriormente se realiza de forma mecánica con la ayuda de un taladro con aditamento de aspa de acero, la mezcla de los materiales se realiza durante 90 segundos para que la mezcla quede completamente unificada (Fig. 12).



Figura 11. Amasado manual de la mezcla. Foto: AJVP



Figura 12. Amasado con ayuda de taladro mecánico. Foto: AJVP

Para la dosificación de los aditivos de acuerdo a la ACI²⁰⁰, se deben incluir al mortero en una proporción inferior al 5% del peso del cementante (Fig. 13 y 14). Como se observa las dosificaciones de los aditivos son en general bajas, pero pueden aumentar incluso hasta duplicarse para ciertas condiciones específicas.



Figura 13. Adición de sangre al mortero



Figura 14. Adición de algodón al mortero al 3%

Una vez obtenida la consistencia esperada en las pastas, se procedió a preparar las mezclas y a colocarlas en moldes metálicos previamente engrasados de acuerdo a la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 para medir la resistencia a compresión y flexión, por medio de la creación de cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm, se obtuvieron un total de 27

²⁰⁰ American Concrete Institute

cubos y prismas rectangulares de 4 cm x 4 cm x 16 cm (Fig. 15 y 16), cuando el mínimo de especímenes debe ser 3.

Los moldes en su cara interior se cubrieron con una capa de aceite, con la ayuda de brochas y estopa, asegurando que el contacto entre ellos es hermético. Después de armar los moldes, se quitó el exceso de aceite del interior de las caras, así como de las superficies del molde.

La norma especifica que el pisón debe estar hecho de un material no absorbente, no abrasivo ni quebradizo, tal como el plástico; deberá tener una dureza y una sección transversal de 13 mm por 25, y una longitud de entre 12 cm y 15 cm. La cara de apisonar debe ser plana y escuadra con las demás caras (Fig. 17).



Figura 15. Cubos de 5 cm



Figura 16. Prismas rectangulares



Figura 17. Pisón

Otra prueba para realizar ensayos de flexión donde se estableció la ductilidad del material se realizó por medio de briquetas (Fig. 18), en este método la carga se aplicó en los extremos y la falla ocurrió en el punto central de la muestra. El espécimen se dobla hasta un ángulo determinado o hasta que se fracture. Para su elaboración se colocó una capa en el molde, fue apisonada de manera manual, y posteriormente se colocó la segunda capa donde se repite el procedimiento, por último se procedió a enrasar la mezcla sobrante.

Por ser utilizados aditivos especiales, se requirió el uso de cilindros adicionales de ensayo para analizar el comportamiento posterior del fraguado (Fig. 19). La mezcla se colocó en cuatro capas y se apisonó con la ayuda de una varilla con punta redondeada de 15 mm de diámetro en cada una de las capas, y como en los elemento anteriores se procedió a eliminar el material sobrante.²⁰¹



Figura 18. Briquetas



Figura 19. Cilindros (nótese la contracción de la mezcla en aproximadamente un 10% de la longitud)

Inmediatamente después de elaborar los especímenes con su molde, y sobre su placa, se colocaron en el gabinete, dejando sus superficies expuestas al ambiente, pero protegidas del goteo directo. Los especímenes deben permanecer dentro de los moldes de 20 h a 24 h, en caso de que se retiren de los moldes, y antes de las 24h deben conservarse en la cámara o gabinete húmedos hasta que se cumpla la edad. Al cumplir esta edad los especímenes se sumergen en agua saturada de cal en los

²⁰¹ Norma: ASTM C 31, *Prácticas normalizadas para elaborar y curar especímenes de concreto en campo*.

tanques de almacenamiento contruidos con material no corrosivo. El agua de los tanques se debe mantener limpia, renovándola frecuentemente y conservando la saturación de cal.

Una vez colocada la mezcla en los moldes se dejaron reposar por 3 días antes de desmoldarse, una vez desmoldados se marcan de acuerdo al tipo de aditivo, la proporción y la fecha de su elaboración. Las muestras fueron conservadas en el Laboratorio de Materiales a una temperatura ambiente para posteriormente realizar las pruebas. En este caso, se muestran solo los resultados de la primera etapa de pruebas.

MUESTREO

La evaluación de las muestras se realizó por dos métodos, en estado fresco y en estado sólido. En estado fresco consistió en la observación del comportamiento de los materiales al momento de mezclarse y de colocarse en los moldes, las evaluaciones en primer lugar se realizaron por medio de la observación visual y el tacto durante su manipulación, así como con la ayuda de sistemas de medición en estado fresco del laboratorio, como lo es la prueba de fluidez.

En estado sólido se observaron al momento de desmoldarse, a unos días de su aplicación y a fechas posteriores durante el proceso de carbonatación. El análisis se realizó por medio del análisis específico de cada una de sus propiedades en el laboratorio, con la finalidad de describir de manera más confiable sus propiedades.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS EN ESTADO FRESCO

Fluidez

La consistencia de los morteros en estado fresco se determinó mediante el método de la mesa de sacudidas o prueba de fluidez, de acuerdo al procedimiento de la Norma NMX-C-061-ONNCCE-2010, mediante el cual se estableció para cada mortero la cantidad de agua necesaria para obtener un escurrimiento de 150 ± 5 mm.

Esta prueba tiene que ver con la facilidad en la que se puede manejar la mezcla sin que se fragüe o se seque, la facilidad de colocación y la capacidad que posee la mezcla para retener el agua al estar en contacto con superficies absorbentes u otros elementos constructivos

El procedimiento consistió en la fabricación de morteros de prueba con diferentes contenidos de agua, para realizar el procedimiento la parte superior del platillo se limpió y seco con cuidado, el molde estandarizado se colocó al centro (Fig. 20), en el molde se colocó una primera capa de mortero de 25 mm de espesor aproximadamente, dando 25 golpes con el pisón, se coloca la segunda y se compacta de nuevo, se procedió a enrasar el mortero excedente pasando el filo de una cuchara de albañil, se limpió el platillo de la mesa de fluidez no cubierta por el molde en un tiempo máximo de un minuto.

Posteriormente, se levantó el molde partir del momento de haber terminado el mezclado, el platillo se dejó caer 25 veces en 15 segundos de una altura de 12.7 mm. Cabe decir que la fluidez es el incremento del diámetro de la base de la masa del mortero, expresado como porcentaje del diámetro de la base original. El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de, por lo menos, cuatro mediciones de diámetro de 45° aproximadamente. Variando los porcentajes de agua se deben hacer mezclas de ensayo hasta obtener la fluidez especificada. Cada ensayo se debe hacer con un nuevo mortero.



Figura 20. Mesa y pisón de prueba. Foto: Judith Alejandra Velázquez Pérez



Figura 21. Medición en el diámetro del mortero extendido una vez que se sacudida la mesa. Foto: JAVP

El porcentaje de fluidez se determina registrando el incremento del diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original de la base del mortero moldeado (Fig. 21) con un vernier especial, y posteriormente se aplica la siguiente fórmula:²⁰²

$$\text{Fluidez (\%)} = \frac{\text{Diámetro extendido} - \text{diámetro original}}{\text{diámetro original}} \times 100$$

Adherencia

La adherencia se considera tanto en el mortero fresco como en el mortero endurecido. Consiste en la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interface mortero-base. Se refiere, por tanto, a la resistencia a la separación del mortero sobre su soporte.

La adherencia del mortero fresco se debe a las propiedades reológicas de la pasta conglomerante, la adherencia antes de que el mortero endurezca se incrementa cuando mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos. La adherencia se basa en la resistencia a tracción de la unión entre mortero y un soporte definido.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE MORTEROS DE CAL DURANTE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN

Los morteros de cal se caracterizan por la lenta carbonatación en la cual el material se vuelve más compacto y fuerte. La calidad técnica de los morteros se determina mediante diversos ensayos normalizados de laboratorio sobre el mortero fresco, y posteriormente se da una evolución del mortero durante su endurecimiento. Las propiedades obtenidas definirán las cualidades de los morteros y si su funcionamiento será adecuado.

Resistencia mecánica

Los morteros deben presentar propiedades que les permita ser duraderos, resistir los agentes de deterioro, absorber los movimientos del edificio, ser permeables y proteger

²⁰² Luis Manuel Navarro Sánchez (coord.), *Análisis de materiales*, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011, p. 156.

los materiales originales funcionando como materiales de sacrificio. Se requiere que tengan una vida media aceptable en términos de conservación, por lo que su resistencia debe estar por debajo de la resistencia de los bienes pétreos que se pretende conservar, pero con la suficiente para protegerlos por cierto tiempo. El método para la evaluación de la resistencia es dejar fraguar el material determinado tiempo y una vez seco someterlo a pruebas para identificar cuanta resistencia opone el material al tratarlo de romper.

La resistencia a compresión y a flexión del mortero se obtiene conforme a los resultados del ensayo de probetas prismáticas de 5 cm x 5 cm x 5 cm y 4 cm x 4 cm x 16 cm conservadas a 28 días de edad en laboratorio según la norma ASTM-C-109M I-2002. Los aparatos para realizar las pruebas son los siguientes:



Figura 22. Prueba de compresión. Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”



Figura 23. Prueba de tensión. Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”

Retención

La retención de agua se relaciona con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante, y, en general, con la viscosidad de una pasta. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y árido, así como las burbujas de aire incluido. El agua que se

encuentra en exceso cederá por succión del soporte sobre el que se aplica. La retención influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determina el ritmo de endurecimiento del mortero.²⁰³

Retracción

Con el nombre de retracción se conoce al proceso de reducción de volumen (contracción) que sufren las pastas, los morteros y los hormigones antes, durante y después del fraguado, cuando son expuestos al aire.²⁰⁴ Este fenómeno tiene su origen en dos tipos de retracción: la retracción térmica, se da cuando se presenta una reacción exotérmica que eleva la temperatura de los morteros, al hidratar los compuestos, este calor desprendido lleva al descenso de la temperatura del mortero; y la retracción hidráulica o secado, que se produce al perder agua del amasado por evaporación en el mortero, se origina una presión negativa, causante de la retracción.

RESULTADOS DURANTE LA ETAPA DE MUESTREO

Para el diseño de muestras se buscó una dosificación adecuada de materiales, con la finalidad de obtener mezclas que cumplan con las características adecuadas para determinado uso. Para el diseño de los morteros no existe un método que especifique las cantidades exactas de los materiales a utilizar, por lo que se realizan diferentes mezclas basadas en las experiencias previas.

Las calidades deseadas se buscan dentro de las formulaciones tradicionales y la cantidad de los materiales depende de la clase, la naturaleza, el empleo y la aplicación que deba hacerse con ello.

Para identificar el efecto que causan los aditivos sobre el mortero, se tiene como comparación un mortero testigo, en proporción 1:2.75 de cal arena y agua de acuerdo a los requerimientos.

²⁰³ *Ibidem*.

²⁰⁴ Javier A. Sánchez, "La retracción en los morteros de cal" en *Materiales de Construcción*, Vol. 47, Núm. 245, 1997, pp. 17-28.

ADITIVOS ORGÁNICOS

Sangre

Para el caso de la sangre se utilizó sangre de ganado bovino en estado natural, no se le adicionaron anticoagulantes, solo se eliminaron coágulos e impurezas. La sangre se estudió en dos proporciones en volumen de agua del 20%.

Los morteros adicionados con sangre presentan un buen comportamiento de manera general, presenta una alta resistencia a edades tempranas. De manera física presenta un color verdoso, lo cual lo hace poco apto para acabados, pero sí adecuado para consolidaciones o impermeabilizaciones, al ser impermeable al agua exterior.

Mucílago de nopal

Los usos tradicionales que tienen el nopal y sus derivados mezclados con la cal, han sido constantes a lo largo de la historia de la construcción en nuestro país, gracias a las propiedades adhesivas que se han observado. Un uso común que se le ha dado en la restauración ha sido como impermeabilizante de pinturas y es posible aplicarlos a cualquier tipo de construcción para protegerla.²⁰⁵

El aditivo utilizado en este caso fue el mucílago de nopal, para la obtención del material existen varios métodos como el polvo del nopal o la baba, el método tradicional es explicado por Carrillo y Gariel:

...el proceso de extracción de la baba de nopal es fácil y cómodo; se reduce a cortarlo en pequeños fragmentos, agregarle un poco de agua y dejarlo en maceración, hirviéndolo después con el objeto de extraer la mayor cantidad de líquido. Si se dispone de prensas, la extracción se hace en frío con ventajosos resultados.²⁰⁶

En este caso se emplearon pencas cortadas en pequeñas porciones e incorporándolas en agua, cuyo nivel cubre por completo el nopal a temperatura ambiente. Se dejó por

²⁰⁵ Andrés Antonio Torres Acosta *et al*, "Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas" en SCT, Publicación técnica, Núm. 326, Querétaro, 2010.

²⁰⁶ Abelardo Carrillo y Gariel, *Técnica de la pintura de Nueva España*, Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1983.

un lapso de 5 días para que se libere la baba (aunque es posible dejarlo reposar sólo por 24 horas) y posteriormente se separa el líquido viscoso de los residuos sólidos del nopal y quedó listo para ser usado como aditivo. Cuando se quiere disminuir el tiempo de espera se recomienda aplicar calor.

En la pasta preparada con el mucilago, se observó que aumenta la fluidez de la pasta, por lo que se reduce la cantidad de agua incorporada. La pasta fue manejable y con una adecuada consistencia para su aplicación, además mejoró la adhesividad entre el soporte y el material al ser un material.

El aditivo permitió aumentar el tiempo de fraguado, y por tanto disminuyó la aparición de grietas en los aplanados. Gracias a esta cualidad se mejoró el proceso de carbonatación de la cal al funcionar como retardante del fraguado y aumentar la resistencia. Una de las desventajas que presenta es la diversidad de tonalidades que puede presentar o reaccionar de manera diferente ante las condiciones del medio ambiente o impurezas de la pasta.

La inclusión de sangre y mucilago de nopal ha mejorado notablemente las propiedades de los morteros en estado fresco, ya que actuaron disminuyendo el contenido de agua en el amasado y la densidad del mortero. En estado sólido las características de los minerales han sido poco afectadas.

Huevo

Para este material se utilizaron tres procedimientos, uno con el huevo completo, y dos más con la clara y la yema de manera individual (Fig. 24). La muestra con clara y yema requirió de una alta cantidad de agua y otorgó propiedades impermeabilizantes y abrillanta la mezcla.

Se concluye que las mezclas con huevo presentaron pocas mejoras en los morteros y grandes dificultades en su manejo, además de ser una mezcla con elevado coste económico al ser un producto comestible. Por lo que no se recomienda su uso como aditivo para mortero en la construcción.

Yema

Los especímenes presentan dificultades al momento de manipularse, ya que la mezcla presenta una consistencia con una alta adherencia, la compactación en los moldes se realizó utilizando los dedos debido a que el material se adhería al pisón. Durante el proceso de fraguado se observa poco sangrado, por ende se tiene un tiempo mayor para el endurecimiento.

El desmolde se pospuso ya que la mezcla tardó en fraguar, al momento de intentar sacarlos se desmoronaba fácilmente. Al desmoldar la muestra se percibió que las muestras siguieron presentando desmoronamiento y un olor fuerte y desagradable (Fig. 25).



Figura 24. Preparación de clara y yema de huevo.



Figura 25. Desmoronamiento de mezcla con yema de huevo.

Clara de huevo

Se propuso una mezcla de sustitución donde el 50% de agua fuera sustituida por la clara, pero al momento de realizarla se requirió de la adición del 100% de agua ya que el material absorbía el agua y no permitía mezclarse adecuadamente, el resultado de ello fue que el material tardara 10 días en fraguar y presentara un alto sangrado durante el tiempo de secado (Fig. 26). Se tuvieron dificultades al momento de desmoldar debido a que la mezcla presenta poca trabajabilidad y aunque se vibre no presenta un buen acomodo, al observarse poros macroscópicos atrapados en la matriz.

La mezcla con clara de huevo al momento de desmoldarse presenta varias características particulares: no tiene olor, color desigual en capas, se observó una alta retracción en el material, que redujo sus dimensiones aproximadamente en un 20% (Fig. 27).



Figura 26. Sangrado durante el proceso de fraguado con aditivo de clara de huevo



Figura 27. Retracción en muestras de mortero con clara de huevo.

Leche

Se realizaron dos muestras con diferentes proporciones de leche de vaca en estado natural, en las dos muestras se observó que la grasa de la leche separa los elementos líquidos de sólidos, quedando la arena en la parte de abajo y la leche en la parte de arriba. Durante el enmoldado y aplicación en losa presentó un considerable sangrado (Fig. 28).

Se considera un aditivo poco apto para intervenciones debido a la excesiva fluidez que presenta, poca trabajabilidad, pérdida de sus componentes durante el sangrado y variación de colores y texturas en capas, sin embargo es necesario tomar en cuenta que la caseína presenta buenas propiedades adhesivas.



Figura 28. Sangrado en losa en la aplicación de mortero con leche como aditivo.

Fécula de maíz

Para el procedimiento con fécula de maíz se utilizó fécula de maíz comercial, en una proporción del 2% del peso respecto a la Cal, el material se eligió debido a las propiedades espesantes. Se tiene que esta mezcla presentó una alta trabajabilidad y no presenta problemas al momento del enmoldado.

En cuanto a las propiedades físicas presenta una textura lisa y un color blanco, no presenta olor y presenta una dureza considerable. Es recomendable para aplanados gracias a la textura y color que ofrecen.

Pelo de cabra

La elaboración de la mezcla con pelo de se realizó con un 3% del pelo en peso en relación a la cal. La mezcla es manejable y permanece unida gracias a que el pelo otorga cohesión a la pasta. Presenta buen acomodo al vibrarse y en su aplicación en losa no tuvo un agrietamiento. Los especímenes se descimbraron en el tiempo establecido, no tiene olor ni se observan las fibras a simple vista. (Fig. 30)

Algodón

Con una proporción del 3% con respecto a la cal, la mezcla se realizó agregando el material junto con el agua, se obtiene una mezcla pastosa y manejable, donde las fibras de algodón se notan fácilmente y tienen buen acomodo. Durante el fraguado no presentó sangrado. El desmolde se dio en el tiempo establecido y presentó un color más claro que otras fibras con las que se experimentó.

Plumas

La elaboración de la mezcla con plumas se realizó con un 3% del material en relación a la cal. La mezcla obtenida fue muy fluida y manejable, la cantidad de agua utilizada fue menor. El desmolde se llevó a cabo dentro del tiempo establecido presentando una textura lisa pero se observan las fibras en los especímenes. No presenta olor ni color (Fig. 29).

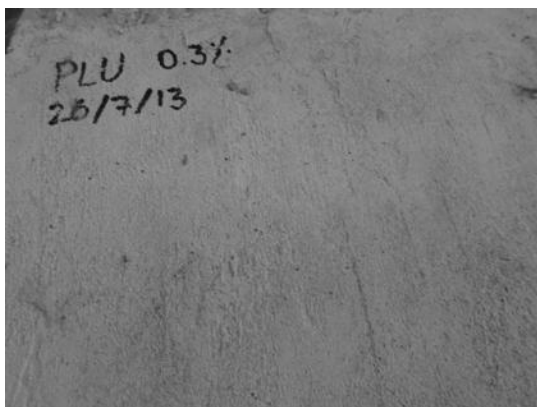


Figura 29. Losa de adherencia con aditivo de plumas.

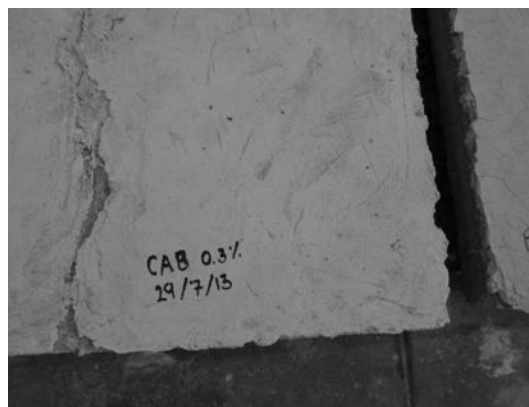


Figura 30. Losa de adherencia con aditivo de pelo.

Lana

Presentó menos manejabilidad en comparación de las otras fibras, la textura es lisa, sin color ni olor, la losa no presenta grietas. La utilización de fibras orgánicas como pelo, algodón y plumas, permiten un mínimo agrietamiento

Las fibras de origen orgánico son adecuadas para utilizarse en aplanados, ya que gracias a la cohesión que ofrecen a los componentes evitan la aparición de grietas en el mortero. Se recomienda el algodón debido a que presenta mayor manejabilidad como pasta y las fibras son menos visibles.

ADITIVOS INORGÁNICOS

Los aditivos de origen inorgánico se realizaron de acuerdo a la proporción 1:3, sustituyendo en un 25% y 50% el árido por los aditivos.

Polvo de ladrillo

Se obtiene una mezcla muy áspera que cumple con la fluidez requerida. De acuerdo con las mezclas se eligió una adición del 50%, ya que la adición del 25% presentó cuarteaduras notables. Físicamente presenta un color gris oscuro, parecido al color del cemento y una textura rugosa.

Arcilla

La mezcla realizada en un 25% de arcilla y 75% de arena presenta una mezcla manejable y trabajable, debido al contenido arcilloso se tiene una alta adhesividad. El color de la pasta es café y presenta pocas grietas en la losa de adherencia. Presentó poco sangrado durante el fraguado y se descimbró en los tiempos establecidos.

Polvo de cantera

Se realizaron dos muestras de sustitución del 25% y 50%, de las cuales la del 25% presentó mejores propiedades. En las dos pruebas se requirió de más agua que la relación 1:2. La mezcla que se obtiene es una pasta manejable, con buena fluidez, sin olor, y con una coloración café-rosado. Presentó agrietamientos después de una hora de haberse aplicado a la losa de adherencia. (Fig. 31)



Figura 31. Agrietamiento con polvo de cantera



Figura 32. Especímenes con adición de arcilla en diferentes proporciones.

A continuación se presenta una tabla con un resumen de las ventajas y desventajas que presentaron los morteros durante su proceso de elaboración, presentaron cualidades particulares que modificaron las propiedades del mortero de cal:

Aditivo	Ventajas	Desventajas
Sangre	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a edades tempranas. Disminución del contenido de agua. Disminución del contenido de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> Coagulación de la sangre Modifica de manera significativa el color de la mezcla.
Mucilago de nopal	<ul style="list-style-type: none"> Trabajabilidad. Fluidez. Sin olor. Mejora de adhesividad Poca aparición de grietas 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de extracción de la baba Variación de tonalidades debido a impurezas de las pastas.
Miel	<ul style="list-style-type: none"> Adhesividad Impermeabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Costo Poco sangrado Poca Trabajabilidad Poca fluidez
Huevo (Yema y clara)	<ul style="list-style-type: none"> Aditivo abrillanta la mezcla. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere alta cantidad de agua Sangrado. Alto costo.
Yema	<ul style="list-style-type: none"> Adherencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Poca Trabajabilidad Olor fuerte y desagradable. Desmoronamiento
Clara	<ul style="list-style-type: none"> Sin olor. 	<ul style="list-style-type: none"> Poca Trabajabilidad . Requerimiento de agua en exceso. Sangrado. Color desigual en las capas. Alta retracción.
Leche	<ul style="list-style-type: none"> Adherencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Separación de áridos y líquidos. Sangrado. Variación de texturas y color.
Fécula de maíz	<ul style="list-style-type: none"> Trabajabilidad . Textura uniforme. Dureza Inodora e incolora. 	

Pelo de cabra	<ul style="list-style-type: none"> • Manejable • Presenta cohesión • No presenta grietas 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención y preparación del material.
Algodón	<ul style="list-style-type: none"> • Manejable • Poco sangrado • Color 	<ul style="list-style-type: none"> • Complicaciones al momento de mezclar
Plumas	<ul style="list-style-type: none"> • Manejable • Poca cantidad de agua • Inodora e incolora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se observan las fibras en los especímenes
Lana	<ul style="list-style-type: none"> • Inodora e incolora • Textura uniforme • Pocas grietas 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca manejabilidad
Polvo de ladrillo	<ul style="list-style-type: none"> • Manejabilidad • Color gris oscuro • Textura rugosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Se crean grietas notables
Arcilla	<ul style="list-style-type: none"> • Manejable • Alta adhesividad • Pocas grietas • Poco sangrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Color oscuro
Polvo de cantera	<ul style="list-style-type: none"> • Manejable • Mezcla fluida • Color parecido a la cantera 	<ul style="list-style-type: none"> • Agrietamiento

Tabla 5. Ventajas y desventajas durante la preparación de los morteros. Elaborada por MGDC.

Arquitectos, pintores y escultores han de aprender de nuevo a conocer y a comprender la compleja forma de la arquitectura, en su totalidad y en sus partes, con lo cual podrán restituir a sus obras aquel espíritu arquitectónico que han perdido con el arte de salón.²⁰⁷

EL DISEÑO DE MORTEROS PARA SU APLICACIÓN EN OBRAS DE RESTAURACIÓN

En este apartado se pretende hacer una síntesis del conocimiento de las características de los morteros mezclados con aditivos orgánicos e inorgánicos, con base en la información obtenida en los estudios realizados sobre el tema y en los resultados obtenidos en la experimentación realizada.

Para hacer más accesible la información se pretende identificar los objetivos más comunes de la restauración en objetos arquitectónicos y los criterios para su conservación, y con ello proponer técnicas en base a las características mecánicas y físicas que proporcionan los aditivos, prestando atención a las cuestiones tecnológicas con las que fueron construidas, y posteriormente a los cuidados necesarios para su mantenimiento.

²⁰⁷ Walter Gropius, “Programa del Bauhaus de Weimar” en García Estévez, Carolina y Antonio Piazza de Nanno, *Historia del arte y de la arquitectura moderna (1851-1933): Del Crystal Palace a la ciudad funcional*, Barcelona, UPC, 2015, p. 276.

CRITERIOS EN LOS PROCESOS DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Los procesos de conservación y restauración de un bien valorado por su interés cultural, tienen como fundamento un proyecto multidisciplinar para la propuesta de los materiales y técnicas adecuadas para alcanzar el objetivo. Carlos Núñez Guerrero indica que se trata de preservar la integridad de lo conservado con todas sus cualidades y calidades, lo que incluiría también aquello que se agregó a la obra terminada y que se puede considerar como parte sustancial del interés del bien.²⁰⁸

La calidad de los morteros que se emplean en los trabajos de intervención es fundamental para garantizar su perdurabilidad, por lo que se exige que los materiales empleados, además de reunir cualidades técnicas específicas, compatibles con el soporte de la obra y ofrecer una buena resistencia a la alteración.²⁰⁹

La conservación implica emitir juicios de valor y se manifiesta como una medición directa entre el pasado y el presente, al influir en como los usuarios ven y comprenden ese pasado.²¹⁰ Hoy en día existen planteamientos para tratar de forma responsable y ética los vestigios del pasado y buscando la autenticidad e integridad del patrimonio material, se sabe que es imposible mantenerlo igual para siempre, ya sea intervenido o no, pero se pretende mantener cierta continuidad cultural que permita dar testimonio de las civilizaciones anteriores.

El proceso de conservación y restauración de un bien material considerado como patrimonio, requiere de la propuesta de un proyecto técnico y científico para alcanzar este objetivo. Como un principio básico de conservación y restauración se debe evitar que lo que se le añade no le reste valor al bien cultural, sino que asegure su

²⁰⁸ Carlos Núñez Guerrero, “Las Técnicas de la cal apuntes para su conservación y restauración”, en: Alejandro Sánchez, Francisco Javier et al. (Coord.), *La cal...*, *op. cit.*, p. 204.

²⁰⁹ Jesús Espinoza Gaitán, “Estudios de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla)” en Francisco Javier Alejandro Sánchez, et al. (Coord.), *La cal...*, *op. cit.*, p. 40.

²¹⁰ Valerie Magar, “El uso de la cal en conservación: la experiencia internacional”, en: Barba Pingarrón, Luis e Isabel Villaseñor Alonso (editores), *La cal: historia...*, *op. cit.*, p. 161.

conservación, los materiales empleados deben ser compatibles con la tradición constructiva del bien y con sus materiales constituyentes.²¹¹

Dentro de la disciplina de la restauración, el uso de argamasas para la consolidación de edificios ha sido un tema de constante investigación, en el trabajo de campo se encuentran materiales en un lamentable estado de conservación y de difícil recuperación. “La restauración es mucho más que devolver la función estructural del elemento a rehabilitar, sobre todo es intentar devolver el aspecto estético original”.²¹²

La Real academia de la Lengua Española establece el significado de restaurar como:

- I. Reparar, renovar, o volver a poner una cosa en aquel estado o estimación que antes tenía.
- II. Reparar una pintura, escultura, edificio, etc., del deterioro que ha sufrido.

En estas definiciones se contemplan diversos grados de intervención, y varían en función del estado del material a restaurar. Muchas investigaciones recomiendan el uso de morteros que se asemejen a los originales, tanto en aspectos estéticos y funcionales, Alejandro Mangino Tazzer en su libro *La restauración histórica: retrospectiva histórica en México* indica que de ser posible “se deben aplicar las mismas técnicas y materiales de que está constituida y fue edificada la construcción”.²¹³ Tesh y Middenfort de igual manera establecen que “para los propósitos de la restauración, es esencial tener los morteros compatibles para la albañilería histórica”,²¹⁴ así como J. Igea plantea lo siguiente:

A la hora de realizar cualquier restauración, es importante utilizar materiales y métodos que sean lo más similar posible al material al que van a sustituir. Por tanto, es necesario conocer la metodología de fabricación y diseño de los

²¹¹ Carlos Núñez Guerrero, “Las técnicas de la cal, apuntes para su conservación y restauración”, en: Alejandre Sánchez, Francisco Javier et al. (Coord.), *La cal...op. cit.*, p. 204.

²¹² BASF, The chemical Company, *Guía de la Restauración: Edificios Históricos*, Barcelona, Albaria, 2005.

²¹³ Alejandro Mangino Tazzer, *La restauración histórica: retrospectiva histórica en México*, México, Trillas, 1991, pp. 169.

²¹⁴ V. Tesch, y B. Middenfort, “Occurrence of thaumasite in gypsum lime mortars for restoration” en *Cement and Concrete Research*, Núm. 36, 2006, pp. 1516-1522.

morteros históricos ya que las referencias bibliográficas acerca de las características de este tipo de materiales son muy escasas.²¹⁵

CUALIDAD ESTÉTICA

La presencia de criterios de intervención sobre el patrimonio arquitectónico, establecen que además de cumplir con las características técnicas necesarias, deben reunir cualidades estéticas semejantes a los originales. En el ámbito internacional se han escrito diversas obras referentes a la conservación, que unifican diversos criterios y conceptos, entre ellos se encuentra “la autenticidad”, constantemente tema de controversia dentro de la disciplina. *La Carta de Venecia* (1964), surge a partir de la *Carta de Atenas*, con la finalidad de renovar, profundizar y ampliar su contenido, establece una serie de principios comunes que tienen como objetivo la salvaguardia del patrimonio histórico, plantea la importancia del valor de la autenticidad como fundamental en la restauración, en su artículo 12 advierte que:

Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.

Posteriormente en 1994, en Nara (Japón), se lleva a cabo la conferencia promovida por varias instituciones como la UNESCO, ICOMOS e ICCROM, donde se crea un documento que se basa en la autenticidad de los bienes patrimoniales culturales y establece que las acciones de conservación deben tener su fundamento en los valores atribuidos a estos bienes. En el punto 10 se habla sobre la autenticidad:

La autenticidad así considerada y afirmada en la Carta de Venecia, aparece como el factor calificativo esencial en lo que respecta a valores. El reconocimiento de la autenticidad juega un papel importante en todos los estudios científicos del patrimonio cultural, en los planes de conservación y restauración así como en el procedimiento de inscripción en la Lista del Patrimonio Mundial y otros inventarios de patrimonio.

La Carta de Ename, tiene entre sus objetivos proteger la autenticidad y el significado de los lugares patrimoniales a través del respeto a los vestigios materiales originales, y

²¹⁵ J. Igea, *et al.*, *op. cit.* pp. 515-529.

considera la reversibilidad de infraestructuras y servicios. Considera que la interpretación de los lugares que forman parte del patrimonio cultural debe respetar su autenticidad y proteger la integridad de su estructura primigenia.

Los trabajos de restauración de edificios y construcciones de carácter histórico-artístico implican, en la inmensa mayoría de los casos, la aplicación de morteros que rempazan a los que se han deteriorado. En base a lo anterior, la necesidad de aplicación de morteros para la restauración, es parte de las acciones de conservación de un edificio, pero se propone el uso de técnicas y materiales que presenten compatibilidad con la fábrica histórica y que presenten características similares a los morteros utilizados originalmente, con la finalidad de mantener la autenticidad del edificio y sus materiales.

Durante la época colonial la cal fue utilizada principalmente para la fabricación de morteros y mezclas para asentar y aglutinar la mampostería, la piedra, la cantera y el adobe, así como los aplanados, la pintura y la decoración. “Los edificios antiguos presentaban acabados de cal y arena o de cal y tierra, piedra natural, barro o azulejos.”²¹⁶ Se debe considerar además que estos morteros están expuestos a la humedad o a diversos factores atmosféricos que los dañan y es necesaria su reposición.

Al tener en cuenta las recomendaciones de diversos autores, así como de los organismos internacionales, los morteros de cal con una adecuada composición, según su aplicación, por sus propiedades son prácticamente insustituibles para la restauración de inmuebles, permiten que con integridad se recupere la autenticidad en la restauración de los acabados ornamentales.²¹⁷

Por las propiedades que ofrece la cal, presenta la función, tanto de aglomerante o como aglutinante de diversas técnicas decorativas, uno de los estudios más

²¹⁶ Luis Alberto Torres Garibay (Coord.), *Manual General de Mantenimiento de Monumentos Históricos*, México, CONACULTA/INAH, 2009, pp. 3-13.

²¹⁷ María Dolores Ribador González, “Ennoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta” en Francisco Javier Alejandro Sánchez, *et al.* (Coord.), *La cal...*, *op. cit.*, p. 189.

importantes lo realiza Gárate Rojas, en sus obras *Artes de la Cal* y *Artes de los Yesos*, donde expone la influencia de su utilización en el desarrollo del arte y de la vida cotidiana.

Las técnicas para la elaboración de los distintos morteros de cal se conocen a través de diversas investigaciones en fuentes escritas y en el laboratorio, que gracias al avance tecnológico permiten la interpretación de los resultados cada vez más precisos pero al considerar su uso en obra se debe tener en cuenta que pocas personas cuentan con la preparación necesaria para su utilización. Para la reintegración de morteros en el proceso de restauración.

EL USO DE MORTEROS DE CAL CON ADITIVOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN LA CONSERVACIÓN

Como se demostró en el capítulo anterior, la presencia de aditivos orgánicos e inorgánicos sí genera cambios en los morteros de cal, aunque los cambios no siempre son positivos. El conocer las propiedades que presentan, ofrece nuevas posibilidades para reemplazar morteros dañados o que se han retirado en edificios.

La experimentación con aditivos tuvo la finalidad de optimizar las propiedades que ofrecen los morteros de cal para resolver problemáticas particulares de conservación. Los morteros se utilizarán para recubrimientos, resanes y ribetes, reintegraciones y consolidaciones. Anfacal recomienda realizar la mezcla sobre una superficie plana, libre de impurezas tales como basura, flora y fauna.²¹⁸

Las piedras para construcción se dividen en tres grupos: Ígneas, sedimentarias y metamórficas. Los factores de alteración son: presión, temperatura, agua, sustancias químicas, causas biológicas y causas humanas, estos factores se encuentran

²¹⁸ Asociación Nacional de Fabricantes de Cal

interactuando entre sí. Para conservar la piedra es necesaria la limpieza, mantenerla libre de humedad, lavarla con agua y un recubrimiento de calidad.²¹⁹

RECUBRIMIENTOS

Desde mediados del siglo XX, la imagen urbana de la ciudad de Morelia cambió radicalmente al retirar los recubrimientos de los edificios (Fig. 33 y 34). Hoy se sabe que la eliminación de los recubrimientos en muros, incide en el proceso de pérdida de juntas entre la piedra, lo cual puede llevar a desestabilizar estructuralmente los mampuestos, además de generar un conducto para la humedad hacia el núcleo del elemento constructivo.

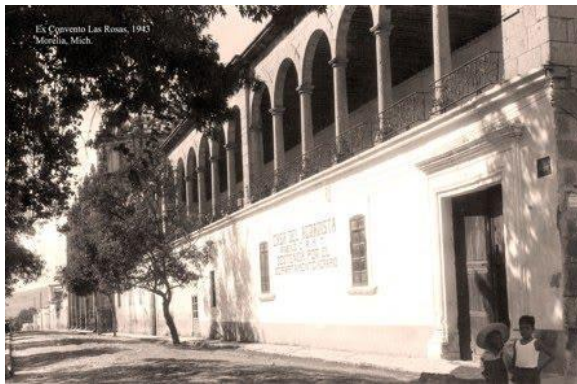


Figura 33. Conservatorio de las Rosas con aplanado.
Fuente: conservatoriodelasrosas.edu.mx



Figura 34. Conservatorio de las Rosas, estado actual.
Fuente: conservatoriodelasrosas.edu.mx

El recubrimiento es una capa aplicada a la superficie del material original que se quiere conservar, con la finalidad de que actúe como un elemento de protección o bien de sacrificio, dependiendo de cada caso particular.²²⁰ Los recubrimientos de sacrificio protegen el material original, al ser la capa del recubrimiento la que se pierde y se deteriora en un tiempo determinado, este tipo de material se emplea en su mayoría para la protección de paramentos de piedra o simplemente elementos decorativos. Estos son aplicados cuando el deterioro de la piedra se debe a causas

²¹⁹ Javier Bernis Mateu, "Patología y cuidado de los materiales de la construcción" en *De Re Restauratoria*, vol. 1, España, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, p. 95 - 122.

²²⁰ Jáidar Benavides, Yareli, *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*, Tesis de licenciatura, México, ENCRyM, 2006, p. 82.

internas, es decir por la disgregación de los componentes causante de la descomposición de la piedra, y se corre el riesgo de perder el elemento por completo.²²¹ El recubrimiento es una capa de lechada de cal, que no modifica la forma ni apariencia de la piedra original y su función es retardar el deterioro de la piedra proporcionándole coherencia y aislamiento de los factores externos.

El recubrimiento de protección, contrario al de sacrificio, se utiliza cuando se quiere aislar por completo al material de los factores externos de deterioro.²²² Este tipo de recubrimientos se perdieron en su mayoría en la ciudad de Morelia (Fig. 35), dejando a los materiales expuestos a factores climáticos, y con ello permitiendo el deterioro de los mismos.



Figura 35. Palacio de Justicia, Morelia. Larguillo elaborado por: MGDC

Los inmuebles construidos durante el periodo virreinal, en su mayoría se encuentran contruidos de piedra, los cuales requieren de aplanados para evitar el deterioro por la acción de humedad, vientos y otros factores. El proceso de protección se fundamenta en las propiedades que la mezcla ofrezca, ya que el fraguado requiere de

²²¹Jáidar Benavides, Yareli, *Los extractos vegetales... op. Cit.*, pp. 82-84.

²²²*Ibidem.*

una serie de poros que permiten que se dé la “respiración” de los materiales pétreos o cerámicos que conforman las estructuras.²²³

Las propiedades requeridas hacen que en los procesos de restauración y conservación se contemple la integración de nuevos aplanados para las superficies intervenidas, así como la reposición de los mismos donde esto se requiere. En el caso de utilizar morteros de sacrificio, una opción viable es el uso del mucílago de nopal, al ser un elemento que no modifica el color de los materiales originales, y crea una capa impermeable que permite proteger la piedra del exterior.

En la aplicación de recubrimientos de protección es común encontrar agrietamiento durante el proceso de fraguado. Durante la aplicación de los morteros en las losas de concreto, fue posible observar que los materiales que presentaban menor agrietamiento fueron las fibras como lana, plumas, pelo y algodón. Estos materiales otorgan coherencia entre los componentes del mortero y presencia no afecta la estética del aplanado. Otro material que presentó buenos resultados para ser aplicado como recubrimiento fue la fécula de maíz, al permitir una fácil aplicación y otorgar a la mezcla un color blanco uniforme.

REINTEGRACIÓN VOLUMÉTRICA

El deterioro por acción mecánica en muros, cubiertas y otros elementos arquitectónicos ocasiona la pérdida de elementos como cornisas, molduras, y demás elementos ornamentales. El proceso de conservación se realiza mediante la reintegración volumétrica de los elementos dañados, este procedimiento está encaminado a restituir elementos formales o superficies planas cuando se haya asegurado primero el aspecto estructural, por lo que cumple la función de proporcionar estructura y completar las formas perdidas.²²⁴

²²³ Oxical

²²⁴ Martínez Ramírez, Ma. del Sagrario, *Desarrollo de nuevos morteros de reparación resistentes al ataque biológico. Empleo de sepiolita como material soporte de los biocidas*, Tesis Doctoral, Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 1995, pp. 105-108.

La reintegración tiene como finalidad la preservación de los valores culturales del bien a intervenir. Cuando se trata de una construcción que cuenta con cal, la reintegración deberá hacerse con el mismo material, por afinidad y respeto de la tradición constructiva.

La reintegración volumétrica requiere que la mezcla que va a reintegrar el elemento formal al volumen, presente una similitud física. Se propone la utilización de materiales inorgánicos como es el caso de arcilla, polvo de cantera, polvo de ladrillo o ceniza volcánica, dependiendo del color del material original. Estos aditivos proporcionan la estabilidad requerida en la intervención y proporcionan un color que se integra de manera natural con el material pétreo original.



Figura 36. Chimenea en Ex Convento del Carmen, Morelia. Foto: MGDC.



Figura 37. Pieza restaurada en el Ex Convento de San Juan Bautista, en Tetela del Volcán. Foto: MGDC.

CONSOLIDACIÓN Y FIJADO

El trabajo estructural de los edificios incluye a los elementos decorativos que lo componen, así mismo deben comportarse con la suficiente estabilidad para poder absorber las deformaciones propias del inmueble, pero contar con la solidez necesaria

para mantenerse tal como fueron colocados.²²⁵ Una vez analizadas las propiedades de la cal se concluye que este elemento da las propiedades requeridas para su empleo.

La consolidación consiste en restablecer la cohesión entre las partículas de un material desintegrado y la adhesión de las distintas capas, unas con otras, al soporte estructural.²²⁶ Considerando las ventajas que presentan los morteros de base cal con aditivos, en cuanto al trabajo estructural, se utilizan para realizar acciones encaminadas a recuperar el comportamiento mecánico de los elementos arquitectónicos. Una de las acciones a realizar es la inyección de grietas y fisuras.

La mezcla del mortero con mucílago de nopal, es recomendable para inyectar huecos a partir de grietas y fisuras de superficiales a profundas. Este aditivo proporciona trabajabilidad y adherencia y permite la penetración total en las cavidades existentes, garantizando así la solidez en el comportamiento estructural volumétrico.

Cuando la estructura del edificio requiere de una mayor solidez, o en el caso de fijado de piezas, la mezcla con sangre de res resultó ser la que cumple con los requisitos de fluidez y resistencia en pegado de mampostería. Los morteros presentaron un buen comportamiento en general con incrementos de resistencia y se observa un color gris-verde.

REJUNTADO

Se refiere a la operación mediante la cual se repone el mortero perdido por disgregación de juntas verticales, debido a alteraciones medioambientales como: agua, viento, heladas, cambios térmicos y sales, que arrastran las partículas del mortero. Este tipo de intervención está indicada cuando la pérdida del mortero es menor de 4-5 cm de profundidad.

²²⁵ OXICAL.

²²⁶ Ignacio Gárate Rojas, *Op. Cit.*, p. 267.



Figura 38. Pared del templo del Carmen en Morelia, se observa la necesidad de rejuntado entre los materiales pétreos. Foto MGDC

METODOLOGÍA PARA LA RESTAURACIÓN DE MORTEROS ANTIGUOS

Algunas de las Condiciones que deben cumplir los elementos nuevos del monumento, se establecen en la Carta del Restauo, donde se indican las consideraciones generales en una intervención, pudiendo aplicarse varias de ellas en los morteros:

- 1) Diferenciación entre lo nuevo y lo antiguo.
- 2) Diferencia de materiales en su fábrica.
- 3) Supresión de molduras y decoración en las partes nuevas.
- 4) Exposición de las partes materiales que hayan sido eliminadas en un lugar contiguo al monumento restaurado.
- 5) Incisión de la fecha de la actuación o de un signo convencional en la parte nueva.
- 6) Epígrafe descriptivo de la actuación fijado al monumento.
- 7) Descripción y fotografías de las diversas fases de los trabajos depositadas en el mismo monumento o en un lugar público próximo.
- 8) Notoriedad visual de las acciones realizadas.

Al momento de enfrentarse a una restauración, se debe contar con etapas generales en la intervención del edificio o monumento. El enfoque se encuentra dirigido hacia los

morteros, pero la metodología es posible de aplicar a cualquiera de los materiales que forman parte del edificio. Cada una de las etapas que describen adquirirá una mayor o menor importancia en función de las particularidades de la construcción a restaurar, y de la función constructiva que desempeñan los morteros.²²⁷

ETAPAS

La metodología a seguir para la restauración se resume en las siguientes etapas:

- 1) Descripción del edificio. Observación y valoración del estado general.
- 2) Recopilación de información
- 3) Análisis de la situación y diagnóstico
- 4) Preconsolidación
- 5) Proyecto de intervención.
- 6) Intervención
- 7) Mantenimiento

Las dos primeras etapas establecen el estado del edificio, es decir, la evolución del mismo desde que se construyó hasta la situación actual, incluyendo los distintos factores que han afectado su estado de conservación y más concretamente la de los morteros. En estas etapas se recopila toda la información accesible, aunque se debe estar consciente de que son pocos los proyectos que dotan de la suficiente documentación para su análisis.

La tercera etapa se centra en la interpretación de la información obtenida para poder ofrecer un diagnóstico, que debe ser evaluado y discutido. Al ser evaluada se lleva a cabo una preconsolidación (la cual no siempre es necesaria), pero que en ocasiones es indispensable debido al mal estado de conservación, esta acción puede ser definitiva o no, ya que posteriormente se puede eliminar para realizar un proceso de cohesión del conjunto.

Una vez establecido el diagnóstico, corresponde establecer la quinta etapa, donde se realiza una propuesta de tratamiento o propuesta de intervención, pero no sólo se

²²⁷ Francisco Javier Alejandro Sánchez, *op. cit.*, pp. 39-41

debe proponer éste, sino también los criterios que se han seguido para decidirlo, las técnicas a emplear, los materiales y una valoración crítica del proyecto.

La intervención es la sexta etapa y en ella se realiza la ejecución de la restauración. Además de suponer la materialización del tratamiento, puede arrojar nueva información que sirva para modificar la propuesta inicial. Esta situación conduce nuevamente a una discusión, en este caso sobre la validez de la intervención de las nuevas circunstancias y la necesidad de cambiarla.

Por último, la etapa del mantenimiento, que puede ser considerado un tratamiento preventivo, con el que se pretende evitar o al menos retrasar lo máximo posible las patologías que llevaron previamente a una intervención.²²⁸ Se tiene además una serie de estrategias de conservación que se dan durante las etapas de la restauración.

Sin duda alguna, se ha comprobado que la mejor actuación de restauración es la que no es necesaria, por eso la importancia del mantenimiento o conservación preventiva, en el que la cal ha protegido los materiales durante siglos.

ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN

De acuerdo con el estado de deterioro que presenten los materiales a intervenir. Medina González propone que se deben considerar cuatro tipos de conservación: emergente, permanente, preventiva y directa. A continuación se explica brevemente cada una.

CONSERVACIÓN EMERGENTE

En situaciones de urgencia como desplomes, desprendimientos y saqueo, entre otros, es necesario recurrir a tratamientos de emergencia para salvaguardar los bienes arqueológicos. Es muy importante que los tratamientos y materiales empleados en la intervención permitan un tratamiento posterior y, tan pronto como sea posible,

²²⁸ *Idem.*

deben aplicarse medidas idóneas de conservación con autorización de las autoridades competentes.²²⁹

CONSERVACIÓN PERMANENTE

La conservación permanente se refiere al cuidado continuo y regular de los elementos decorativos y recubrimientos arquitectónicos, así como de sus contenidos y alrededores, siendo la mejor garantía para su conservación. Por ello, todo lugar debe contar con un programa de mantenimiento de aplicación permanente y continua. Las tareas de mantenimiento incluyen limpieza general con métodos que no produzcan erosión o contaminación, control de vegetación, reparación, etc.

CONSERVACIÓN PREVENTIVA

Esta conservación se refiere a la puesta en práctica de medidas encaminadas a crear las condiciones favorables para mantener los elementos decorativos y recubrimientos arquitectónicos en su estado actual de conservación y minimizar o retardar su proceso de deterioro, así como para evitar los tratamientos curativos innecesarios, prolongando la vida de los bienes. Las medidas preventivas deben considerarse una prioridad.

CONSERVACIÓN DIRECTA

La conservación directa se basa en el uso correcto de los materiales, en este caso la cal y los aditivos en todos sus variantes, e incluye las intervenciones llamadas curativas que atienden directamente los daños físicos y químicos presentes en los elementos decorativos y recubrimientos arquitectónicos. Las intervenciones o tratamientos de conservación y restauración deberán ser resultado de un diagnóstico analítico del estado físico y del registro de los deterioros, así como de las investigaciones y de la experiencia acumulada en el campo de la conservación.

²²⁹ ICOMOS, 2003.

El uso de los aditivos de acuerdo a los requisitos de obra son variados, en seguida se presenta una tabla con sugerencias de uso de los aditivos, en base a las observaciones de las prácticas en el laboratorio.

USO RECOMENDADO DE ADITIVOS DE ACUERDO A SU FUNCIÓN

Aditivo	Uso recomendado				
	Recubrimiento	Resanes y Ribetes	Reintegración volumétrica	Consolidación	Impermeabilización
Mucilago de nopal	✓	✓	–	✗	✗
Sangre	–	✗	✓	✓	✓
Huevo	✗	✗	✓	✓	✓
Clara	✗	✗	–	✗	✗
Yema	✗	✗	✓	–	✗
Manteca de cerdo	–	✗	✗	✗	✓
Leche	–	–	✗	✗	✗
Miel	–	✓	✓	–	✓
Fécula de maíz	✓	✓	✓	–	✗
Lana	✓	–	✓	✓	✗
Pelos	✓	–	✓	–	✗
Pluma	✓	–	✓	–	✗
Algodón	✓	–	✓	–	✗
Arcilla	✗	✓	✓	✓	✗
Polvo de	✗	✓	✓	✓	✗

cantera					
Polvo de ladrillo	×	✓	✓	✓	×
Ceniza volcánica	×	✓	✓	✓	×
Simbología:					
✓ Recomendable		– Poco recomendable		× No recomendable	

Tabla 6. Resumen del uso recomendado de los aditivos, según las propiedades que ofrecen al mortero.
Elaborada por MGDC.

REFLEXIONES

Los morteros, al igual que cualquier material de restauración que forma parte de un edificio en una intervención, deben cumplir con unas condiciones básicas para que además de ser aplicables, no se produzca ningún tipo de alteración y cumplan la función de protección en un tiempo determinado.

A través de la historia se han conservado elementos del pasado por diversas motivaciones, entre ellas religiosas, políticas, históricas o estéticas. Con el desarrollo de la conservación se hizo patente la responsabilidad que conlleva el acto de conservar, ya que la elección de los criterios, materiales y técnicas incide directamente la transmisión adecuada del mensaje.

Los aditivos orgánicos e inorgánicos se han mezclado con los morteros de cal a través de diversas culturas y épocas. Actualmente el estudio de morteros antiguos se ha extendido, ya que presentan una elevada compatibilidad con los materiales de construcción del Patrimonio Arquitectónico. El escaso conocimiento de las técnicas de fabricación y métodos de aplicación, han obligado a restauradores e investigadores a experimentar con materiales nuevos y tradicionales. Sin embargo no se pueden establecer estudios adecuados para el diseño de morteros de restauración, debido a la poca normatividad y regulación de estos.

Cada intervención cuenta con particularidades que hacen el proyecto totalmente diferente, el profesional que tenga en sus manos la responsabilidad de intervenir un bien histórico, debe estar preparado para asumir los retos que se le presenten durante el proceso. Las decisiones que se tomen deben estar basadas siempre en un estudio amplio y minucioso, se debe tener cuidado sobre todo de las falsificaciones, es complicado establecer una postura donde se respete la época del edificio, pero también respetar la época actual. Es por ello la necesidad de una adecuada preparación, que permita al restaurador una visión crítica y objetiva. El amplio conocimiento es el que permitirá elegir el criterio adecuado que beneficie tanto al monumento como a la sociedad.

Las obras arquitectónicas son legados históricos que nos han dejado nuestros antepasados y constituyen nuestro patrimonio arquitectónico. Debemos conocerlas, estudiarlas, valorarlas y conservarlas para transmitir las a las generaciones futuras.²³⁰

CONCLUSIONES

El propósito de esta tesis ha sido la revisión histórica de los aditivos presentes en las construcciones arquitectónicas, y de manera práctica se ha experimentado sobre la influencia de los aditivos en los morteros de base cal industrializada y su posible utilización como morteros de restauración.

Los morteros de cal son prácticamente insustituibles para la restauración arquitectónica, tanto en la solución de problemas estructurales como para la protección de la piedra. Los morteros permiten recuperar la integridad de los edificios a restaurar e incluso recuperar algunos de sus elementos ornamentales.

En obras de nueva arquitectura, la cal ofrece propiedades químicas y mecánicas, además que consiguen una gran estética por la posibilidad de colores y texturas que permiten embelleciendo espacios interiores y exteriores. Dentro de la arquitectura contemporánea es posible encontrar edificios cuyo revestimiento principal son los

²³⁰ José Antonio Terán Bonilla, "Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica" en *Conserva*, Núm. 8, 2004, p. 102.

morteros de cal, a continuación se retoman las ventajas de utilizar cal en restauración y en arquitectura contemporánea:

1. Baja retracción
2. Lento endurecimiento
3. Óptimas propiedades físicas y mecánicas
4. Fácil adaptación a las deformaciones del soporte
5. Facilitan la transpiración del muro
6. Baja conductividad térmica
7. Estabilidad al fuego
8. Fácilmente trabajables
9. Durabilidad
10. Presenta opciones decorativas
11. No agresiva con el medio ambiente

Es necesario difundir las ventajas del uso de técnicas y materiales tradicionales, el contacto directo con los artesanos y las técnicas empleadas en sus labores, para desarrollar el interés y la comprensión del material y el respeto por el medio ambiente. La utilización de la cal, por sus características naturales tienen ventajas sobre: habitabilidad interior, confort, durabilidad y el mantenimiento de la vivienda.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que existe constancia en la literatura sobre la utilización de aditivos orgánicos e inorgánicos en los morteros de base cal, utilizados de manera empírica con el objetivo de mejorar las características físicas de éstos. Es común encontrar el uso de dos o más aditivos en una mezcla, en este caso se realizaron experimentos con aditivos de manera individual, para identificar las propiedades de manera aislada, encontrándose que los aditivos afectan significativamente el comportamiento de los morteros.

Fueron estudiados 15 tipos de aditivos divididos en dos grupos: orgánicos e inorgánicos, los cuales proporcionaron ventajas y desventajas al momento de aplicarse, lo cual permitió hacer una propuesta de un posible uso en la construcción.

El objetivo de ésta investigación ha sido identificar el efecto de los aditivos para la propuesta de morteros de restauración para ser usados en edificios históricos, y de ser posible retomar la tradición constructiva y utilizarla en edificios modernos. Para concluir se muestran algunos aspectos importantes para diseñar morteros de restauración:

1. Una restauración debe surgir de un proyecto donde se considere la utilización de materiales auténticos, morteros bien dosificados y materias primas controladas.
2. Para la elección de los materiales: aglutinantes, agregados y adiciones, se deben cumplir con los requerimientos de compatibilidad e idoneidad.
3. La elección de las proporciones de los materiales debe ofrecer rendimientos tanto en estado fresco como en estado endurecido.
4. La mano de obra deberá ser especializada, y contar con el conocimiento de la experiencia de construir.
5. Los aditivos

El empleo de materiales compatibles con edificios históricos, es un tema de creciente interés en el ámbito de la Arquitectura, ya que se ha difundido la importancia de conservar el patrimonio, como testigo fiel de nuestra historia. Sin embargo, ante la pérdida de las tradiciones constructivas, es necesario el estudio de las propiedades de los morteros en laboratorios especializados, que permitan la experimentación de materiales con fines de conservación.

Esta tesis representa un avance en la experimentación con diversos aditivos y la comparativa de sus propiedades. Contribuye a la supervivencia del patrimonio arquitectónico por medio del entendimiento de las técnicas constructivas.

El diseño de morteros en un futuro requiere del establecimiento de una metodología específica para su estudio, además de ciertas condiciones para su estudio:

1. Laboratorio con espacios adecuados para el curado y posterior investigación sobre la influencia final del aditivo en el mortero.

2. Disponibilidad de equipo para caracterización de morteros y para realización de pruebas mecánicas.
3. Aplicación de métodos de prueba a más materiales naturales que puedan ser factibles para mejorar propiedades de la cal.

BIBLIOGRAFÍA

- Alberti, León Baptista, *Los diez libros de Arquitectura*, Madrid, Casa de Alfonso Gomez, 1582.
- Alejandro Sánchez, Francisco Javier, *Historia, caracterización y restauración de morteros*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2002.
- Alejandro Sánchez, Francisco Javier, et al. (coord.), *La cal: Investigación, patrimonio y restauración*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2014.
- Alonso Guzmán, Elia Mercedes (coord.) y Claudia Rodríguez Espinoza (ed.), *Conservación de materiales de interés histórico y artístico*, Morelia, PROMEP, 2013.
- Álvarez Galindo, José Ignacio, Antonio Martín Pérez, y Pedro J. García Casado, "Historia de los morteros" en *Boletín informativo*, Vol. 3, Núm. 13, 1995, pp. 52-59.
- Álvarez Pérez, Aurelio, et al., "El tapial y los morteros de cal en las construcciones de históricas de Tiripetio (Morelia, México)" en *Macla*, núm. 11, septiembre 2009, p. 23.

- Arcolao, Carla, *Le ricette del restauro: malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, Marsilio Editori, 1998.
- Arizzi, Anna, *Design of ready-to-use rendering mortars for use in restoration work*, tesis doctoral, Granada, Universidad de Granada, 2012.
- Arredondo y Verdu, F., “Yesos y Cales” en *Revista de Obras Públicas*, E. T. S. Ingenieros y Caminos, Madrid, 1991.
- Aspas, Florencio Javier, “Planteamientos Generales de la Intervención”, en Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, *Conservación Arqueológica. Reflexión y debate sobre teoría y práctica*, Junta de Andalucía, 1992, pp. 121-129.
- Bails, Benito, *De la Arquitectura Civil*, Valencia, Artes Gráficas Soler S.A., 1983.
- Barba Pingarrón, Luis e Isabel Villaseñor Alonso (ed.), *La cal: historia, propiedades y usos*, México, UNAM/Instituto de Investigaciones Antropológicas/ANFACAL, 2013.
- Barbosa L., Aida Liliana, et al., “Caracterización fisicoquímica de un biomaterial marino con fines de restauración de bienes culturales” en *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, Vol. 35, Núm. 136, 2011, pp. 303-314.
- Bedolla Arroyo, Juan Alberto, *Las estructuras de madera en las capillas de hospital de la sierra purépecha*, Tesis de Maestría, Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002.
- Bedolla Arroyo, Juan Alberto, et al., “Aditivos orgánicos en morteros de cal apagada en la edificación histórica” en *Ciencia Nicolaita*, Núm. 51, 2009, pp. 153-166.
- Bernis Mateu, Javier, “Patología y cuidado de los materiales de la construcción” en *De Re Restauratoria*, vol. 1, España, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, p. 95 - 122.

- Biscontin, Guido, Marta Pellizon Birelli y Elisabetta Zendri, "Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars" en *Journal of cultural Heritage*, Núm. 3, 2002, pp. 31-37.
- Bonfil, Ramón M., "Causas de deterioro en los monumentos" en *Apuntes sobre restauración de monumentos*, México, SEP, 1971, pp. 71 - 88.
- Bores, F., *Historia de la construcción*, La Coruña, Universidad de A. Coruña, 1998.
- Bravo-Hollis, Helia, *Las cactáceas de México*, México, UNAM, 1978.
- Calderón, Fidel Fabián, *Monasterios agustinos michoacanos del siglo XVI*, tesis de maestría, Morelia, UMSNH.
- Callebaut, K., et al., "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven,Belgium) Natural hydraulic lime or cement?" en *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, Núm. 3, 2001, pp. 397-403.
- Cañón Bermúdez, Juan David, *Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*, Tesis de licenciatura, Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- Carrington, D., y P. Swallow, "Limes and lime mortars", en *Journal of Architectural Conservation*, Vol. 1, 1996, pp. 7-22.
- Castro Villalba, Antonio, *Historia de la construcción arquitectónica*, Cataluña, Ediciones UPC, 1995.
- CMIC, "¿Qué son los aditivos para el concreto?" en *Construyendo Colima*, Núm. 12, Octubre 2009.
- Díaz Arreola, Emilia, et al., *Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra*, Chihuahua, CONACULTA/Centro INAH Chihuahua.
- Elert, Kerstin, et al., "Lime mortars for the conservation of historic buildings" en *Studies in Conservation*, Vol. 47, Núm. 1, 2002, pp. 62-75.

- Espinosa, P. C., *Manual de construcciones de albañilería por Don P. C. Espinosa*, Madrid, Imprenta a cargo de Severiano Baz, 1859.
- Gárate Rojas, Ignacio, *Artes de la cal*, Madrid, Instituto Español de Arquitectura, 2002.
- García Salinero, Fernando, *Léxico de alarifes de los siglos de oro*, Madrid, Real Academia Española, 1968.
- Garciniani, A., *Mesopotamia. Problemática y consideraciones generales para un estudio de la construcción*, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II, Historia de la Construcción, EUAT, Sevilla, 1992.
- Giraldez, P., et al., “Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics” en *Construction and Building Materials*, Vol. 8, Núm. 25, 2011, p. 3313.
- González Cortina, Mariano, *Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales*, tesis doctoral, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- Guerrero Baca, Luis Fernando, “Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva” en *Apuntes*, Vol. 20, Núm. 2, 2007, pp. 182-201.
- Gutiérrez de López, Libia, *El concreto y otros materiales para la construcción*, Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- Hernández, Esther, *Vocabulario en lengua castellana y mexicana de fray Alonso de Molina*, Madrid, CSIC, 1996.
- Hernández Toledo, Ur Iván, et al., “Cenizas de coco y hojas de pino para su uso como puzolana” en *Naturaleza y Desarrollo*, Vol.2, Núm. 7, 2009, pp. 33-44.
- Herrejón Peredo, Carlos, *El Colegio de San Miguel de Guayangareo*, Morelia, UMSNH, 1989.
- Hughes, John J., “The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars” en *Rilem Technical Committee*, UK, 2012.

- Igea, J., et al., “Caracterización de morteros mudéjares de la iglesia de San Gil Abad (Zaragoza, España): investigación de la tecnología de fabricación de morteros históricos de yeso” en *Materiales de Construcción*, Vol. 62, Núm. 308, 2012, pp. 515-529.
- Jáidar Benavides, Yareli, *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*, Tesis de licenciatura, México, ENCRyM, 2006.
- Kanan, María Isabel, “Argamasas de cal en las fortificaciones” en *Apuntes*, Vol. 19, Núm. 1, 2006, pp. 8-21.
- Krumnacher, Paul J., *La Cal y Tecnología del Cemento: La transición de Métodos Tradicionales a los del Tratamiento Regularizado*, tesis doctoral, Blacksburg, Instituto Politécnico de Virginia, 2001.
- Landa, Fray Diego de, *Relación de las cosas de Yucatán*, Yucatán, manuscrito, 1566.
- Luxhn, M.P., F. Dorrego y A. Laborde, “Ancient gypsum mortars from St. Engracia (Zaragoza, Spain): Characterization, identification of additives and treatments” en *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, Núm. 8, 1995, pp. 1755-1765.
- Luxhn, M.P. y F. Dorrego, “Ancient XVI Century mortar from The Dominic Republic: Its characteristics, microstructure and additives” en *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, Núm. 6, 1996, pp. 841-849.
- Maletta, Héctor, *Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica*, Lima, CIES-CEPES-Universidad del Pacífico, 2009.
- Malinowski, R., “Ancient mortars and concretes: Aspects of their durability” en *Histoire of Technology*, Vol. 7, 1982. pp. 89-101.
- Mangino Tazzer, Alejandro, *La Restauración Arquitectónica: Retrospectiva histórica de México*, México, Editorial Trillas, 1991.

- Marinowitz, Cornelia, Claudia Neuwald-Burg, y Matthias Pfeifer, *Historic Documents in Understanding and Evaluation of Historic Lime Mortars*, Vol. 7, Springer Netherlands, 2012.
- Martiarena, Xabier, "Conservación y Restauración" en *Cuadernos de Sección. Artes Plásticas y Documentales*, Núm. 10, 1992, pp. 177-224.
- Martínez Molina, Wilfrido, et al., "Adición de sangre producto del sacrificio de ganado bovino en morteros antiguos de albañilería elaborados con cal; su efecto en la resistencia mecánica" en *Ciencia Nicolaita*, Núm. 46, 2007, pp. 135-146.
- Martínez Molina, Wilfrido, et al., "Las adiciones de cactus opuntia blanco y su efectos sobre los morteros de albañilería elaborados con cal" en *Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Santiago de Chile, Chile, 2010.
- Martínez Ramírez, Ma. del Sagrario, *Desarrollo de nuevos morteros de reparación resistentes al ataque biológico. Empleo de sepiolita como material soporte de los biocidas*, Tesis Doctoral, Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 1995.
- Mas i Barberá, Xavier, *Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y replicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales*, tesis doctoral, Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- Monjo Carrió, J., "La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización" en *Informes de la Construcción*, Vol. 5. Núm 800, España, 2005.
- Moropoulou, Antonia, Asterios Bakolas, y Katerina Bisbikou. "Investigation of the Technology of Historic Mortars" en *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, Núm. 1, 2000, pp. 45-58.
- Morris, Earl H., et al., *Templos de los Guerreros de Chichen Itzá*, Yucatán, 1931, pp. 223-224.

- Navarro Sánchez, Luis Manuel (coord.), *Análisis de materiales*, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011.
- Ochoa Botero, Juan Carlos, *Uso de licor de plantas agaváceas como aditivo en morteros y hormigones*, Tesis Doctoral, Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- Oréa Magaña, Blanca Haydeé, “La fachada barroca del templo de Santo Domingo de San Cristóbal de las Casas (México) y su reintegración pictórica: una intervención polémica” en *Intervención*, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología, Número 9, enero- junio, 2014.
- Ortega Andrade, F., *Historia de la Construcción. Libro segundo: Romana y Paleocristiana*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Las Palmas de La Gran Canaria, 1994.
- OXICAL, *LA Cal Viva y Su Uso*, Consultado el 8 de diciembre de 2015, Recuperado de http://anfacal.org/media/Biblioteca_Digital/Restauracion_del_Patrimonio_Nacional/manual20con20teocali.pdf
- Palladio, Andrea, *Los cuatro libros de la arquitectura*, Madrid, Imprenta real, 1797.
- Palomo, A. et al., *Los Morteros Históricos: La caracterización y durabilidad de las nuevas tendencias para la investigación*, Madrid, CSIC, 2008.
- Rieger, Christiano, *Elementos de toda la arquitectura civil*, Madrid, Impreso por Joachin Ibarra, 1763.
- Rodríguez Mora, Oscar, *Morteros; Guía General*, Madrid, AFAM, 2003.
- Sahagún, Fray Bernardino Ribeira de, *Historia universal de las cosas de la Nueva España*, México, Editorial Pedro Robredo, 1938.
- Salamanca Correa, Rodrigo, “La tecnología de los morteros” en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Núm. 11, Bogotá, 2001, pp. 41-48.
- Sánchez, Javier A., “La retracción en los morteros de cal” en *Materiales de Construcción*, Vol. 47, Núm. 245, 1997, pp. 17-28.

- Schávelzon, Daniel y Víctor Rivera, “La destrucción de Kaminaljuyú” en *Mesoamérica*, Centro de Investigaciones Regionales de Mesoamérica y Plumssock Mesoamerican Studies, Núm. 14, 1987.
- Sepulcre Aguilar, Alberto, *Influencia de las adiciones puzolanicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico*, tesis doctoral, Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 2005.
- Sickels, Lauren B., “Organic vs. synthetics: their use as additives in mortars”, en *Symposium on Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*, 1981, pp. 23-25.
- Sickels, Lauren B. y Philip D. Allsopp, “Lime and its place in the 21st century: combining tradition, innovation, and science in building preservation” en *International Building Lime Symposium*, Orlando, Florida, 2005.
- Silva Rúelas, Luis, *Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1990.
- Silva Rúelas, Luis, *Los Acabados en los Muros de la Antigua Valladolid*, Morelia, Gobierno del Estado de Michoacán/Secretaría de Comunicaciones Y Obras Públicas, 1991.
- Symposium “Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings”, Roma, ICCROM , noviembre de 1981.
- Sickels, Lauren B., “Organic aditives in mortars” en *B.A.R.*, Vol. 1, 1981, p. 15.
- Sickels, Lauren B. y Philip D. Allsopp, “Lime and its place in the 21st century: combining tradition, innovation, and science in building preservation” en *International Building Lime Symposium 2005*, marzo, 2005.
- Spackman, C., *Some Writers on Lime and Cement From Cato to Present Time*, W. Heffer & Sons, Ltd., Cambridge, England. 1929.
- Tekin, Ç. y S. Kurugöl, “Çeşitli çrganik katkıların kirecin karbonizasyonu üzerindeki etkisi” (Turkish) on: *Journal Of The Faculty Of Engineering & Architecture Of Gazi University*, Vol. 27, Núm. 4, 2012, pp. 717-728.

- Tesch, V. y B. Middenfort, "Occurrence of thaumasite in gypsum lime mortars for restoration" en *Cement and Concrete Research*, Núm. 36, 2006, pp. 1516-1522.
- Torres Garibay, Luis Alberto (Coord.), *Manual General de Mantenimiento de Monumentos Históricos*, México, CONACULTA/INAH, 2009.
- Ramírez Romero, Esperanza, *Catálogo de construcciones artísticas, civiles y religiosas de Morelia*, Morelia, UMSNH-FONAPAS MICHOACÁN, 1981.
- Rieger, Christiano, *Elementos de toda la arquitectura civil*, Madrid, Impreso por Joachin Ibarra, 1763.
- Vicat, Louis Josephine, *Mortars and Cements*, Londres, Architectural Library, 1837.
- Vitrúvio Polion, Marco Lucio, *Los diez libros de Arquitectura*, traducción del latín y comentarios de: Joseph Ortiz y Sanz, Madrid, Imprenta real, 1797.
- Wei, Guofeng, et al., "An experimental study on application of sticky rice-lime mortar in conservation of the stone tower in the Xiangji Temple" en *Construction and Building Materials*, Núm. 28, 2012, pp. 624-632.
- Wisser, S., K. Kraus, y D. Knöfel, "Composition and properties of historic lime mortars" en *Proceedings of the VI International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, J. CIABACH, 1988, pp. 484-491.
- Zavala Paz, José, *El acueducto en su segunda centuria*, Morelia, ELECTROLETRAS, 1985.

GLOSARIO

A

ADHERENCIA. Es la capacidad de absorber tensiones normales o tangenciales en la superficie de la interface mezcla-elemento constructiva, en otras palabras es la resistencia de oposición, a despegar dos o más elementos unidos.

ADITIVO. Material Añadido antes o durante la mezcla del mortero, en pequeñas cantidades en proporción a la masa del ligante, de manera que aporte a sus propiedades determinadas modificaciones bien definidas.

AGLOMERANTE. Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo exclusivamente físico.

ALARIFE. Arquitecto. En árabe: sabio, maestro, el entendido de las artes mecánicas.

ALUMBRE. Sulfato de alúmina y potasa: sal blanca y astringente que se halla en diversas rocas y tierras, de las cuales se extrae por disolución y cristalización. Es cristalino, blanco o pulverulento. Regula el fraguado.

ARGAMASA. Mezcla de cal, arena y agua principalmente. Se usa para unir piezas o ladrillos en obras de albañilería.

B

BLANQUEADO. Capa o conjunto de capas, constituido por yeso, cal u outro material que constituye el acabado de un paramento o la base de una pintura.

C

CAL. La piedra quemada convertida en blandos terrones, que se desmoronan y vuelven en polvo.

CAL AÉREA. Carácter de una cal que carbonata con el gas carbonico del aire.

CAL APAGADA. La que resulta de añadir a una cal grasa más agua de la necesaria.

CALIZA. Roca sedimentaria que contiene carbonato de calcio. Se llaman carbonatos de cal. Su formula es Ca CO_3 .

CARBONATACIÓN. Estos procesos son el resultado de la insolubilidad de los carbonatos en contraste con la solubilidad de los bicarbonatos. El agua del suelo está cargada de CO_2 y puede disolver los carbonatos pasándolos a bicarbonatos que pueden profundizar en el suelo y entonces pueden precipitar produciendo acumulaciones de carbonatos, generalmente constituidos por calcita.

CEMENTANTE. Material que desempeña la función de aglomerante en una argamasa. Es el material responsable de la cohesión de una argamasa.

CICLO DE LA CAL. Serie de reacciones químicas que se llevan a cabo durante la calcinación apagado y fraguado de la cal. Estas reacciones constituyen un ciclo, ya que comienzan y acaban con carbonato de calcio.

COLA. Cierta licor fuerte que se hace de las extremidades de las pieles y queda claro y transparente. Después se desata al fuego con un poco de agua y con él juntan los carpinteros y ensambladores y los demás oficiales de madera.

D

DURABILIDAD. Es la habilidad de una estructura para mantenerse estable en su apariencia original, a través de los años.

E

EFLORESCENCIA. Son manchas exteriores o abombamientos superficiales de los revestimientos de muros. Se perciben como manchas blancas en los aplanados y en las unidades de albañilería.

ENFOSCADO. Constituido por una o varias capas de mortero, cuya función es procurar una superficie plana y homogénea, así como servir de soporte a un revoco o enlucido.

ENLUCIDO. Capa de mortero con que se resisten los paramentos de las distintas fábricas, tiene por objeto preservar las paredes de la acción de los agentes atmosféricos. La humedad ascensional es la más peligrosa para los revoques ya que se hidrata y hay aumento de volumen. La protección se logra añadiendo sustancias impermeabilizantes y consolidantes.

ESCAYOLA. Sulfato de calcio semihidratado obtenido por cocción del yeso a 120°C.

ESGRAFIAR. Dibujar o hacer labores con el grafito sobre una superficie estofada que tienen dos capping o colores superpuestos, haciendo saltar en ciertos puntos la capa superior para dejar descubierta la capa siguiente de distinto color.

ESTUCO. Pasta de yeso, cal y agua de cola, fácil de moldear y útil para la decoración de relieves en las paredes, obteniéndose unas superficies muy lisas.

F

FÁBRICA. Construcción u obra realizada con piedra o ladrillo y argamasas.

FRAGUADO. Endurecimiento de un cementante. En las cales aéreas el fraguado es aéreo, es decir, el material tiene que secarse. En las cales hidráulicas y puzolánicas el fraguado es hidráulico, es decir, endurece cuando se le agrega agua.

FRESCO. Pintura que se hace en paredes y techos con colores disueltos en agua de cal y extendidos sobre una capa de estuco fresco.

H

HIDRÁULICO. Dícese de las cales y cementos que se endurecen en contacto con el agua y también de las obras donde se emplean dichos materiales.

I

INERTE. Agregado (material de carga) que no reacciona químicamente con la cal.

L

LECHADA. De leche por el color. Masa muy fina de cal o yeso, o de cal mezclada con arena o yeso, junto con tierra para blanquear paredes o para unir piedras o hiladas de ladrillo.

M

MAMPOSTERIA. Técnica constructiva que consiste en la colocación manual de los “mampuestos” o materiales que lo componen, los cuales pueden ser ladrillos, tabiques, sillares o fragmentos irregulares de roca.

MATERIAL DE SACRIFICIO. Material utilizado en intervenciones de conservación, y hacia el cual se dirigen los agentes de deterioro, protegiendo de esa forma a los materiales constructivos originales.

MEZCLA. Argamasa, mortero.

MORTERO. Mezcla de agua, arena y un conglomerante como la cal o el cemento.

O

ÓSMOSIS. Difusión que tiene lugar entre dos líquidos o gases capaces de mezclarse a través de un tabique o membrana semipermeable.

P

PERMEABILIDAD. Es la resistencia de un material al paso del agua. Depende del grado de porosidad del material.

PIEDRAS. Sustancia mineral dura y compacta que no es terrosa ni metálica, se dividen en tres grupos: Ígneas, sedimentarias y metamórficas

PLASTICIDAD. Es la propiedad que tienen los cuerpos o material de aceptar deformaciones permanentes, es decir, que no desaparecen cuando se quita la carga.

PUZOLANA. Se origina en cenizas volcánicas en Pouzzole (Italia). Material rico en aluminio, sílice, cal y hierro, reaccionando con la cal y agua para formar un hidrato estable que contribuye a las propiedades hidráulicas del mortero.

R

RETENCIÓN. Es la capacidad de una mezcla para ceder o retener el agua que puede ser absorbida por los elementos constructivos.

REVESTIMIENTO. Capa o conjunto de capas colocadas o aplicadas sobre un determinado soporte, pudiendo ubicarse tanto en el interior como en el exterior. Su función es proteger la superficie frente a agresiones externas, así como proporcionar un acabado estético.

REVOCAR. Enlucir un paramento, sobre todo si se hace de nuevo sobre el anterior enlucido.

REVOCO. Capa o mezcla de cal y arena u otro material análogo con que se revoca.

ROCALLAJE. Mortero decorativo que consiste en incrustar, en el mortero, piezas de conchas, fragmentos de piedras, escorias de hierro u otros, para la formación de dibujos.

T

TRABAJABILIDAD. También llamada correa, es una combinación de consistencia, plasticidad, cohesión y adhesión, se percibe por la facilidad o dificultad de expandir la mezcla.

Y _____

YESO. Sulfato de cal hidratado, compacto o terroso, blanco por lo común tenaz y tan blando que se raya con la uña

ANEXOS

En la bibliografía histórica o en la práctica de la conservación del Patrimonio Construido es posible encontrar otros usos de la Cal, diferente a la utilización en morteros, pero también se encuentran otras técnicas utilizadas en la construcción para revestimientos e impermeabilizaciones, que no incluyen éste material.

ANEXO 1. PINTURA DE CAL

La utilización de la cal para la elaboración de pinturas por el ser humano se remonta a periodos antiguos, lo cual se ha transmitido a través de generaciones. Esta mezcla permite que los aplanados “respiren”, dejando salir la humedad sobre todo en muros de adobe o de piedra. La pintura además de proporcionar protección, otorga al edificio buena apariencia.

En nuestro país, se agregan normalmente aditivos como sal, alumbre, baba de nopal, baba de choya (cactácea), o la resina de árboles de la región. Las pinturas base cal pueden ser muy económicas, se utilizan tanto en interiores como en exteriores y son amigables con el medio ambiente.²³¹

El procedimiento y los materiales para la pintura de cal con aditivos, los propone el INAH en el *Manual de Conservación de Edificios Históricos*, para una superficie aproximada de 60 m²:

1. Cal
2. Agua
3. Arcillas de colores, pigmentos minerales o pigmentos para cemento
4. Baba de nopal
5. Alumbre o Sal de cocina.

Se deja reposar en agua 8 pencas de nopal por 24 horas para que suelte el jugo. Colar el agua con un mosquitero para retener cualquier partícula de nopal, utilizar esa agua para la mezcla y agregar más agua limpia si hace falta para completar 15 litros. Agregar al agua 7 kilos de cal, revolviendo constantemente hasta obtener una pasta uniforme.

En otro recipiente hervir 5 litros de agua, apagar el fuego y agregar 300 gr de alumbre, dejar enfriar y verter lentamente en la mezcla de cal. La utilización del alumbre sirve para que la pintura se fije más al muro, en caso de no contarse con ese material, puede sustituirse con 300 gr de sal de cocina. Finalmente se agregan los colorantes

²³¹ Manual de OXICAL, *LA Cal Viva y Su Uso*.

deseados, los colores más recomendados para usar con la cal son: ocre, café, azul ultramar, rojo oxido y el negro (Fig. 1)



Figura 39. Preparación de la Cal. En *Manual de Conservación de Edificios Históricos*



Figura 40. Aplicación de la pintura de cal. En *Manual de Conservación de Edificios Históricos*

Se recomienda hacer toda la cantidad de pintura deseada, ya que es muy difícil obtener el mismo tono en dos preparaciones distintas. Las muestras serán aplicadas en muros previamente humedecidos y se dejará secar para que dé el tono deseado, ya que al secarse blanquea casi un 50%. Es recomendable colocar “dos manos” de pintura (Fig. 2), dejando secar entre una y otra.

PINTURA AL FRESCO

La técnica de la pintura al fresco se diferencia de la pintura de cal tradicional en que se realiza cuando el soporte se encuentra húmedo o semi-húmedo, de esta manera los pigmentos se incorporan a la cal cuando ésta cristaliza y se carbonata superficialmente, es decir, los pigmentos se incorporan en la estructura formando parte del soporte.

Las dificultades de la pintura en fresco derivan de la necesidad de mantener el soporte húmedo, lo cual limita el tiempo de aplicación a un día, y además es difícil la corrección de errores que se cometen durante el pintado. Es una técnica que requiere de precisión y rapidez.

El proceso para la realización lo explica Francisco Javier Alejandro Sánchez. Para la realización de frescos sencillos: la base del trabajo es un estuco enlucido blanco, formado por dos capas de mortero magro de cal y una tercera de mortero graso que se ha planchado con la llana, pero que no se lava para que pueda absorber la pintura de cal con la que se va a pintar. Sobre él se perfilan las figuras o motivos a reproducir y posteriormente se procede al pintado con pincel y los pigmentos diluidos en agua de cal.

Cuando los frescos son complejos y requieren de más de una jornada de trabajo se requieren de más fases:

1. Se tiende la primera capa de estuco y se proceda a aplanar.
2. Se tiende la segunda capa de estuco y se aplanar.
3. Mediante la técnica de estarcido²³² se hace la copia del dibujo o motivo a reproducir, perfilando con pintura de cal para elaborar el boceto preliminar.
4. Teniendo la tercera capa de estuco graso, se trabaja en la fracción que se considera realizable en una jornada de trabajo (reenlucido con la llana y pintado de la misma). Las uniones entre distintas jornadas deberán coincidir con los encuentros entre piel y vestidos o en los pliegues de los vestidos, con la finalidad de disimular cualquier imperfección.

²³² Técnica que consiste en estampar sobre una superficie el dibujo que queda en el hueco de una plantilla perforada, pasando sobre ella un pincel o trapo empapados en pintura; se emplea principalmente como técnica decorativa.

ANEXO 2. USO DE JABON Y ALUMBRE COMO IMPERMEABILIZANTE

El uso de jabón y alumbre es una técnica de impermeabilización utilizada comúnmente en los sistemas constructivos tradicionales. Además de impermeabilizar, se ha encontrado que su uso evita la proliferación de microorganismos. Para su preparación se requiere el siguiente material y equipo:

1. Solución de jabón alcalino de pastilla, preparada calentando el agua a 80°C o hasta que el agua haga ebullición y se agrega el jabón rallado en escamas, se disuelve completamente:
 - a. 5 pastillas de jabón de lejía, o de cualquier jabón de pastilla, de preferencia sin perfumes ni colorantes, por lo que su color suele ser café oscuro. (Fig. 3)
 - b. 20 litros de agua
2. Solución de alumbre, se prepara calentando el agua a 60° C y se agregan los cristales de alumbre, agitando con una pala hasta que se disuelven:
 - a. 1 kg de cristales de alumbre reducidos a pequeños fragmentos para facilitar su disolución.
 - b. 20 litros de agua.



Figura 41. Jabón utilizado para impermeabilizaciones. Foto. MGDC.

Una vez que las superficies a impermeabilizar se encuentren libres de grietas y fisuras, y que hayan sido limpiadas, se aplican tres capas de solución de jabón y tres de alumbre, alternadamente. Ambas soluciones se aplican calientes, con escobas de plástico. La primera capa será de jabón y la última de alumbre. Las tejas pueden ser sumergidas directamente. Se recomienda repetir este procedimiento cada año, antes

de la temporada de lluvias.²³³ Se colocan 3 capas de cada una de las mezclas, antes de colocar la siguiente, la anterior debe estar totalmente seca.

²³³ Procedimiento sugerido en base al *Manual de Conservación preventiva del antiguo convento de Tepoztlán*.

ANEXO 3. APAGADO DE LA CAL

El apagado de la Cal es un proceso mediante el cual la cal de piedra obtenida de la calcinación de rocas calizas, transforma su estado de Cal “viva”, a Cal “muerta” o “apagada” por medio de la hidratación para utilizarla en la elaboración de mezclas y pinturas. El apagado ó la hidratación de la Cal consiste en el siguiente procedimiento:

- 1 tambo (se sugiere de 200 lts. según la cantidad de cal requerida)
- ½ tambo de agua
- 4 sacos de Cal
- Pala o palo (para mezclar)

Una vez que ya se tiene el tambo con el agua, se van vaciando los sacos de cal poco a poco y se mezclan hasta que quede una consistencia cremosa, este es el punto en que se deja reposar. Se recomienda que se deje hidratar por lo menos dos días y tapparla con hule negro. Ya que se dejó reposar se y verá que la cal habrá consumido la mayor parte del agua; se debe batir de nuevo antes de usarse.

Durante el reposo se deberá verificar que la superficie no quede seca ni agrietada; siempre debe haber una capa de agua ligera. El periodo máximo recomendado para que esta Cal pueda ser usada es de seis meses; cuanto más tiempo pase en reposo, mejor comportamiento tendrá después, carbonatándose de forma óptima al utilizarse aplanados, argamasas o morteros.

La preparación de los morteros va a variar dependiendo de la función que tenga, del material que va a unir y de la granulometría de las cargas que se van a utilizar. La cal en un mortero nunca deberá sobrepasar el volumen de la carga, es decir las proporciones que encontraremos es desde una parte de la cal por una de arena, cuando se trata de un aplanado fino, o de una parte de cal con 3 de arena cuando se trata de un repello o material de rejunteo.²³⁴

²³⁴ Este anexo se basa en el apartado del *Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra*, INAH y el manual *La Cal Viva y su Uso en la Restauración*, de Oxical.

ANEXO 4. COMPARATIVA ENTRE CAL Y CEMENTO

La cal y el cemento son materiales muy diferentes, cada uno proporciona cualidades buenas y malas, pero han sido tan importantes que han permitido la construcción en diferentes periodos. Gracias al cemento Portland se han podido construir muchas de las obras arquitectónicas modernas, pero como se ha dicho, la cal es más compatible con los criterios de restauración de monumentos arquitectónicos, además de ser poco dañino al medio ambiente.

Estos dos materiales trabajan de manera muy diferente y por ello son incompatibles. De ahí la necesidad de conocerlos mejor para aprovechar sus características, a continuación se muestra una tabla con la comparativa de sus características:

Tabla comparativa entre la Cal y el Cemento	
Morteros de Cal	Morteros de Cemento
Fabricación y costos	
Para cal aérea: calcinación de piedra caliza a 900°C. Para cal hidráulica natural: caliza y arcilla calcinadas entre 950 y 1250°C.	Temperatura de cocción de piedra caliza y arcillas a las de 1400°C, para la formación del clinker.
Por lo general, costo de venta más elevado que el cemento.	Costo de venta menos elevado que la cal, por la cantidad de comercialización de la cal.
Costos de producción menores que el cemento. La producción de cal requiere entre 47 y 70% de la energía usada para la producción del cemento, por lo tanto menos emisores.	Requerimiento de gran cantidad de energía y alta emisión de CO ₂ .
Preparación	
Requiere de conocimientos para obtener morteros con características específicas.	Fácil preparación.
Características de los morteros	
Largo tiempo para la carbonatación	Fraguado rápido

Morteros de durezas variables, en función de proporciones y aditivos.	Morteros de dureza elevada
Morteros que permiten cierta flexibilidad y movimiento en las construcciones con materiales porosos.	Morteros con mayor rigidez y menor flexibilidad que la de los morteros porosos
Poco coeficiente de expansión térmica	Elevado coeficiente de expansión térmica
	Elevado contenido de sales solubles
Morteros y aplanados porosos (varía en función de los componentes del mortero y de la técnica de aplicación).	Mortero con mucho menor porosidad y muy baja permeabilidad al vapor de agua.

Tabla 7. Comparativa entre Cal y Cemento. Elaborado por MGDC. En base al estudio de Valerie Magar, en *La cal: historia, propiedades y usos*.

La cal resulta más compatible en la restauración de monumentos arquitectónicos debido al contenido de elementos nocivos para éstos en los cementos. Por otro lado, el cemento presenta una mayor resistencia y precisa de mano de obra menos cualificada para su puesta en obra, por lo que se reduce el coste económico de su uso. En los procesos de fabricación, el cemento es más contaminante y no es reciclable, además de no absorber posteriormente dióxido de carbono a lo largo de su vida útil como hace la cal, por lo que resulta un material menos sostenible. En cuanto a sus aplicaciones, los morteros de cal puros presentan algunas ventajas sobre el cemento²³⁵:

1. Buena plasticidad y trabajabilidad, ya que la cal envuelve la superficie entre los áridos evitando el rozamiento y mejorando el deslizamiento.
2. Ausencia de retracción debido a la estabilidad volumétrica frente a la humedad.
3. Adaptación a las deformaciones y bajo riesgo de agrietamiento debido a su elasticidad
4. Permeabilidad al vapor de agua debido a su porosidad para permitir la carbonatación del óxido cálcico, que confiere transpirabilidad y evita las

²³⁵ Alba Pérez, *Cal vs. Cement*, en Forum Iberico de la Cal.

condensaciones, además de proporcionar un buen aislamiento térmico y acústico.

5. No provoca eflorescencias ya que no contiene sales solubles
6. Permite realizar capas más finas que los morteros de cemento
7. Garantizan el sellado y estucado
8. Resistencia a la penetración de agua de lluvia
9. Desinfectante y fungicida natural debido a la alcalinidad de la cal
10. Ignífugo, no produce gases tóxicos

Como se observa, cal y cemento son dos materiales que han suplido uno a otro, sin embargo su comportamiento los hace materiales muy diferentes, que deben ser utilizados de manera específica de acuerdo a los requerimientos de cada caso.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Trabajos de los alumnos de la ENCRyM, donde utilizan el nopal como aditivo en mortero de cal. (Foto: MGDC, 2014).....	11
Figura 2. Maqueta de ensayo con la utilización de materiales tradicionales. (Foto: MGDC, 2014)	11
Figura 3. Proceso de investigación en base a los lineamientos planteados en; <i>Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica</i> de Hector Maletta. ..	17
Figura 4. Máscara de Jericó. Fuente: “sobre la cal”, https://sobrelacal.wordpress.com/	24
Figura 5. Preparación del mortero de cal en el siglo XVI. Fuente:	27
Figura 6. Cemento Portland de la Marca Cemex.	28
Figura 7. Componentes de los morteros históricos.	37
Figura 8. Ciclo de la cal, fuente: Xavier Mas i Barberá, <i>Estudio y caracterización de morteros compuestos</i> , p. 44.	47
Figura 9. Cal Muro.....	82
Figura 10. Localización del banco de materiales. Imagen: Google Earth.....	83
Figura 11. Amasado manual de la mezcla. Foto: AJVP	86
Figura 12. Amasado con ayuda de taladro mecánico. Foto: AJVP	86
Figura 13. Adición de sangre al mortero.....	86
Figura 14. Adición de algodón al mortero al 3%	86
Figura 15. Cubos de 5 cm.....	87
Figura 16. Prismas rectangulares.....	87
Figura 17. Pisón	87
Figura 18. Briquetas.....	88
Figura 19. Cilindros (nótese la contracción de la mezcla en aproximadamente un 10% de la longitud)	88
Figura 20. Mesa y pisón de prueba. Foto: Judith Alejandra Velázquez Pérez.....	90
Figura 21. Medición en el diámetro del mortero extendido una vez que es sacudida la mesa. Foto: JAVP	90

Figura 22. Prueba de compresión. Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”	92
Figura 23. Prueba de tensión. Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”	92
Figura 24. Preparación de clara y yema de huevo.....	96
Figura 25. Desmoronamiento de mezcla con yema de huevo.....	96
Figura 26. Sangrado durante el proceso de fraguado con aditivo de clara de huevo....	97
Figura 27. Retracción en muestras de mortero con clara de huevo.....	97
Figura 28. Sangrado en losa en la aplicación de mortero con leche como aditivo.	98
Figura 29. Losa de adherencia con aditivo de plumas.....	99
Figura 30. Losa de adherencia con aditivo de pelo.....	99
Figura 31. Agrietamiento con polvo de cantera.....	100
Figura 32. Especímenes con adición de arcilla en diferentes proporciones.....	100
Figura 33. Conservatorio de las Rosas con aplanado. Fuente: conservatoriodelasrosas.edu.mx	109
Figura 34. Conservatorio de las Rosas, estado actual. Fuente: conservatoriodelasrosas.edu.mx	109
Figura 35. Palacio de Justicia, Morelia. Larguillo elaborado por: MGDC	110
Figura 36. Chimenea en Ex Convento del Carmen, Morelia. Foto: MGDC.	112
Figura 37. Pieza restaurada en el Ex Convento de San Juan Bautista, en Tetela del Volcán. Foto: MGDC.....	112
Figura 38. Pared del templo del Carmen en Morelia, se observa la necesidad de rejuntado entre los materiales pétreos. Foto MGDC.....	114
Figura 39. Preparación de la Cal. En <i>Manual de Conservación de Edificios Históricos</i>	143
Figura 40. Aplicación de la pintura de cal. En <i>Manual de Conservación de Edificios Históricos</i>	143
Figura 41. Jabón utilizado para impermeabilizaciones. Foto. MGDC.	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los morteros.....	33
---	----

Tabla 2. Clasificación de los aditivos por su función en el mortero. Fuente: RILEM .60	
Tabla 3. El uso de aditivos orgánicos y sus propiedades usados hasta 1850. Tabla elaborada con base en los datos proporcionados por Ignacio Gárate Rojas en su libro <i>Artes de la cal</i>	64
Tabla 4. Uso de la Cal en Morteros. Elaborado por MGDC.	82
Tabla 5. Ventajas y desventajas durante la preparación de los morteros. Elaborada por MGDC.	102
Tabla 6. Resumen del uso recomendado de los aditivos, según las propiedades que ofrecen al mortero. Elaborada por MGDC.	119
Tabla 7. Comparativa entre Cal y Cemento. Elaborado por MGDC. En base al estudio de Valerie Magar, en <i>La cal: historia, propiedades y usos</i>	149