

Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas.

Metodología de estudio. Fundamentos

(1ª parte)



Esther Ontiveros Ortega

*Departamento de Análisis.
Centro de Intervención del IAPH*

Resumen

Tras abordar el tema de morteros de cemento portland como cierre de la fase de formulación y características, hecho justificado si se tiene en cuenta el papel desempeñado por este tipo de materiales en los últimos tiempos en las intervenciones, en este artículo se inicia una nueva línea de trabajo sobre el estudio de morteros de intervención "morteros de cal". El objetivo de esta fase del Subprograma de Normalización de Estudios Previos está centrado en las técnicas de análisis aplicadas a morteros de carácter histórico. Se pretende establecer una metodología globalizadora para aplicar sobre morteros antiguos y de restauración, basada en los trabajos de investigación realizados sobre éste tema por diferentes autores.

La necesidad de controlar los procesos de alteración a los que están sometidos los morteros en construcción históricas, como evaluarlos y reemplazarlos adecuadamente, ha hecho surgir un campo de investigación que aborda las diferentes técnicas y ensayos para la caracterización de estos materiales.

Los estudios que se han realizado recientemente, están dirigidos a establecer una metodología que permita, determinar las características de los materiales analizados y, por otra dar respuesta a la necesidad de conocer los procesos de degradación que le están afectando, como controlarlos y reemplazarlos adecuadamente.

Palabras clave

Morteros de cal / Metodología / Técnicas de análisis / Ensayos de laboratorio / Portlandita / Carbonatación

1. Introducción

Continuando con el Programa de Normalización de Estudios Previos y Control de Calidad de las Intervenciones, centrado en la Normalización de Técnicas de Análisis aplicadas a morteros de construcciones históricas, e iniciando la siguiente fase; en este artículo se abordará la Normalización de la metodología a emplear para la caracterización de los morteros, tanto los originales de construcciones históricas como los nuevos materiales empleados en restauración.

Cuando se habla de morteros de restauración, se hace referencia casi exclusivamente a morteros de cal. Las primeras investigaciones llevadas a cabo en este sentido se refieren a técnicas antiguas de elaboración: dosificaciones, materiales, puesta en obra en función del uso, incluso aditivos, propiedades especiales y procesos de alteración.

Los conocimientos empleados en construcción para el control de calidad de los morteros de cemento portland resultan insuficientes en el campo de las intervenciones, surgiendo la necesidad de introducir los conocimientos de otras disciplinas (química analítica, física de estado sólido, dinámica, geología mineralógica-petrográfica, etc.), que permita coordinar de forma adecuada las distintas piezas de un rompecabezas que actualmente no está totalmente resuelto.

El análisis sobre morteros tiene gran importancia en los siguientes campos de actuación sobre Patrimonio según Martín Pérez, (1990):

1. Restauración de monumentos. Si el análisis muestra que el mortero está en un buen estado de conservación, se puede utilizar para la restauración un mortero análogo o de composición similar que esté en armonía con la construcción antigua y satisfaga las exigencias de aquella. En caso contrario, se impone un estudio más completo para conocer las razones por las que el material no ha desempeñado eficazmente el cometido que tenía asignado.

2. Estudio de las relaciones entre la composición de los morteros y la cronología de las construcciones.

3. Estudio de sitios arqueológicos. El conocimiento de la composición de los morteros presenta indudable interés histórico y científico cuando se dispone de morteros datados.

La metodología de estudio a aplicar debe cubrir las siguientes necesidades prioritarias: caracterizar estos materiales, que incluye conocer las distintas técnicas de fabricación de morteros antiguos así como sus propiedades y tipologías y, como objetivos adicionales: obtener conclusiones de tipo histórico-arqueológico y poner de manifiesto su estado de conservación, teniendo en cuenta la tecnología de fabricación empleada y sus condiciones de exposición y puesta en obra.

El estudio llevado a cabo sobre este tipo de materiales puede aportar información de tipo arqueométrico

(información tecnológica y de tipo histórico) siempre que se pueda establecer una relación material-época. A estas conclusiones se puede llegar tras compaginar, previo a una valoración crítica, los datos obtenidos con las diversas técnicas de análisis y las hipótesis histórico-arqueológicas, de la Torre (1995). Esta metodología a la vez debe ser flexible para poder ser aplicada a cualquier tipo de mortero y que pueda ser empleada a casos concretos para satisfacer los objetivos del trabajo (Alessandrini, 1985).

Los últimos trabajos de investigación que se están llevando a cabo sobre morteros van orientados a la investigación sobre las técnicas de elaboración de nuevos morteros para las intervenciones, compatibles con los originales.

La caracterización de los morteros lleva consigo un gran número de determinaciones: caracterización visual (método adoptado por los arqueólogos), morfológica, mineralógica-petrográfica y físico-química (método adaptado por los tecnólogos). Estas investigaciones en gran parte van orientadas a la identificación y diseño de un material parecido o compatible con los materiales antiguos (Álvarez Galindo, 1997).

El conocimiento ha progresado sin duda, no obstante como se demuestra en un examen crítico, es difícil extrapolar desde estos estudios una metodología general para la caracterización adecuada. Uno de los mayores obstáculos es frecuentemente la heterogeneidad del material y la dificultad de obtener muestras de dimensiones significativas, para llevar a cabo todas estas determinaciones.

Por otra parte el mortero de cal es un material poco conocido cuya importancia por ahora es pequeña para la construcción moderna y, consecuentemente suscita poco interés entre los especialistas en materiales. La investigación en este campo está ampliamente justificada pero únicamente para necesidades específicas de restauración.

En este sentido el método a aplicar debe tener en cuenta la coordinación adecuada de las distintas técnicas y ensayos en función de los objetivos que se pretendan en cada caso, por esta razón la metodología de estudio debe plantearse más atendiendo al tipo de material y objetivos que a las técnicas en sí.

2. Fundamentos de la metodología de estudio sobre morteros

2.1. Antecedentes

La mezcla de las materias primas utilizadas en la elaboración de morteros plantea un problema analítico desde el punto de vista de la conservación de edificios históricos, en el que se incluyen características de los distintos componentes (árido, aglutinante y aditivo), su comportamiento una vez mezclados en estado plástico y el control de las modificaciones que

experimenta durante el proceso de endurecimiento y carbonatación.

El interés por los morteros de intervención en edificios históricos y los primeros intentos de formular correctamente el problema y aclarar estrategias de investigación datan de 1981, con ocasión del Simposium organizado por el ICCROM. Desde este momento los trabajos sobre el tema se han multiplicado y los especialistas tienen acceso a diversos métodos de investigación desarrollados ya ampliamente en la caracterización de la piedra. Las recomendaciones establecidas en este Simposium siguen siendo en la actualidad totalmente válidas.

Entre los temas de investigación de particular interés figuran el desarrollo de métodos que permitan la precisa determinación de la calidad del aglomerante y la influencia en las propiedades físicas y mecánicas de los clásicos agregados como las puzolanas, teja molida, etc. Aunque en los últimos años ha habido un avance importante, todavía hoy en día se pone de manifiesto la imposibilidad de determinar satisfactoriamente estas propiedades en los morteros antiguos, en buenas condiciones o dañados, y cómo reemplazarlos.

La tecnología moderna es capaz hoy en día de diseñar morteros con características bien definidas, que satisfagan las normas que garanticen en cada caso una restauración satisfactoria y en este sentido se está avanzando. Para que esto sea posible es importante seguir investigando sobre la clave "morteros de cal" y a la vez con ayuda de las nuevas tecnología reproducir estas condiciones en los nuevos morteros de intervención.

El tema ha sido tratado por diferentes autores tanto a nivel internacional como nacional. Las primeras investigaciones sobre estos morteros tradicionales (de cal) fueron realizadas por Jedrzejewska, (1960); ésta autora establece una metodología de análisis comparativo preliminar poco exacta que actualmente resulta insuficiente.

Más tarde Furlan et al. (1975), (1982) (1984) y (1990) proponen una forma de abordar el problema aunque no una metodología de estudio. En sus trabajos expone la necesidad de utilizar morteros de cal en las intervenciones sobre edificios históricos y pone de manifiesto el uso abusivo de los ligantes hidráulicos en este tipo de edificaciones, partiendo de la base de que se trata de un material no suficientemente experimentado cuyos efectos eran por entonces poco conocidos. Por otra parte este autor en sus trabajos muestra las ventajas de los morteros de cal y la necesidad de ensayar los materiales de esta naturaleza que se vayan a utilizar en las intervenciones de carácter histórico.

En esta misma línea podemos destacar los trabajos realizados por Peroni et al. (1981) y Collepardi (1990), donde se exponen los procesos de alteración originados en las construcciones históricas debido a la interacción química que tiene lugar al poner-

se en contacto los morteros de cemento portland con los materiales de fábrica original (piedra, ladrillo y mortero antiguo); poniendo de manifiesto que es la reacción alcalina de la sílice amorfa y las sales con formación de la etringuita y thaumasita las causantes del deterioro, siendo el agua el elemento condicionante de estas reacciones.

Peroni et al. (1981) utiliza una serie de técnicas y ensayos para determinar el comportamiento de los morteros (ensayos mecánicos, distribución de la porosidad y extracción de los componentes alcalinos mediante análisis químicos), poniendo de manifiesto la incompatibilidad en cuanto al comportamiento de los morteros de cemento respecto a los de cales tradicionales.

Alessandrini et al. (1992) en uno de sus trabajos sobre morteros, establece una metodología de estudio comparativa basada en la relación entre los datos obtenidos mediante análisis químicos y los métodos petrográficos. Para ello elabora morteros de cal con diferentes dosificaciones de árido-ligante. Los datos obtenidos mediante estas técnicas los analiza en función de su peso y volumen, indicando que los resultados van a depender en el primer caso del contenido en agua de constitución y grado de carbonatación y en el segundo caso de la textura que presente el mortero y de los valores de densidad del aglomerante y del árido. Este autor señala la validez del método y que debe ser tenido en cuenta a la hora de elaborar morteros de intervención.

A nivel nacional podemos destacar las recomendaciones dadas por Martín Pérez (1990), sobre la necesidad de un estudio completo sobre estos materiales en los que se incluye composición química, características petrográficas-mineralógicas y propiedades físicas y mecánicas. Su estudio basado en componentes químicos exclusivamente, dada la complejidad de estos materiales, persiguen resultados que permiten obtener una incertidumbre absoluta en cuanto a su interpretación.

En el campo de la investigación podemos destacar los estudios llevados a cabo por de la Torre López (1994); su trabajos centrados en el estudio de las fábricas de morteros de la Alhambra, han estado orientados a establecer una metodología de trabajo sobre morteros antiguos de fácil aplicación y que sea resolutive. En su estudio establece las siguientes fases.

1ª. Fase: Etapa previa en la que se incluye:

- Observación detallada del monumento y toma de muestras seleccionando lugares que presenten importantes indicios de alteración y zonas donde el material original esté en buenas condiciones. En sus trabajos señala la dificultad que supone tomar muestras representativas de un edificio de interés histórico-artístico y las limitaciones para su estudio que presenta este tipo de material.
- Documentación bibliográfica acerca de la historia del edificio. Esta información previa permite la pro-

gramación del muestreo, en el que se incluye la toma de muestras sobre materiales originales y posibles intervenciones posteriores.

2ª Fase: Metodología de estudio.

La metodología que propone está en función de los objetivos pretendidos, establece una relación directa entre las técnicas de análisis y la cronología del material; para ello selecciona una serie de técnicas, ya clásicas en el tema de la piedra, que permitan dar solución a las cuestiones previamente planteadas con la finalidad de obtener resultados concluyentes.

En esta misma línea de trabajo Ontiveros Ortega et al. (1996), (1997) y (1999), lleva a cabo un estudio comparativo entre morteros de distintos periodos árabes para determinar la forma de fabricación y composición de los mismos (en su caso se trata de morteros empleados para el levantamiento de muros de tapiales a base de tierra y cal y morteros de revestimiento de los muros a base de árido y cal). En sus trabajos utiliza una metodología que le permite caracterizar los morteros endurecidos; las limitaciones de su estudio se han centrado fundamentalmente en la dificultad de separar el árido del aglomerante para la elaboración de las curvas granulométricas y la determinación de la plasticidad, introduciendo estos parámetros para la caracterización de los morteros antiguos, además de las técnicas clásicas aplicadas a la piedra.

El estudio comparativo de estas determinaciones con respecto al material de cantera resulta significativo; porque permite establecer las modificaciones que experimenta el material desde su extracción hasta su puesta en obra, de suma importancia para conocer la tecnología de fabricación empleada. Basándose en criterios arqueológicos y características constructivas, diferencia distintas técnicas de elaboración de los muros a base de cal en función de las diferentes etapas constructivas.

Álvarez Galindo (1997), en su estudio sobre la caracterización de morteros de edificios histórico navarros, establece una metodología teniendo en cuenta las determinaciones que se pueden llevar a cabo sobre morteros, agrupando las distintas técnicas de análisis con la finalidad de que sean concluyentes para estas determinaciones. Teniendo en cuenta la complejidad que supone abordar el tema de morteros y advirtiendo que no debe ser tomada de forma absoluta, el estudio lo plantea de la siguiente manera:

Determinaciones de tipo morfológico:

- Observaciones macroscópica y microscópicas.
- Observaciones al microscopio electrónico.

Caracterización mineralógica:

- Microscopio petrográfico.
- Análisis modal y análisis digital de imagen.
- Granulometría del agregado.
- Difracción de rayos X.

Caracterización química:

- Métodos químicos.
- Comparación de métodos
- Espectrometría de infrarrojo
- Análisis térmico-diferencial y termogravimétrico.

Caracterización físico-química y mecánica:

- Ensayos físicos
- Ensayos mecánicos
- Ensayos de datación

Entrando en materia de morteros de intervención, podemos decir que estos trabajos han estado orientada a poner de manifiesto la viabilidad de la normativa existente; sobre todo la UNE para la elaboración de morteros aptos para las intervenciones.

En este sentido cabe destacar las investigaciones llevadas a cabo por Alejandro Sánchez (1996), sobre morteros de cal y albero y la influencia de aditivos de tipo humo de sílice (producto comercial de gran actividad puzolánica) en las propiedades de uso en construcción (dosificaciones y relación agua-cal) y para su empleo en restauración.

Para ello elabora morteros utilizando materias primas que cumplan las exigencias establecidas por la normativa existente UNE (granulometrías del árido, contenido en finos y material arcilloso, propiedades físicas y químicas de la cal, control ambiental de las condiciones de curado de los morteros y control del CO₂ "carbonatación").

Estos morteros presentan las siguientes características composicionales: mortero de cal y albero, mortero de cal y arena normalizada, mortero de cemento blanco y albero y mortero de cemento blanco y arena normalizada.

El proceso de enmoldado-desmoldado y de curado de las probetas para la determinación de la resistencia a flexión y compresión lo llevó a cabo según la Norma UNE: 83-821-92 (tabla I) estableciendo modificaciones que el ha llamado "método abreviado", que consistía en el desmontado de las probetas antes de someterlas al curado en atmósferas húmedas.

Tabla I. Condiciones de confección y conservación de las probetas, según la norma UNE-821-92.

Condiciones de conservación	T=(20±2)°C H.=(95±5)% Atmósferas Húmedas		T=(20±2)°C H.=(65±5)%
Tiempo de conservación	5 días	2 días	21 días
Condiciones de confección	en molde	desmoldadas	desmoldada

La metodología para la confección de las probetas utilizadas para la determinación de la retracción las llevó a cabo según las Normas UNE: 80-113-86 y 80-112-89 aplicada para cementos, estableciendo modificaciones en cuanto a su confección y las dimensiones de la misma. El diseño de curado y desmoldado viene indicado en la tabla II.

Tabla II. Condiciones de confección y curado de las probetas de retracción.

Condiciones de conservación	T=(20±2)°C H.=(65±5)%	T=(20±2)°C H.=(65±5)%
Tiempo de conservación	8 horas	28 días
Condiciones de confección	en el molde	desmoldada

Para la medida del color, el enmoldado lo realiza según la Norma: 83-821-92, pero modificando las dimensiones al introducir en el molde una fina capa de polietileno con el fin de que una de las caras presente una textura lisa sobre la que llevar a cabo la medida del color. Las condiciones de confección y curado son semejantes a las del ensayo anterior variando el tamaño y tiempo de conservación, 24 horas a T=(20±2)°C H.=(65±5)%.

Además, en su estudio experimental sobre este material realiza las siguientes determinaciones:

- Análisis químicos
- Propiedades físicas de la cal
- Análisis granulométrico del árido (albero cernido)
- Dosificaciones
- Medida de la consistencia
- Resistencias mecánicas
- Retracción
- Color

En resumen, para determinar la retracción de las probetas establece modificaciones sobre la normativa existente (UNE desarrollada para cementos) debido a lo inadecuada de ésta y de igual modo introduce la espectrofotometría UV-VIS. Determina la evolución de las propiedades de resistencia a compresión y a flexión, la retracción frente al tiempo de los morteros de cal y su influencia en el color; partiendo de morteros frescos con dos consistencias (mortero seco y plástico) y con diferentes adiciones de humo de sílice (HS).

De sus trabajos se pueden extraer las siguientes conclusiones: validez de la normativa UNE para el desmontado de las probetas, basándose en los resultados de resistencia mecánica. Los morteros con dosificación 1:3 y adiciones de humo de sílice del 5% y 10% han alcanzado los valores más altos de resistencia a flexión y compresión a los 28 y 7 días para las dos consistencias. Los morteros que han presentado mayores retracciones han sido los morteros de cal y albero y los que menos los mortero de cemento blanco y arena normalizada.

En esta misma línea podemos destacar los trabajos llevados a cabo por Robledo Alcántara, (1997) sobre la calidad de los morteros de restauración. Los objetivos de este trabajo se pueden resumir en 3 puntos fundamentalmente:

1. La influencia de la composición química y mineralógica de áridos de distinta naturaleza: áridos de aspecto homogéneo (marmolina de mármol de Macael y mármol de Mijas) y áridos de aspecto más heterogéneo (piedra de Almería).

2. El efecto de los aditivos con humo de sílice sobre los morteros de cal.

3. Evaluación del fraguado de los morteros en diversas condiciones de curado.

Este autor en su estudio experimental tiene en cuenta los siguientes aspectos: medición de los diversos parámetros característicos en los morteros, evaluación de la velocidad de curado por procedimientos químicos y electrónicos; determinando el grado de correspondencia entre ambos.

Establece la siguiente metodología para la elaboración de las probetas: selección de la granulometría tras previa molienda según la norma UNE 7050, el contenido en finos (sus líneas granulométricas están por encima del límite superior de la NBE FL-90) y aditivo con humo de sílice. Utiliza moldes normalizados (UNE) y el desmoldado lo lleva a cabo en dos fases: después de 24 horas el mortero se desmonta de forma parcial y pasados 48 horas se desmontan totalmente.

Para la caracterización de los morteros utiliza los siguientes ensayos:

1. Ensayos sobre morteros frescos. trabajabilidad (RILEM MR 1-21, 1982), consistencia (UNE 80-101); dentro de esta propiedad determina la penetración para definir la plasticidad, la capacidad, el contenido en aire, adherencia inicial del mortero (RILEM).

2. Ensayos mecánicos para determinar la resistencia de los morteros endurecidos, dentro de estos ensayos selecciona: la resistencia a compresión y flexión (norma UNE: 80-501), ensayos de adherencia (RILEM MR 1-21, 1982), adherencia a flexión entre unidades de fábrica y el mortero, adherencia entre ladrillo y mortero y ensayo de arranque directo.

3. Como complemento a su estudio utiliza ensayos para determinar las propiedades hídricas, (permeabilidad al vapor de agua, permeabilidad al agua de un enlucido), ensayos físicos (ultrasonidos, porometría y densidad), análisis petrográficos y evaluación del curado (DRX, método de la fenoltaleína).

De su trabajo experimental podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La porosidad del árido influye en el contenido en agua necesaria para la elaboración de los morteros (cuanto más poroso más cantidad de agua necesitan). Por tanto hay que tener en cuenta las recomendaciones dada por la normativa existente en relación a los áridos.
- El aporte de humo de sílice en proporción al 5% no ha originado una modificación apreciable en la plasticidad de los morteros ni en su coloración
- Los morteros que contienen humo de sílice presentan mayores resistencias y menores porosidades (con baja proporción de microporos y macroporos) y una distribución más homogénea para los morteros elaborados con árido más heterogéneo.

- Los morteros de cal en general (con o sin humo de sílice) presentan un buen comportamiento hídrico con rápida estabilización de las curvas de absorción, siendo mayor en morteros con árido más heterogéneo.
- La mayor velocidad de curado está relacionada con la adición de humo de sílice y si el mármol tiene naturaleza dolomítica.
- El método de fenolftaleína se ha demostrado inadecuadamente para morteros húmedos.

Continuando con este materia podemos destacar la normalización para la elaboración de morteros de cal aérea llevada a cabo por Sebastián Pardo et al. (1998), en base a las siguientes recomendaciones:

- Normativa UNE: 800-94 80-101-88 (EN 196-1); 83-821-92; 83-800-94; 80-501-93 (en su mayor parte para cementos).
- Recomendaciones de Skoulidakis, 1996 "carbonatación forzada"
- Goma, 1979 sobre el "apagado de la cal";
- Amasado manual del mortero y curado al aire en contacto con el CO₂ y en ambiente ni seco ni muy húmedo.

Las características de las materias primas usadas en preparación de las probetas viene indicada en la tabla III.

Los áridos de machaqueo son de naturaleza silíceo con más del 98% en cuarzo y de tamaño arena según la norma UNE:80-101-88 CEN EN 196-1 y en otros casos árido dolomítico con tamaño del árido no superior a 2 mm.

Las modificaciones efectuadas sobre la normativa UNE (para morteros de cemento) han sido válidas para morteros de cal aérea como el tipo de amasado manual, independientemente del la cal empleada y la forma de presentarse en pasta o en polvo; poniendo de manifiesto la validez de método empleado.

De lo visto hasta ahora se puede decir que las formas de elaboración de los morteros de cal resultan de gran interés en el tema de las intervenciones, sin embargo es poco lo que realmente se sabe acerca de la técnicas de elaboración antiguas. Por otra parte es sabido por todos los profesionales expertos en el tema, que en las investigaciones sobre la cal está la clave.

El objetivo de los últimos estudios sobre esta materia están orientados a conocer el proceso de fraguado, carbonatación y adherencia pasta-árido en morteros de cal. La carbonatación en este tipo de morteros depende directamente de la naturaleza de la cal empleada y de los cambios que experimenta desde su elaboración hasta su utilización en obra, proceso conocido como "apagado de la cal". Existe en la actualidad una gran controversia en relación a los parámetros que controlan este proceso, como son: relación agua/cal, temperatura, mezcla y duración.

En esta línea podemos destacar los trabajos realizados por Cazalla et al. (1998), sobre la evolución de la

carbonatación mediante la combinación y uso de varias técnicas de análisis :

- DRX: (permite determinar la relación cal-cita-portlandita en función del tiempo),
- TEM: (permite estudiar morfología de los cristales de portlandita),
- SEM: (permite estudiar en detalle la morfología de los cristales, porosidad, fisuras de retracción)
- y ultrasonidos: (permite determinar la evolución de la carbonatación con ayuda del test de fenolftaleína).
- Propiedades hídricas (permiten conocer el comportamiento del mortero en función de las características del ligante-árido).

Los morteros de cal sufren una serie de transformaciones que se conocen con el nombre de endurecimiento del mortero, este proceso comienza a las 24 horas de elaborarse y puede durar desde 6 meses hasta años e incluso siglos. Consta de dos etapas fundamentalmente: Fraguado del mortero y proceso de carbonatación.

El fraguado del mortero se produce por la evaporación del agua de amasado, teniendo lugar una retracción hidráulica con la consiguiente reducción de volumen, hecho que se pone de manifiesto por la aparición de grietas de retracción.

El fundamento teórico del endurecimiento de los morteros de cal se basa en la difusión del CO₂ procedente de la atmósfera a través del sistema poroso. Este compuesto reacciona con la cal apagada en presencia de humedad para dar carbonato cálcico o dolomítico. Se trata de un proceso químico interno, que produce un endurecimiento lento generando una estructura sólida y coherente, denominado "carbonatación". Este proceso se pone de manifiesto por un sellado de poros y fisuras y un aumento de la dureza y cohesión del material. Las variables que influyen son: tiempo, composición del aglomerante, presencia del CO₂, humedad y temperatura.

La observación de estos procesos han sido estudiados por Cazalla et al. (1998) sobre probetas de mortero elaboradas según la normativa seguida por Sebastián Pardo et al. (1998). En sus trabajos ha puesto de manifiesto que el comportamiento de los morteros va a depender: del tipo de árido utilizado (silíceo o carbonatado dolomítico), de la forma de presentarse la cal (en pasta o en polvo) y su naturaleza química. La cal en pasta es la que da mejores propiedades al mortero y el árido dolomítico es el que mejor se comporta por ser más reactivo con la cal; y mejora si además el árido es de machaqueo (superficie

Tabla III. Características de la materia prima utilizada para elaborar morteros según Sebastián Pardo et al. (1998)

Materias primas				
Aglutinante	cal grasa (polvo)	cal grasa (pasta)	cal magra (polvo)	cal magra (pasta)
Árido	silíceo / dolomítico	silíceo / dolomítico	silíceo / dolomítico	silíceo / dolomítico
Proporción	1:3	1:3	1:3	1:3

más angulosa), aunque con el tiempo el árido síliceo presenta mayor estabilidad química.

La adherencia del árido es independiente de su naturaleza y está en función de la rugosidad superficial. La adherencia epistática (adherencia con la que el aglomerante prolonga su estructura cristalina hasta el árido por superposición de redes atómicas) depende de la naturaleza mineralógica de los áridos influyendo en la resistencia mecánica, por esta razón los áridos calcíticos alcanzan mayores resistencias que los áridos síliceos.

El empleo de cal en pasta aporta a los morteros un mayor grado de cohesión, porosidad más baja y aumento de la velocidad de ultrasonidos con una anisotropía próxima a cero.

Entre los 28 y 49 días después de la elaboración de los morteros, se observa una desorganización en el interior de las probetas. Este hecho se manifiesta por una inflexión negativa en las curvas de ultrasonidos, originada posiblemente por la evaporación del agua de amasado y coincide con un aumento de la relación $\text{CaCO}_3 / \text{Ca}(\text{OH})_2$ e inalterabilidad en el volumen.

De lo dicho hasta ahora se concluye que, la calidad de un mortero elaborado con las técnicas tradicionales está estrechamente ligada a las características técnicas de las cales empleadas y que eso a la vez depende directamente del proceso apagado de la cal y de su almacenamiento; proceso conocido como "envejecimiento de la cal".

Es importante conocer el "como y por que" las propiedades de los morteros de cal se ven afectadas por la variedad de técnicas, materiales y métodos. Sin embargo entre todas ellas la determinación de los posibles efectos del envejecimiento sobre las propiedades y uso de la cal en pasta es una de las consideraciones más importantes a tener en cuenta. Los estudios en este sentido se centran en conocer el momento en que la cal se encuentra apta para su uso y el efecto del sistema $\text{Ca}(\text{OH})_2 / \text{H}_2\text{O}$ sobre ella.

El estudio sobre la portlandita y su papel en la carbonatación de los morteros de cal ha sido tratado por diferentes autores: Cowper (1927), Bonell (1934), Hedin (1962), Boynton (1980), Moorehead (1985), Bonen (1994) y aunque es poco lo que se sabe sobre esto; hay constatación de que si el proceso se desarrolla de forma adecuada la cal mejora su plasticidad, carácter reactivo con el agua y trabajabilidad.

En esta línea, podemos destacar los trabajos realizados por Rodríguez Navarro et al. (1998) sobre el envejecimiento del hidróxido de calcio en morteros de cal. Partiendo de la base de que la calidad de la cal depende de las características de la caliza, temperatura de calcinación y condiciones de apagado, en sus trabajos demuestra que los cristales de portlandita sufren importantes cambios de morfología y tamaño bajo el proceso de envejecimiento.

Hedin (1962) ya ponía de manifiesto en este sentido, que no solo influye el tamaño sino el hábito de las partículas de portlandita. Según este autor, durante el envejecimiento de la portlandita los cristales se transforman de hábito prismático a tabular contribuyendo a un incremento del área superficial y reducción de volumen; y esto se debe a la:

1. diferencia de solubilidad de las caras (0001) basal y (10 $\bar{1}$ 0) de los cristales de portlandita.
2. heterogeneidad en la nucleación secundaria a escala nanométrica de las placas de portlandita.

Los pequeños tamaños de grano y la amplia área superficial hace que la carbonatación se produzca en periodos de tiempo más cortos influyendo en la estabilización de la estructura final del mortero.

Este autor también pone en entredicho la teoría de "Odtwald repening" Bache (1962) "el envejecimiento de los cristales de portlandita se produce mediante el desarrollo de cristales grandes a expensas de los pequeños"; en razón a que las caras prismáticas de los cristales grandes de portlandita tienden a desaparecer contribuyendo a la formación de caras pinacoidales, que pasan a ser las más abundantes durante el proceso de envejecimiento.

En este procedimiento están involucrados los siguientes procesos:

1. Disolución de los cristales de portlandita a lo largo de los planos de exfoliación en dirección perpendicular al eje (esto llevará consigo una separación de delgadas láminas a partir de los cristales prismáticos).
2. Formación de cristales tabulares de tamaño menor de 2 μm .

Como consecuencia de esto la portlandita no envejecida puede mostrar morfologías no esféricas de hábito prismático de mayor tamaño que las cales envejecidas, y que estas últimas cales aportan mayor compactación o cohesión y más resistencia al aglomerante. Bajo estas condiciones la portlandita se disuelve antes en el agua generando una solución sobresaturada de carbonato, la cual termina precipitando en los poros por efecto del dióxido de carbono, sobre todo en el exterior.

Estos aspectos físicos de la cal inciden de la siguiente manera en la carbonatación:

- reducción de la porosidad, debido a un incremento del 118% del volumen inicial como consecuencia de la transformación de la portlandita a calcita.
- La evolución del comportamiento de la carbonatación de los morteros elaborados a base de cal envejecida y no envejecida es similar a los 6 meses de su elaboración, sin embargo pasado un año se observan con ayuda del test de fenoltaleína las siguientes diferencias según Cazalla et al. (2000):

1. Los morteros de cal no envejecida muestran una carbonatación gradual de la superficie al interior.
2. En calces envejecidas se observa el llamado "aro de Liesegang" (fenómeno observado a principios del siglo XX en las películas fotográficas).
3. El contenido total de portlandita transformada a calcita en morteros de cal hidratada no envejecida es menor respecto a los morteros con cal envejecida.

Según esta autora el "Aro Liesegang" se forma a consecuencia de un proceso de precipitación-difusión con la pérdida de la solución acuosa alrededor del aro carbonatado, que favorece la difusión de CO_2 hacia la zona empobrecida (más interior). Como consecuencia de esto se observan una alternancia de aros ricos en calcita y aros más finos de portlandita.

La precipitación de la calcita en morteros de cal hidratada envejecida será más rápida y dará como resultado cristales más pequeños, mejor interconectados que originan una estructura más rígida. La presencia de aros no carbonatados permaneciendo un año después de la exposición al aire, indican que la carbonatación es más lenta.

Como cierre a este apartado habría que señalar que el interés por la investigación en el tema de morteros de carácter histórico, debe ser incentivado por los profesionales que trabajan en el tema Patrimonial. El estudio sobre este tipo de material carece de importancia para los especialistas en materiales, más interesados por el diseño de edificios de nueva planta. Sin embargo se deben aprovechar todos estos avances para el mejor conocimiento de esta materia de cara a su aplicación.

Estos trabajos deben centrarse fundamentalmente en la calidad del aglomerante (cal), ya que la normalización existente sobre áridos y aditivo actuales puede ser aplicada en este campo de actuación. La tarea debe estar centrada en el conocimiento sobre la portlandita y aunque son numerosos los trabajos realizados acerca de la nucleación, disolución y evolución de la portlandita en el cemento portland y en otros materiales, la realidad es que se sabe poco acerca de los factores que condicionan la calidad del aglomerante en morteros de cal. En este sentido deben ir encaminadas las investigaciones futuras, si se quiere tener la clave que nos permita poder elaborar morteros adecuados, que garanticen la correcta conservación de nuestro Patrimonio Histórico Artístico.

2.2 Metodología de estudio

Teniendo en cuenta los antecedentes anteriormente indicados, la bibliografía existente sobre el tema refleja la necesidad de procedimientos analíticos normalizados. Esta normalización requiere la correcta utilización de la tecnología existente adaptada a las necesidades que el tema precisa.

Como se ha dicho anteriormente los morteros en general constan de un endurecedor (aglomerante), una carga inerte (árido), un medio acuoso que le confiere trabajabilidad (agua) y una serie de compuestos que mejoran las propiedades de la mezcla (aditivos). Teniendo esto en cuenta, la metodología a aplicar para el estudio de morteros debe abordar la caracterización de estos componentes así como su comportamiento al generarse la mezcla y obtenerse el producto final.

Este proceso se complica si además el examen se realiza desde perspectivas variables según el profesional que se acerque a su estudio. Por una parte está el arqueólogo, más interesado por una clasificación funcional y analítica rápida y menos exacta, pero no por ello menos precisa, así como necesaria. Los tecnólogos, sin embargo basándose en estos datos, precisan de unas determinaciones más complejas que requieren conocimientos más diversos sobre la materia.

Todos los profesionales coinciden en que esta correcta caracterización debe realizarse por métodos físico-químicos y mineralógicos-petrográficos, indicando la complejidad que trae consigo el estudio de este material y la necesidad de coordinar correctamente las distintas técnicas de análisis e instrumentales existentes.

Estas técnicas de análisis y ensayos deben permitir estudiarlo a diferentes escalas y desde perspectivas diferentes: sobre la globalidad del material (bien endurecido o en estado plástico) o sobre sus componentes (áridos, aglomerante y aditivos), partiendo de la base de que todos estos aspectos son complementarios.

Los objetivos de esta metodología se puede agrupar de la forma indicada en la figura 1.

Figura 1. Objetivos de la metodología de estudio aplicada a morteros.



En este primer grupo se deben utilizar un conjunto de técnicas y ensayos que nos permitan determinar las propiedades, tipologías y técnicas de fabricación, o lo que es lo mismo caracterizar el material. La metodología a emplear debe permitir conocer la estructura interna de los morteros y las características del material empleado para su fabricación, cuestión de suma importancia para poder conocer el material

del que se dispone y la tecnología de la fabricación empleada en cada período de construcción y en tal sentido se manifiesta Koenraad Van Balen, (1990).

Como último objetivo esta metodología debe permitir determinar los procesos y mecanismos de alteración y su compatibilidad con los nuevos materiales de intervención o reposición, es decir, establecer el comportamiento del material a lo largo de su puesta en obra.

A la hora de abordar el estudio sobre morteros sin embargo se ha considerado más conveniente establecer una división previa entre el tipo de material que se va a estudiar, morteros antiguos y de restauración o intervención, más que en relación a los objetivos. La razón está en que las determinaciones a

realizar no son similares en los dos casos; coinciden en gran número de aspectos pero en otros casos divergen de forma significativa.

Para el caso de los morteros antiguos, el fundamento de la metodología en función de las distintas determinaciones se indica en la figura 2.

Los aspectos a tratar sobre morteros de intervención están dirigidos al diseño de morteros compatibles con los materiales antiguos, por tanto sus determinaciones están más orientadas al control de los parámetros físicos de la pasta y sus características, de cara a su comportamiento una vez puesto en obra.

Los fundamentos metodológicos se recogen en la figura 3.

Figura 2. Fundamento de la metodología de estudio aplicada a morteros antiguos

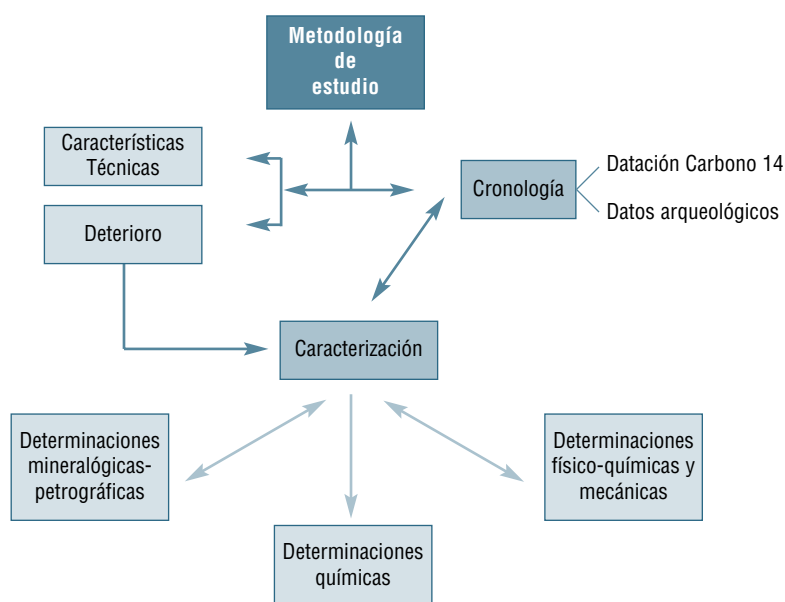
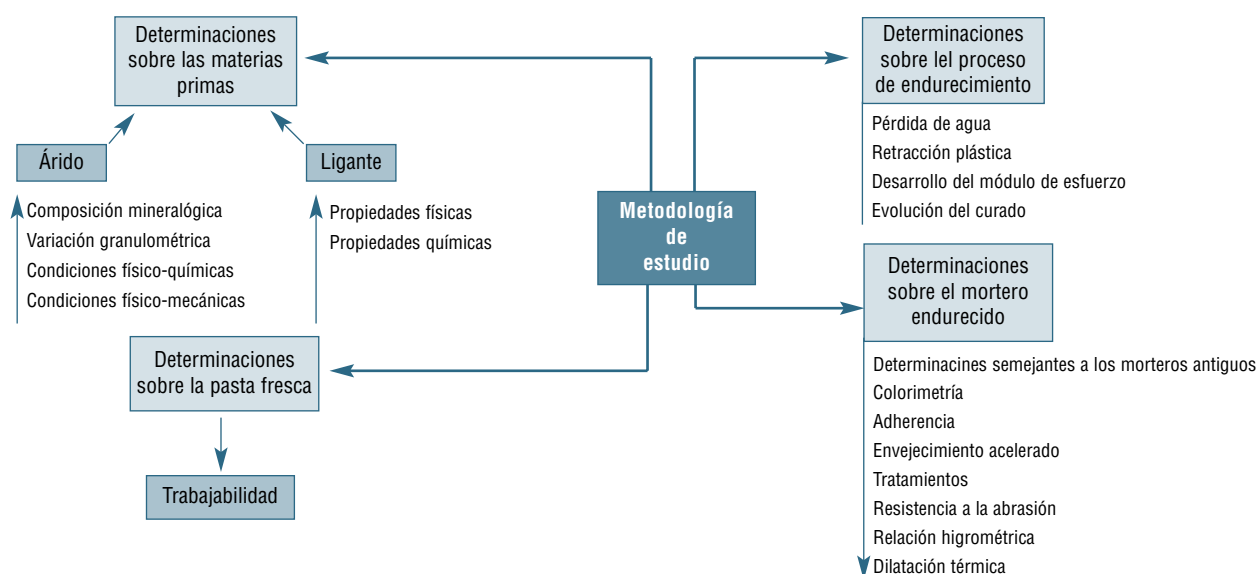


Figura 3. Fundamentos de la metodología a aplicar sobre morteros de intervención.



Bibliografía

- J. ALEJANDRE, J. BARRIOS y A. RAMÍREZ DE ARELLANO. "Propiedades mecánicas de los morteros de cal y albero y cal y arena con adición de humo de sílice". Pp. 328-31. Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Granada, 1996.
- J. ALEJANDRE. "El albero como árido en los morteros de cal. Influencia de la adición de humo de sílice". Tesis doctoral, publicación inédita, Universidad de Sevilla, 1996.
- G. ALESSANDRINI. "Gli intonaci nell'edilizia storica: metodologie analitiche per la caratterizzazione chimica e fisica. Atti Convegno di Studi: l'intonaco: storia, cultura e tecnologia. Bressanone, 1985. Libreria progetto Editore, Padova, 147-66.
- G. ALESSANDRINI, R. BUGINI, I. FOLLI, M. REALINI, L. TONIOLO. "The compositional ratios of mortars. Comparison between chemical and petrographical methods". 7th International Congress on deterioration and Conservation of stone. Lisboa, vol II, 1992. Pp. 667-5.
- J. I. ÁLVAREZ GALINDO, A. MARTÍN PÉREZ y P. GARCÍA CASADO. "Historia de los morteros". Boletín del IAPH, nº13. 1995. Pp. 52-59.
- J. I. ÁLVAREZ GALINDO. "Caracterización de morteros en Monumentos Navarros. Tesis Doctoral, publicación inédita. Universidad de Navarra, 1997.
- O. CAZALLA, E. SEBASTIÁN, M.J. DE LA TORRE, C. RODRÍGUEZ NAVARRO, I. VALVERDE AND H. ZEZZA. "Control de la carbonatación en morteros de cal"; pp 227-29 in IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. La Habana, Cuba. 1998.
- O. CAZALLA, C. RODRÍGUEZ NAVARRO, E. SEBASTIÁN, G. CULTRONE AND M.J. DE LA TORRE. "Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation"; pp 1070-75. J. Am. Ceram. Soc. 83(5), 2000.
- M. COLLEPARDI. "Degradation and restauration of masonry wall of historical buiding". Materials and Structures, 23, 1990. Pp 81-102.
- V. FURLAN and P. BISSEGER. "Les mortiers anciens: Historie et essais d'analyse scientifique". Revue Suisse d'Art et Archaeometry 27,2, (1975). Pp 161-77.
- V. FURLAN AND R. PANCELLA. "Examen microscopique en lumière réfléchie de cimens, bétons et mortiers". Chantiers, vol 13, 11/82. Pp25-30.
- V. FURLAN AND N. KOHLER. "Facteur de risque a prendre en consideration lors de choix d'un crepi". Bolletín Tecnique de la Suisse Romande. 14/84. Pp 1171-76.
- V. FURLAN. "Causes, mechanisms and measurement of damage in cultura heritage materials. State of the art-mortars, bricks and renderings". Advanced Workshop. Analytical Metodologies for the Investigation of Damaged Stones. Pavia, 1990.
- H. JEDRZEJSKA. "Old mortars in Poland. Studies in Conservation, 5, 1960. Pp 132-138.
- KONERAAD VAN BALEN. "Metodologie de la conservation et de la Restauration des monument en terre. 6 th International Conference on the Conservation of Earthen architecture. Mexico, 1990.
- E. ONTIVEROS ORTEGA, I. Valverde Espinosa y E. Sebastián. "Técnicas de análisis aplicadas a los tapiales de las Murallas de Granada. pp 270-73. Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Granada, 1996.
- E. ONTIVEROS ORTEGA, E. SEBASTIÁN PARDO y I. VALVERDE ESPINOSA. "Deterioration in IX-XIV century arab rampart (Granada, Spain)". Materials and structures, Vol 32 Junnuary-February 1999. Pp 45-51. Rilem 159-5997/99.
- S. PERONI, C. TERSIGNI, G. TORRACA, S. CERE, N. FORTI, F. GUIDOBALDI, P. ROSSI-DORIA, A. DE REGE, D. PICCHI, F.J. PIETRAFITTA AND G. BENEDETTI. "Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes". Roma, 1981.
- C. RODRÍGUEZ NAVARRO, E. HASEN and W. S. GINELL. "Calcium hidroxide cristal evolution agung of lime putty"; J. Am. Ceram Soc, 81 (11) pp 3032-34. 1998.
- E. ROBLEDO ALCANTARA. "Control de calidad de morteros de restauración. Influencia de áridos dolomíticos y calcíticos en morteros de cal". Proyecto fin de carrera, Escuela Superior de Ingeniería; publicación inédita. Sevilla, 1997.
- E. SEBASTIÁN PARDO, O. CAZALLA, M.J. DE LA TORRE, C. RODRÍGUEZ NAVARRO, I. VALVERDE and H. ZEZZA. "Normativa para la elaboración de morteros de cal Aérea"; pp 491-93 in IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. La Habana, Cuba. 1998.
- M.J. DE LA TORRE. "Estudio de los materiales de la construcción en la Alhambra. Monografía Arte y Arqueología. Universidad de Granada. IAPH, 1995.
- I. VALVERDE ESPINOSA, E. ONTIVEROS ORTEGA y E. SEBASTIÁN. "El Tapial en las murallas de Granada". Revista de Construcción RE Octubre de 1997, nº26. Universidad de Navarra. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Pp 58-62.