

# Morteros de cal: una propuesta para la intervención en la Iglesia de San Miguel de Jerez

Ana Luque Aranda, Eduardo Sebastián Pardo, Universidad de Granada. Esther Ontiveros Ortega, Jesús Espinosa Gaitán, Centro de Intervención del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico

## Introducción

La adecuada calidad que presentan los materiales empleados en las intervenciones realizadas en el patrimonio histórico arquitectónico es primordial a la hora de garantizar su conservación (Carta de Cracovia, 2000).

Los proyectos de intervención a ejecutar en los edificios históricos deben fundamentarse en un riguroso proceso de actuación, basado ante todo en el empleo de materiales tradicionales, semejantes y compatibles con los elementos de fábrica.

Los morteros de cal siguen siendo, sin ninguna duda, el material de intervención más utilizado en los trabajos de restauración, de ahí el esfuerzo que se viene realizando, en los últimos tiempos, para esclarecer las incógnitas que plantea este tipo de material. La investigación técnico-científica de los morteros tradicionales de cal y de los morteros actuales de restauración viene abordándose de forma paralela, mediante la determinación de sus propiedades y características, tanto en laboratorio como puesto en obra.

En este sentido, antes de acometer cualquier intervención, es necesario el estudio y análisis previo, tanto de los materiales y/o morteros originales como de los morteros de restauración que se van a emplear. Esta conciencia es la que se ha mantenido en el caso de la Iglesia de San Miguel (Jerez de la Frontera, Cádiz), ya que previo a su intervención se han realizado una serie de análisis y ensayos que han ayudado a llevar a cabo una adecuada selección de las materias primas (tipo de cal, árido y aditivos) y también una correcta elaboración de la pasta de mortero. De este último material, se han examinado con extremo cuidado las modificaciones que va experimentando hasta constituirse como un material suficientemente resistente (proceso de carbonatación y endurecimiento).

## Metodología

Los análisis de los distintos materiales empleados en la construcción de la Iglesia de San Miguel de Jerez nos indican que tanto la piedra como los morteros originales y/o de intervenciones anteriores presentan procesos de degradación importantes. Esta degradación va ligada a la presencia de sales que aparecen en forma de eflorescencias, costras negras y depósitos superficiales (yeso, tenardita, mirabilita, arcanita, natrón y halita). El origen de estas sales está relacionado, de forma importante, con las distintas intervenciones que ha sufrido la iglesia.

De los resultados obtenidos a partir de la analítica abordada para el estudio de estos materiales se concluyen una serie de propuestas de intervención, en las que se incluye una nueva fase de estudios previos en laboratorio para el diseño de los morteros más adecuados.

Los métodos empleados para la elaboración de estos materiales se basó prácticamente en la norma UNE EN 998-2/01 y en las recomendaciones de Cazalla (2002). Esto requiere la elaboración previa de probetas de ensayo (EN-UNE 1015-11), establecida de acuerdo a las siguientes pautas:

**Selección de las materias primas**

En base a las características que presenta los morteros originales, que son morteros de cal con árido compuesto por cuarzo, calcita y fragmentos de ladrillo triturado, se elaboraron ocho tipos de morteros con las siguientes variables:

- **Cal** (UNE EN 495-1/02 y UNE EN 495-2/02):
  1. Cal calcítica en polvo: portlandita 100%, CL-90". Periodo de apagado superior a 1 mes.
  2. Cal calcítica en pasta: Se trata de la misma cal que la anterior pero hidratada con exceso de agua apagado manual en balsa) y posteriormente tamizada. Periodo de apagado superior a 3 meses.
- **Árido**: Se seleccionaron varios tipos, atendiendo principalmente a las características que presentaban los empleados en los morteros originales.
  1. Árido de sílice normalizado (UNE-EN 196-1) suministrado por el Instituto de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC, Madrid)
  2. Árido carbonato (procedente de canteras de los alrededores de Arcos de la Frontera) ajustándonos a la norma UNE-EN 13139/02, la granulometría de árido viene indicada en la tabla 1.
- **Aditivos**: Se ha utilizado ladrillo triturado procedente de las fábricas actuales. Este componente se ha añadido para conferirle un cierto grado de hidráulicidad a algunas de las probetas, con el fin de que se asemejen en todo lo posible al mortero original.

Tamiz (mm)	% (en masa) que pasa	Peso retenido (%)
≥2	100	0
1	63	36,94
0,5	30	32,54
0,125	0	30,52
Finos	0	0

Tabla 1. Granulometría que presenta el árido carbonatado

**Proceso de elaboración de las probetas**

Con estas materias primas se han elaborado los siguientes tipos de morteros que cumplen con los requerimientos exigidos por la norma EN-UNE 1015-2:

- Tipo I. Cal en pasta:**
- I.1** Cal + árido silíceo (1:3) **I.2** Cal + árido silíceo + fragmentos de ladrillo\*(1:3) **I.3** Cal + árido silíceo + árido carbonatado (1:2:1) **I.4** Cal + árido silíceo + árido carbonatado + fragmentos de ladrillo (1:2:1)

## **Tipo II. Cal en polvo:**

**II.1** Cal + árido silíceo (1:3) **II.2** Cal + árido silíceo + fragmentos de ladrillo (1:3) **II.3** Cal + árido silíceo + árido carbonatado (1:2:1) **II.4** Cal + árido silíceo + árido carbonatado + fragmentos de ladrillo (1:2:1)

\*La cantidad de ladrillo no supera el 20% de la proporción de árido silíceo (siendo, por tanto, la relación ladrillo/árido, 1:5).

### **Relación agua/cal:**

Cal en polvo: 0.8

Cal en pasta: 0.1- 0.2

Para la preparación de las probetas de mortero se han empleado moldes normalizados (UNE- EN 1015-11). El desmolde se realizó a los 8 días de la elaboración, cuando se comprobó que tenían la suficiente consistencia. Se les mantuvo en una habitación con circulación de aire en las siguientes condiciones ambientales ( $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y del  $50 \pm 10\%$  HR), condiciones muy parecidas a las establecidas en la norma UNE-EN 1015-11.

## **Equipos y técnicas de análisis realizadas para la caracterización y evaluación de los morteros**

Las distintas probetas elaboradas se sometieron a las siguientes determinaciones:

- Medidas de propagación de pulsos ultrasónicos: Esta técnica tiene como objetivo la determinación de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales ultrasónicas en el seno de las probetas de mortero. Esta velocidad está directamente relacionada con el grado de compactación que van adquiriendo las probetas con el paso del tiempo.

- Medida de la retracción: La cuantificación de la retracción hidráulica o de secado de los morteros no se ha podido realizar según la norma UNE 80-113-86 y UNE 80-112-89, debido al tamaño de las probetas (4x4x16 cm) y a la imposibilidad del desmoldado de éstas a las 24 horas de su elaboración. La medida se ha realizado con ayuda de una regla calibrada. Aunque es un método menos preciso permite disponer de valores de comparación entre los distintos tipos de morteros.

- Análisis porosimétrico: En los morteros de cal, los poros o espacios vacíos son la principal vía por donde se va a producir el fenómeno carbonatación (transformación de portlandita a calcita), ya que es por donde el agua líquida o en forma de vapor con  $\text{CO}_2$  disuelto va a penetrar hacia el interior del mortero. Se determinó el porcentaje de volumen poroso accesible al mercurio y la distribución de tamaños de poros, también definida como porometría.

- Ensayos mecánicos: Se han efectuado los ensayos sugeridos por la UNE EN-1015-11 a los 28 días de la elaboración de los morteros de cal, determinándose con ellos la resistencia que estos presentan a la flexión y a la compresión. Las resistencias mecánicas son algunas de las propiedades más importantes a tener en cuenta de cara a su comportamiento como material de construcción. Éstas están directamente relacionadas con la porosidad, por tanto, con el grado de endurecimiento y/o carbonatación y en cierto modo, condiciona su resistencia frente a los agentes de deterioro. En el caso de los morteros de cal resulta de especial interés conocer la resistencia que van adquiriendo estos materiales con el paso del tiempo.

## **Técnicas y métodos de análisis realizados para el control del proceso de curado y/o carbonatación**

El proceso de “curado” (fraguado o carbonatación) de los morteros de cal está directamente relacionado con la transformación de la portlandita en calcita. Este proceso se puede controlar a través de los siguientes métodos y técnicas de análisis.

- Pruebas con fenoltaleína: La fenoltaleína es un indicador químico ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ) que cambia de color (vira de rojo a incoloro) al pasar de pH alcalino a neutro. En el caso de los morteros, la aplica-

ción de este producto produce una tinción de rojo intenso, cuando el mortero está aún sin carbonatar, predominando por tanto como fase mineral la portlandita (medio alcalino). En el caso de que la fase mineral predominante sea la calcita (medio neutro) esta tinción ya no se produciría, presentándose por tanto incolora. Esta técnica se considera fiable según K. Kouzell mientras en la muestra exista más de un 10% de portlandita.

- Difracción de rayos X: Para la determinación de la composición mineralógica se ha empleado el método de polvo cristalino. Este método permite la determinación del parámetro “R” (CAZALLA, 2002), a través de la cuantificación de la relación de calcita-portlandita existente en la muestra.

- Microscopía electrónica (SEM): A través del microscopio se observa la evolución que ha experimentado el proceso de carbonatación mediante la observación de la microtextura que presenta el mortero (aspecto de la cal y los áridos así como su interrelación).

- Propiedades hídricas: Este tipo de ensayos permite caracterizar el sistema poroso, debido a que su volumen y distribución determinan la cantidad de agua retenida y/o pérdida, así como la velocidad y cinética a la que este proceso se desarrolla.

En cada ensayo (RILEM/PEM 25, 1980) se controla la variación del contenido en agua de tres probetas de dimensiones normalizadas (probetas cúbicas de 5 cm de lado) con respecto al tiempo. Los ensayos que se han efectuado son: absorción libre de agua (permite determinar el tanto por ciento de agua absorbida en relación con la probeta desecada respecto al tiempo  $W(t)$ ) y desorción de agua o cinética de secado (pérdida de agua por evaporación de las muestras saturadas en agua y expuestas a condiciones atmosféricas).

### **Ensayos de calidad técnica de los morteros**

La alterabilidad de los materiales se puede predecir mediante métodos indirectos, a partir de la información que nos suministra la petrografía y las propiedades físicas de los materiales, en especial su sistema poroso; o bien, mediante ensayos experimentales en los que el mortero se somete a determinados procesos en los que se intenta reproducir la acción de los agentes de alteración. Estos se denominan “ensayos de alteración acelerada”.

Debido a las condiciones medioambientales reales a las que se va a encontrar sometido el mortero de reposición una vez puesto en obra, es aconsejable determinar previamente la durabilidad que presentan frente a dichas condiciones. Los ensayos efectuados han sido los más frecuentemente utilizados por la RILEM (hielo-deshielo, humedad-sequedad y cristalización de sales). Su procedimiento experimental ha sido el mismo en todos los casos y se ha basado en la repetición cíclica de cada uno de los procesos de alteración. Para ello, se han empleado una probeta de cada tipo de mortero tallada de forma prismática. Y los ensayos (ESBERT et al., 1997) que se han realizado han sido:

- Ensayos de heladicidad: Permite caracterizar el comportamiento de un material sometido a sucesivos ciclos de hielo-deshielo (30 ciclos de 24 horas). Se puede así estimar la durabilidad de una muestra sometida a fuertes variaciones climáticas naturales de humedad y temperatura. Para evaluar los resultados, se efectúan controles periódicos que consisten en determinar las variaciones de peso y, en la observación visual o mediante microscopio, la aparición de fisuras o grietas a medida que avanzan los ciclos.

- Ensayos de humedad-sequedad: Consiste en someter las muestras a ciclos que alternan la inmersión en agua de la probeta y el posterior secado en una estufa (en total 15 ciclos de 24 horas). Simula la degradación de los morteros a causa de fluctuaciones de la humedad (en ambiente húmedo y ambiente seco).

- Ensayos de cristalización de sales por inmersión total: Reproduce los fenómenos originados por la cristalización de fases salinas en condiciones naturales. Las sales dan lugar a distintos tipos de

acciones destructivas (picado superficial, disgregación y pérdida de partículas) cuando cristalizan en el interior del sistema poroso (ciclos de 24 horas). Es un ensayo muy destructivo, dependiendo del tipo y del grado de concentración de sal en la disolución, de la humedad relativa y de la temperatura tanto del ambiente como de la solución salina.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se recomendó el empleo del mortero de cal (en pasta) con árido carbonatado y silicio (MI3), al ser estos los que mejores resultados presentaban en lo que se refiere a su durabilidad frente a los ensayos de deterioro.

1. Se plantea la necesidad e importancia que adquieren las aportaciones que presentan las investigaciones científicas realizadas en este campo, apoyadas por el empleo de técnicas de análisis y ensayos en laboratorio estandarizados que permiten garantizar la reducción del riesgo de utilizar morteros inadecuados y asegurando, por tanto, el éxito de las intervenciones.

2. Se recomienda un estudio exhaustivo del mortero original (determinación de la naturaleza de las materias primas e identificación de la cal y los áridos, las proporciones en que se encuentran y sus propiedades). Estos aspectos resultan esenciales a la hora de evaluar la calidad que presentan los mismos y las características a exigir a los nuevos materiales de intervención.

3. Se pone de manifiesto el comportamiento físico y mecánico que presentan los morteros de cal frente a los ensayos simulados en laboratorio: estos están limitados, entre otros, a la incompleta carbonatación que presentaban los morteros en el momento de procedimiento analítico acordado en este proyecto.

4. Se plantea la necesidad de elaborar un proceso normalizado en la elaboración de morteros de cal. Estos materiales necesitan un mejor conocimiento a la hora de interpretar adecuadamente el comportamiento que presentan en los edificios o en las construcciones en sí.

## Bibliografía

**ASOCIACIÓN** Española para la Normalización (Aenor)

UNE EN 495-1/02. Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

UNE-EN 459-2/02. Cales para la construcción. Parte 2. Métodos de ensayo.

UNE-EN 998-2/04. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2. Morteros para albañilería.

UNE- EN-1015-1/02. Determinación de la distribución del tamaño de las partículas (método del tamizado).

UNE- EN-1015-2/99. Toma de muestras de morteros y preparación de probetas.

UNE- EN-1015-3/00. Determinación de la consistencia de morteros -método de la mesa de sacudidas-

UNE- EN-1015-4/99. Determinación de la consistencia de morteros -método sonda de penetración-

UNE- EN-1015-9/00. Determinación del período de trabajabilidad y tiempo abierto del mortero fresco.

UNE- EN-1015-11/00. Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido.

UNE-EN 13139/03. Áridos para morteros.

UNE-EN 933-1/98. Ensayo Para determinar las propiedades geométricas de las partículas. Método del tamizado.

UNE 80-113-86. Método de ensayo de cemento. Ensayos físicos. Determinación de la expansión de autoclave.

**CAZALLA, O., SEBASTIÁN PARDO, E., DE LA TORRE, M.J., VALVERDE, I. and ZEZZA, U.** *Control de la evolución de la carbonatación en morteros de cal.* IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y edificación. La Habana (Cuba), 1998, pp. 227-229

**CAZALLA, O.** *Morteros de cal. Aplicación en Patrimonio histórico.* Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 2002

**ESBERT, R.M., ORDAZ, J., ALONSO, F.J. and MONTOTO, M.** *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos.*

Col·legi d' Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona: 1997

**Rilem. Comm Pierres Groupes 25 PEM:** *Expeiimental methods reconimended.* Proc. Int. Symp. Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris, 5-9/VI/ 1978, Vol. V (Publ. CEBTP). TEST VI. I: External aspect of stones, 1978



Daño que producen las intervenciones realizadas con mortero de cemento (Hospital de San Juan de Dios, Granada). Foto: Ana Luque



Intervención de restauración realizada con mortero de cal llevada a cabo en la Portada del Convento de la Concepción (Granada). Foto: Ana Luque



Morteros elaborados en laboratorio. Foto: Ana Luque