

# ESTUDIOS CIENTÍFICOS

## ESTUDIOS BIOLÓGICOS. Marta Sameño Puerto, IAPH

### Estudio de factores biológicos de alteración (análisis botánico) y evaluación de tratamientos biocidas

Los objetivos de este estudio han sido la detección y el tratamiento de los distintos agentes biológicos que causan deterioro en los materiales pétreos de las cubiertas y fábricas exteriores del inmueble.

#### Evaluación previa de productos de tratamiento biocida

Los productos estudiados se seleccionaron en base a su empleo en la restauración pétreo y está probada su eficacia a largo plazo. Estos biocidas se probaron in situ mediante aplicación sobre el sustrato con pincel y, posteriormente, se realizaron ensayos de laboratorio en los que la aplicación del producto se realizó por inmersión de las probetas durante 24 horas. La eficacia de los distintos tratamientos fue estudiada antes y después de la aplicación de los biocidas mediante observaciones directas de los organismos en distintos intervalos de tiempo y mediante el uso del estereomicroscopio, del microscopio óptico y del microscopio electrónico de barrido.

Como conclusión del estudio se identificaron como agentes de alteración:

- Líquenes, cuya presencia se manifiesta en forma de polvo y fragmentos, foliáceos o crustáceos y epilíticos. Se concluyó que el Cloruro de Benzalconio era el más adecuado en cuanto a su eficacia liquenocida. No obstante, los líquenes pueden ejercer un efecto protector contra agentes degradativos formando un revestimiento sobre la superficie del material que colonizan. Así, al erradicar los líquenes del sustrato, éste puede ser atacado mucho más drásticamente. Por tanto, se recomendó erradicar estos organismos de aquellas áreas que se considere estrictamente necesario, mediante aplicación con pincel o colocación de compresas impregnadas de producto sobre la superficie a tratar y, posteriormente, cepillado de los organismos.

- Plantas superiores, que provocan daños físicos y químicos en el sustrato que colonizan, recomendándose la aplicación de productos herbicidas residuales con una periodicidad anual.

- Respecto a la fauna el grupo más importante lo constituyen las aves (las palomas) cuyos excrementos favorecen el crecimiento de la flora ornitocóprfila.



Toma de muestras. Foto: Marta Sameño Puerto

## ESTUDIOS GEOLÓGICOS. Jesús Espinosa Gaitán y Esther Ontiveros Ortega, IAPH

### Caracterización de materiales y procesos de alteración

La caracterización de materiales se ha realizado mediante análisis científicos sobre muestras extraídas de varios puntos del interior y exterior de la Iglesia, siendo de especial interés las extraídas en las zonas afectadas por los desprendimientos. Se han estudiado muestras de piedra en distintos grados de alteración, de morteros de junta, de parcheado y de reparación y, finalmente, varias muestras de productos de alteración (costras, sales solubles, depósitos pulverulentos...). El análisis se ha realizado mediante difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido-EDX y microscopía óptica de polarización.

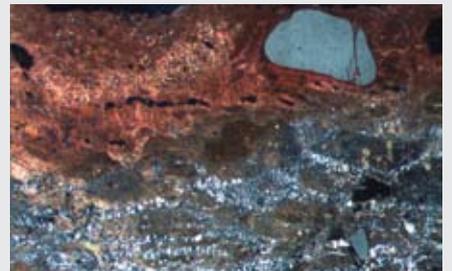
Del estudio se extrae que la piedra utilizada en las fábricas del edificio corresponde a un único litotipo procedente de las canteras del cerro de San Cristóbal, al noroeste del Puerto de Santa María. Se trata de una calcarenita con importante contenido en cuarzo, escasa cementación, elevada porosidad (>30%) y, además, pequeñas cantidades de yeso en su composición.

De forma general los morteros originales estudiados son morteros de cal bastante heterogéneos en cuanto a los contenidos y tipos de áridos (piedra del Puerto, cuarzo, fragmentos cerámicos...). La mayoría de estos morteros presentan pequeñas cantidades variables de yeso, en algunos casos atribuibles a procesos de alteración pero en otros formando

parte del aglomerante, junto con la cal. En algunas muestras de intervenciones recientes se han identificado compuestos relacionados con el cemento portland.

Las sales solubles estudiadas corresponden a sulfatos, carbonatos y cloruros, de Na, K y Ca. De estas sales las más peligrosas son las encontradas en forma de subeflorescencias y criptoflorescencias, ya que cristalizan en el interior de los materiales. El origen de las sales se puede relacionar con los morteros originales que contengan algo de yeso, con el enlucido de yeso con el que estuvo revestido el interior de la iglesia hasta mediados del siglo XIX, con los morteros de parcheado más recientes (algunos con cemento gris), junto al aporte de álcalis por los áridos susceptibles a alterarse por hidrólisis.

Como consecuencia de los estudios de caracterización se estableció la conveniencia de eliminar las sales solubles de la piedra, acompañándola de una intervención que controlara los aportes de humedad. Tras la limpieza de los paramentos sería necesario la aplicación de un producto consolidante que devolviera la coherencia granular a las zonas superficiales de la piedra y un hidrófugo en paramentos exteriores que no se viera afectado por aguas capilares. Así mismo se estimó la conveniencia de aplicar una silicona diluida en agua sobre las cubiertas de la iglesia para su impermeabilización.



Mortero de cal afectado por subeflorescencias de sales sulfatos. Foto: Jesús Espinosa Gaitán



Florescencias. Detalle del hábito prismático acicular de cristales de Natrón. Foto: Jesús Espinosa Gaitán

### Estudio de la efectividad de los tratamientos

Para garantizar el óptimo comportamiento de los tratamientos propuestos se requiere realizar una evaluación previa, mediante ensayos estandarizados de laboratorio, valorando su eficacia, compatibilidad con el sustrato y la durabilidad que ofrece el sistema piedra-tratamiento. La evaluación de consolidantes e hidrofugantes no ha requerido su realización experimental ya que habían sido extensamente ensayados para este tipo de piedra (VILLEGAS SÁNCHEZ, 1990).

Este trabajo contiene los resultados y conclusiones de la valoración de varios consolidantes a base de silicato de etilo (TEOS), varios hidrofugantes organosilícicos y otros produc-

tos acril-silicónicos de comportamiento mixto, muchos de los cuales siguen mostrando en la actualidad los mejores resultados en estudios experimentales (DELGADO RODRIGUES, 2008). Se realizaron ensayos de dureza superficial, velocidad de ultrasonidos, propiedades hídricas (absorción libre de agua, succión capilar, secado) y ensayos de alteración acelerada (cristalización de sales, simulación de contaminación atmosférica-SO<sub>2</sub>). Tras interpretar los resultados se constata el mal funcionamiento de productos mixtos y se establece la idoneidad de aplicar en primer lugar uno de los consolidantes y, posteriormente, una vez seco, el mejor de los hidrofugos.

La evaluación de la silicona diluida que se aplicaría sobre los ladrillos de las cubiertas se realizó mediante la valoración de la modificación que presenta en la permeabilidad al vapor de agua, la cual debe ser mínima, para evitar así condensaciones de humedad en el interior de la cubierta. Se realizaron ensayos de laboratorio, comprobándose que la tasa de transferencia de vapor de agua del ladrillo tratado es prácticamente la misma que sin tratar, permitiendo una adecuada transpiración de la humedad desde el interior del material.

## Morteros para reposición

Las propuestas de intervención en edificios históricos deben estar fundamentadas en la compatibilidad con los materiales existentes, garantizando su adecuada conservación. En este sentido interesa más que su perdurabilidad la inocuidad frente a los materiales sobre los que se vayan a aplicar.

Tras las experiencias acumuladas en estos últimos veinte años, los especialistas llevan proponiendo desde hace algunos años los morteros de cal como los más adecuados para este fin. El interés que ha despertado el tema en la comunidad científica ha permitido consolidar una metodología de estudio fundamentada en el diseño de probetas para su posterior análisis en laboratorio. Esto implica la selección de las materias primas (tipo de cal, áridos y aditivos), control del proceso de elaboración de la pasta y determinación de las modificaciones que va experimentando el mortero hasta constituirse como un material suficientemente resistente; así como la definición de las propiedades que adquiere con el paso del tiempo.

Siguiendo estos planteamientos para la intervención en la iglesia de San Miguel de Jerez se aconsejó la aplicación de un mortero de cal para reposición. Los criterios de selección de las materias primas se hicieron en base a la composición del mortero original. Se seleccionaron dos tipos de cales (en pasta y en polvo) de fabricación artesanal, dos tipos de áridos (cuarzo normalizado y carbonatos de un suministrador de los alrededores de Arcos de la Frontera) y polvo de ladrillo actual como aditivos. Se unificó la granulometría de estos tres componentes para reducir las variables. Se diseñaron ocho tipos de morteros cuya composición y dosificación se indica en la tabla adjunta.

Para la selección del mortero más adecuado se evaluaron distintos tipos, tras aplicar la siguiente metodología:

- Caracterización y evaluación de los distintos tipos de morteros. Hace referencia a la determinación de las propiedades físicas que presentan estos materiales y que ponen de manifiesto su grado de endurecimiento (transformación de la portlandita a carbonato cálcico) con el paso del tiempo. Este proceso, que está directamente relacionado con la difusión y disolución del CO<sub>2</sub> en el agua, se puede cuantificar a través del grado de compactación y heterogeneidad que experimenta el material (propagación de los pulsos ultrasónicos), por la pérdida del agua (retracción hidráulica o secado),

por la evolución que experimenta la porosidad (porosimetría de mercurio) por su capacidad de absorción y desorción de agua (propiedades hídricas) y finalmente por su resistencia mecánica.

- Control del proceso de curado y carbonatación. Se incluyen las técnicas y métodos que permiten cuantificar la transformación de la portlandita a calcita. Dentro de este grupo se incluyen el test con fenolftaleína, Difracción de rayos X (parámetro R) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

- Ensayos de calidad técnica de los morteros. El comportamiento que presentan los materiales de construcción frente a las condiciones ambientales constituye un aspecto de interés que habitualmente se valora a través de los ensayos de envejecimiento (choques térmicos, hielo-deshielo y cristalización de sales). Estos ensayos resultan de interés a la hora de seleccionar el material más adecuado para utilizar en este tipo de intervenciones.

- Mortero propuesto. Tras la aplicación de la metodología indicada, los resultados obtenidos revelaron que los morteros de cales en polvo carbonataban más rápidamente que los de cales en pasta, al presentar valores más altos del parámetro R y mayor velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. Sin embargo su comportamiento frente a los ensayos de envejecimiento fue peor. Esto es debido a que los morteros de cal en polvo presentan un mayor porcentaje de microporosidad, aspecto que favorece la carbonatación pero a cambio los hace más susceptibles frente a la alteración.

Los morteros de cal en pasta al contener mayor proporción de agua, el proceso de difusión del CO<sub>2</sub> se ve dificultado al principio pero a cambio este componente favorece la interacción entre el árido y la pasta, transmitiendo a la cal mayor poder aglomerante. Por esta razón se aconsejó el empleo de los morteros de cal en pasta y como árido la sílice o mezcla de sílice y carbonatos, al ser los que mejor se comportaron frente a la durabilidad. Este hecho se explica porque el aporte de estos áridos al mortero incrementa la microporosidad y su capacidad de perder agua, aspectos que como hemos indicado anteriormente favorecen la carbonatación. Se desaconsejó el aporte de aditivo porque fueron las probetas que dieron peor resultado independientemente del tipo de cal utilizada.



Aplicación del mortero seleccionado como material de juntas. Foto: Esther Ontiveros



Probetas diseñadas para su posible aplicación como morteros de reposición. Foto: Esther Ontiveros

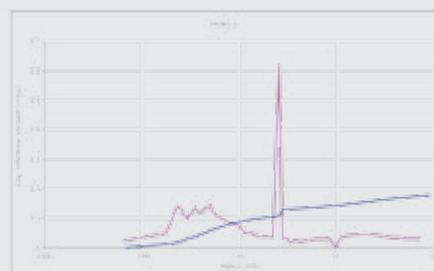
### Tipos de probetas diseñadas (EN-UNE 1015-2 y EN 1015-11)

Tipo	Componentes	Agua (ml)
Tipo I.1	Cal pasta+ SiO <sub>2</sub> (1:3)	150
Tipo I.2	Cal pasta+ SiO <sub>2</sub> + Ladrillo (1:2:1)	150
Tipo I.3	Cal pasta+ SiO <sub>2</sub> + CaCO <sub>3</sub> (1:2:1)	150
Tipo I.4	Calpasta+Cuarzo+CaCO <sub>3</sub> +ladrillo. 1:1.5:1:0.5)	150
Tipo II.1	Cal polvo + Cuarzo (1:3)	800
Tipo II.2	Cal polvo+ Cuarzo + Ladrillo (1:2.5:0.5)	800
Tipo II.3	Cal polvo+ Cuarzo + CaCO <sub>3</sub> (1:2:1)	800
Tipo II.4	Cal polvo + Cuarzo + CaCO <sub>3</sub> + Ladrillo (1:1.5:1:0.5)	800

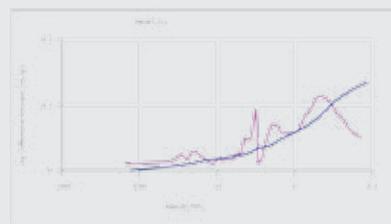
### Bibliografía:

VILLEGAS SÁNCHEZ, R. (1990) *Estudio de la Alterabilidad y Respuesta a Tratamientos de Conservación de los Principales Tipos de Piedra Utilizados en Catedrales Andaluzas*. Sevilla: Editorial de la Universidad, 1990

DELGADO RODRIGUES, J. (2008) "International Symposium of Stone Consolidation", Lisbon 2008



Porosidad de las probetas elaboradas con cal en pasta y árido de sílice (3 meses)



Porosidad de las probetas elaboradas con cal en polvo y árido de sílice (3 meses)