







## IV. Tratamientos

1. Tipología de materiales para tratamiento
2. Metodología para la evaluación y estudio previo de tratamientos
3. El papel de la analítica de los materiales en la restauración del patrimonio inmueble

# Tipología de materiales para tratamiento

Rosario Villegas Sánchez  
Departamento de Análisis. Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico

Raniero Baglioni  
Técnico de Gestión en Conservación Preventiva. E.P.G.P.C.

Marta Sameño Puerto  
Técnico de Gestión en Biodeterioro. E.P.G.P.C.

## 1. CRITERIOS GENERALES DE INTERVENCIÓN EN MATERIALES PÉTREOS

La intervención sobre la piedra de un monumento se contempla dentro del marco de la carta de Venecia (1968). Por lo tanto, todas las etapas y procedimientos empleados intentarán mantener la piedra en su aspecto original, no introduciendo variables que puedan trastocar el mensaje artístico y estético que sus autores pretendieron transmitir.

Llevar a la práctica esta teoría es, en la mayoría de las ocasiones, complejo desde el punto de vista técnico; sobre todo en los últimos años, ya que existe una fuerte agresión del ambiente. La piedra se halla en muchos casos en un avanzado estado de deterioro y al intervenir se pretende no sólo frenar este deterioro sino también dar soluciones de conservación que sean capaces de soportar las agresiones del ambiente durante un periodo de tiempo razonable.

Otro aspecto a considerar es el de las prioridades en las intervenciones de conservación. Como criterio general debe considerarse válido aquél que atiende a las causas del deterioro en primer lugar, actuando sobre ellas para erradicarlas o minimizarlas.

Posteriormente puede llevarse a cabo la intervención en la piedra propiamente dicha. En relación con ello debe recordarse que la piedra en un edificio es la capa más superficial del mismo y que en su deterioro y conservación pueden incidir otros materiales con los que está en íntimo contacto, como es el caso de los rellenos de muros, morteros, etc.

Los tratamientos existentes actualmente para la conservación de la piedra cumplen, en general, las prestaciones para las que han sido diseñados: consolidan, protegen, etc. Sin embargo, la mayoría están concebidos para ser aplicados a materiales homogéneos, con una composición, textura y porosidad uniformes (como el hormigón). Por el contrario, la piedra es un material extraordinariamente heterogéneo; entre sillares de la misma variedad litológica es frecuente que existan variaciones importantes en su textura, porosidad, etc., lo que condiciona un distinto grado de penetración y distribución de los productos de tratamiento en el seno de la piedra y, por tanto, una diferente durabilidad.

Ello obliga a que, cuando se plantea una intervención en la que se deben aplicar productos a una determinada piedra, se requiera siempre una experimentación previa, para ver cómo se comportan los sistemas piedra-tratamiento seleccionados. La realidad ha puesto en evidencia que los comportamientos obtenidos con un producto de tratamiento aplicado a un determinado tipo de roca no pueden extrapolarse a otras variedades sin cometer errores considerables.

Estos hechos y el escaso volumen de negocio que para la industria química representan los productos para el tratamiento de la piedra hace que, en general, las investigaciones sobre éstos sean relativamente escasas y que se disponga de pocos datos para conocer, a priori, el comportamiento de los diversos sistemas piedra-tratamiento.

Por todo ello, es importante remarcar que, ante la falta de elementos de juicio que permitan

seleccionar un tratamiento con unas garantías mínimas, es preferible no aplicar tratamientos o hacerlo sólo cuando sea absolutamente imprescindible.

## 1. 2. Etapas de la intervención

Con ocasión de la reunión en Bolonia (Octubre 1971) del Grupo de Trabajo para Tratamiento de la Piedra (ICOM, ICOMOS, ICR-Roma) se decidió clasificar los procesos de conservación de la piedra en tres grupos principales:

- Limpieza
- Consolidación
- Protección

De esta forma, se contempla el tratamiento de la piedra como una secuencia ordenada de operaciones adecuadas a las diferentes necesidades, en lugar de un proceso único. Una conservación efectiva requiere en primer lugar la identificación del mecanismo de deterioro, a continuación un proceso de limpieza (que puede incluir preconsolidación, desalinización y un tratamiento biocida) y cuando sea necesaria, una consolidación. Posteriormente, si el ambiente agresivo no ha cambiado, hace falta una protección que evite un nuevo deterioro. Además de estas etapas principales cabría considerar otras actuaciones.

- Preconsolidación: debe abordarse antes de la limpieza, cuando la piedra en la que se debe intervenir presenta un grado de cohesión que lo aconseje. Se lleva a cabo, sobre todo, en objetos labrados, esculturas, escudos o en paramentos con policromía, es decir, partes con un valor artístico significativo.
- Desalinización
- Reintegración de elementos con pérdidas
- Mantenimiento y conservación preventiva

## 2. LIMPIEZA

La limpieza de la piedra tiene como objetivo eliminar de su superficie la suciedad y los productos nocivos, es decir, aquéllos que aceleran

su deterioro. La limpieza debe también mejorar la percepción estética del edificio, procurando acercarla a la que tenía originalmente.

La costra que cubre la piedra consiste, principalmente, en sales solubles, incrustaciones insolubles, restos de antiguos tratamientos, partículas de combustibles quemados, vegetación, microorganismos y excrementos de pájaros. Por lo general estos productos no aparecen bien diferenciados y suelen encontrarse formando una capa más o menos regular y persistente sobre la piedra. Es conveniente tomar algunas muestras para observarlos y determinar su naturaleza.

La limpieza es una de las etapas más importantes en el sentido que, en muchas de las intervenciones en piedra, es la única o la primera que se lleva a cabo, abordándose en muchos edificios de valor histórico-artístico como una limpieza industrial, sin tener en cuenta los criterios que especialistas en restauración de piedra tomarían en consideración.

La limpieza condiciona también las etapas de intervención posteriores, por lo que hay que seleccionar los métodos y productos de tal manera que resulten compatibles con las etapas de intervención subsiguientes. Los principales requisitos que deben reunir los métodos de limpieza son:

- La acción limpiadora debe ser suficientemente lenta como para permitir que el operario pueda controlar sus efectos.
- El método empleado no debe generar productos perjudiciales para la conservación de la piedra.
- Dicho método tampoco debe producir fuertes abrasiones, microfracturas o modificaciones del relieve superficial de la piedra que faciliten su posterior deterioro.

La elección del método de limpieza depende fundamentalmente del tipo de suciedad a eliminar, extensión de la misma, grosor y uniformidad de la capa que debe eliminarse, así como de las características petrofísicas de la piedra y su estado de conservación. Es frecuente la utilización de varios métodos, que suelen aplicarse de forma

sucesiva o en distintas partes de un mismo edificio, dependiendo de las características de la suciedad que se pretende eliminar.

### 2.1. Limpieza con agua

Es el método más simple; con él se intenta disolver los compuestos solubles y ablandar los que no lo son, para terminar arrancando la suciedad con medios mecánicos suaves. Suele emplearse agua corriente, destilada o desmineralizada.

Con cualquier forma de aplicación que se elija, deben tomarse precauciones para conseguir que la penetración del agua sea lo menor posible, ya que pueden mojarse elementos internos (metálicos o de madera) y deteriorarse. Este método no debe aplicarse en estaciones frías para evitar los efectos inducidos por las heladas.

#### Agua a presión

Se aplica un chorro de agua a presión sobre la superficie, durante el tiempo suficiente para producir el ablandamiento de la capa de suciedad; de este modo, se disuelve la materia soluble y los restos de costra no solubles se eliminan con un cepillo.

Es un método eficaz para eliminar costras con sales solubles en calizas, poco efectivo para eliminar costras muy gruesas. No debe utilizarse cuando la piedra está muy decohesionada.

#### Agua pulverizada

Se rocía la superficie de la piedra con agua hasta que se reblandecen los depósitos de suciedad. Después de sucesivas aplicaciones se cepilla y se realiza un aclarado para eliminar el material disuelto.

#### Agua nebulizada

Para este método se usan nebulizadores o atomizadores que permiten usar una cantidad mínima de agua con el máximo efecto. Los nebulizadores reducen el agua a niebla, constituida por finísimas gotas, de diámetro entre 80 y 120 micras y una superficie específica muy grande,

que se depositan sobre la piedra sin apenas presión externa.

Debido a su gran superficie específica y a su elevado número, estas gotitas tienen una gran cantidad de puntos de contacto con la piedra. La capacidad de disolver costras negras con este método es muy alta y la acción mecánica de la limpieza se reduce al mínimo.

Por otra parte, la nube de agua pulverizada puede ser fácilmente orientada a las partes menos accesibles gracias a su fuerte dispersión en el aire, y su acción puede ser dirigida a áreas localizadas dejando otras partes para limpiar con otros métodos.

#### Vapor de agua

Se hace llegar a la piedra el vapor generado por una caldera, con una presión en la superficie de la misma de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. Esta técnica es apropiada para superficies irregulares, La piedra debe ser capaz de resistir la temperatura relativamente alta del vapor y no retener una cantidad excesiva del mismo, ya que en dicho caso podrían generarse eflorescencias.

Este método suele usarse en la piedra de edificios con escaso valor artístico. No se recomienda para la limpieza de monumentos porque sus efectos no pueden ser controlados y la elevada temperatura del vapor puede dañar la piedra.

#### Agua aplicada con apósitos

Los apósitos o compresas que se embeben en agua pueden ser de materiales inorgánicos absorbentes, como ciertas arcillas (sepiolita o atapulgita), filosilicatos hidratados de magnesio y aluminio del grupo de la paligorskita o sílice micronizada. También se pueden utilizar apósitos absorbentes de pasta de papel, pasta de madera, etc.

La característica principal para su utilización es que presentan una gran superficie específica y, por lo tanto, pueden absorber gran cantidad de agua u otros líquidos en relación a su peso. Así, 1 kg de atapulgita puede absorber sin hincharse 1,5 kg de agua ya que ésta ocupa los espacios vacíos de la estructura de la arcilla.

Suelen utilizarse para limpiar estatuas, relieves y frescos conservados en el interior de edificios, porque este método es eficaz sólo para solubilizar y remover costras de poco espesor (como máximo 1 mm). Si se utilizase para eliminar costras gruesas del exterior de edificios habría que repetir la operación un número de veces muy elevado.

Este método de limpieza puede aplicarse también para la eliminación de grasas y otras sustancias, sustituyendo el agua por los disolventes adecuados.

La ventaja de este método reside en que no es dañino, siendo aconsejable para la limpieza de objetos delicados. Además, debe tenerse en cuenta su bajo coste y facilidad de aplicación. Las desventajas residen en la lentitud, no controlabilidad y escasa eficacia para costras gruesas.

Existe también un procedimiento muy similar llamado paquete biológico, ya que parece ser que durante la aplicación en la piedra, los microorganismos formados pueden participar en la eliminación de la costra. Consiste en aplicar sobre la piedra una pasta a base de sepiolita o atapulgita con agua, urea y glicerina, en las siguientes proporciones (Istituto Centrale per il Restauro, Roma):

- 1 litro de agua
- 50 gramos de urea
- 22 ml de glicerina
- arcilla hasta formar una pasta.

Similar es la mezcla propuesta por Hempel:

- 25 gramos de urea
- 100 ml de glicerol
- 500 ml de agua
- cantidad suficiente de sepiolita para formar una pasta.

Se aplica la compresa cerca de un mes, tras el cual se puede eliminar el grueso de la costra negra por un simple lavado. No se conoce muy bien el mecanismo de acción en que se basa, pero se piensa en un efecto disolvente de las bacterias sobre el yeso y los ligantes de las costras negras. Al final del tratamiento es aconseja-

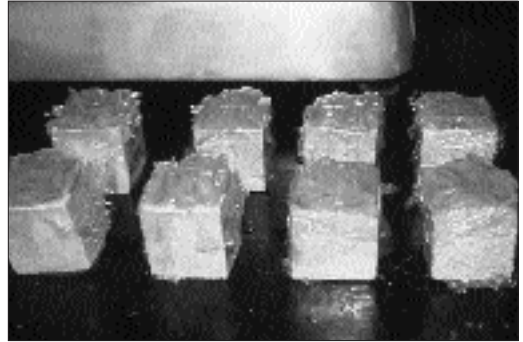


Figura 1. Ensayos de limpieza con papeta de arcilla y productos químicos

ble desinfectar con un fungicida para evitar fenómenos de corrosión por bacterias.

## 2.2. Limpieza mecánica

Estos métodos emplean energía mecánica para separar la suciedad del material a limpiar. Es importante que la separación tenga lugar justo en la interfase suciedad-piedra y que la acción mecánica no dañe a la piedra.

### Métodos mecánicos sencillos

La limpieza puede llevarse a cabo manualmente, con instrumentos como el bisturí, espátulas, papel de lija, piedra pómez, etc. o con otros instrumentos accionados eléctricamente pero de pequeñas dimensiones y perfectamente controlables (pequeños tornos con puntas y accesorios variables).

La eficacia de este tipo de limpieza depende fundamentalmente de la habilidad y sensibilidad del operador.

### Chorro de arena seca

Esta técnica usa un chorro de aire a presión que lleva en suspensión un abrasivo, que arranca la suciedad al chocar con la superficie. El abrasivo debe tener un tamaño homogéneo y fino, puede ser sílice, escoria metálica, esferas de vidrio, etc.

La acción mecánica depende por una parte de la presión del chorro de abrasivo, de su dureza y densidad y de la forma de las partículas abrasivas. También depende del tiempo de aplicación del chorro y de la distancia entre la boquilla y la superficie de la piedra.

Es muy difícil de controlar y puede eliminar, además de la suciedad, parte de la piedra del sustrato. El principal inconveniente es la formación de polvo. Debe utilizarse con precauciones en materiales heterogéneos o en zonas donde existan materiales de diferente dureza, para evitar erosiones en las zonas menos resistentes.

Se puede aplicar en cualquier estación y no provoca las eflorescencias que suele generar el chorro de arena húmedo.

### Chorro de arena húmeda

Consiste en la aplicación de una mezcla de agua y arena a presiones comprendidas entre 0,5 y 3 kg/cm<sup>2</sup>. No produce polvo dañino para el operador ni contamina el medio ambiente, aunque se forma barro que debe eliminarse posteriormente de la superficie por lavado.

No se recomienda en monumentos de interés histórico-artístico porque la cantidad de agua utilizada moviliza las sales solubles en los paramentos, con la posibilidad de cristalización de las mismas en la superficie durante el secado del agua.

### Microchorro de arena

En este caso se utiliza un polvo abrasivo muy fino, de menor dureza y tamaño que el utilizado en el chorro de arena. El abrasivo suele ser esferas de vidrio o de alúmina, de diámetro aproximado de 40 micras.

La presión del chorro se regula con facilidad y también se puede controlar la cantidad de abrasivo. Esto significa que la limpieza con este instrumento es graduable y, por tanto, aplicable en principio a cualquier tipo de piedra. Este método es efectivo para incrustaciones gruesas y duras, costras delgadas e incluso para los depósitos y costras negras que cubren la piedra con policromía, respetando las pátinas cromáticas originales bajo la suciedad.

Entre las desventajas cabe citar: que desprende mucho polvo, el cual debe recogerse para no contaminar; los aparatos diseñados para tal fin son costosos, así como su mantenimiento; y el abrasivo es comparativamente caro y no puede recuperarse. Finalmente, cabe señalar que es un método lento.

## 2.3. Limpieza química

Este método se basa en utilizar productos químicos solubles en agua que reaccionan con los compuestos que forman la costra, de forma que se pueden eliminar más fácilmente. En general deben evitarse los productos con pH menor de 5 o mayor de 8, es decir, muy ácidos o muy



básicos; así como aquellos que pueden generar sales solubles, perjudiciales para la piedra.

Normalmente se aplican mezclados con una pasta absorbente que facilita el contacto con la suciedad, impidiéndose la evaporación del agua y empleándose menos limpiador. Después de retirar esta pasta se termina de limpiar con agua y mecánicamente, comprobando que se elimina todo resto de limpiador.

#### Agentes ácidos

Se emplean ácidos y sales ácidas que reaccionan con las costras negras y las disuelven. Los efectos de los ácidos suelen ser duraderos y su agresividad puede comprobarse incluso años después de aplicados. Por ello, su uso no es recomendable.

De ellos, es particularmente peligroso el ácido clorhídrico, ya que puede dar como resultado la formación de cloruros, que pueden causar una fuerte degradación. Este efecto llega a ser patente al amarillear ciertas áreas de la piedra que contienen impurezas de hierro, las cuales son atacadas por el clorhídrico y migran hacia la superficie.

También se usan el bifluoruro de amonio y el ácido fluorhídrico. En rocas calcáreas el carbonato cálcico se transforma en fluoruro de calcio, menos soluble que el carbonato pero de volumen significativamente menor, provocando en la superficie fracturas por donde pueden penetrar contaminantes y soluciones dañinas. Sobre la sílice y los silicatos el fluorhídrico actúa convirtiendo el silicio en una sustancia gaseosa (tetrafluoruro de silicio).

En algunos casos particulares pueden ser apropiados otros ácidos, por ejemplo, las manchas de herrumbre en el mármol se eliminan bien con ácido fosfórico, seguido de un aclarado con amoniaco para neutralizarlo.

#### Agentes básicos

Están basados generalmente en la sosa cáustica con distintos aditivos para controlar y aumentar la actividad superficial. Su empleo resulta efectivo en calizas, mármoles y morteros

para eliminar las costras de yeso. También son frecuentes las mezclas basadas en el amoniaco.

Entre ellos se encuentra una mezcla de metafosfato de sodio con formiato de amonio, un agente humidificante y etanolamina, a un pH de 9, la cual tiene la propiedad de disolver el yeso sin atacar a la calcita.

Una fórmula puesta a punto por técnicos del Istituto Centrale del Restauro es la siguiente:

- 1.000 cc de agua
- 30 g de bicarbonato de amonio
- 50 g de bicarbonato de sodio
- 25 g de EDTA (sal bisódica)
- 10 cc de desogen
- 60 g de carboximetil celulosa

Dicha mezcla se identifica con la sigla AB57. Es importante que el pH no sea superior a 8 para evitar la corrosión de las calizas y la formación de subproductos dañinos. Una vez aplicada se eliminan los residuos de la pasta con varios lavados y cepillados; de este modo, se eliminan las sales básicas nocivas que podrían permanecer en las piedras.

Se trata de un método de limpieza controlable, pero no es aconsejable para materiales muy alterados, especialmente los mármoles (donde puede haber corrosión intergranular y decohesión de los granos de calcita) y las calizas muy porosas, puesto que, al separar el apósito, pueden arrastrarse partes importantes de material.

Es recomendable de forma especial para la eliminación de concreciones calcáreas en recubrimientos de poco espesor y cierta dureza. Presenta las ventajas de ser un método rápido, fácilmente aplicable y barato.

#### Disolventes orgánicos

Los disolventes orgánicos se emplean para eliminar aceites y grasas de la superficie. Los componentes grasos que pueden encontrarse con frecuencia en la capa de suciedad suelen ser residuos de antiguos productos de tratamiento (aceites, ceras, etc.). Todos estos productos son particularmente sensibles a la oxidación, originando variaciones en el color original.

Los disolventes orgánicos más utilizados son el tricloroetano y los hidrocarburos alifáticos (n-hexano) o aromáticos (tolueno). Para retardar la evaporación de los mismos y alargar el tiempo de contacto con la capa de suciedad, suelen aplicarse mediante apósitos de pulpa de papel, los cuales se cubren un cierto tiempo con una capa de polietileno. También se preparan en forma de gel, utilizando como soporte la carboximetilcelulosa o la bentonita.

La suciedad formada por grasa y materia soluble en agua se limpia bien con emulsiones de solventes orgánicos y agua.

#### 2.4. Limpieza con láser

La limpieza con láser es un proceso que puede considerarse físico y no mecánico. Se basa en la absorción por la costra de pulsos de luz coherente (todos los fotones que forman el haz tienen la misma longitud de onda y están en fase, es decir, coinciden los máximos y los mínimos de las ondas) de gran energía, lo cual da como resultado la vaporización del material que la forma; este método se denomina fotoablación. Cuando queda al descubierto la piedra limpia, de color claro, la absorción de energía cae a niveles más bajos y el proceso se para.

Las características de este método son las siguientes:

- Radiación monocromática: puede elegirse una longitud de onda específica para eliminar capas de alteración de distinta naturaleza química sin producir daños en el sustrato.
- Radiación en pulsos: los pulsos son suficientemente cortos (duración del orden de 10 ns) como para garantizar densidades de potencia elevadas sin dar tiempo a la generación de alteraciones térmicas.
- El haz puede ser expandido, para aumentar el tamaño de la zona a limpiar, o focalizado, para concentrar la energía en zonas de menor tamaño.

En la actualidad existen ya en el mercado aparatos adaptados para la limpieza de monumentos, que pueden ser empleados en obra. Para describir un láser primero se cita su medio

activo, seguido de la duración del pulso y de su potencia máxima de salida o de su energía total por pulso.

El láser permite variar la intensidad de la luz y así limpiar capas de distintos espesores. Si la costra es gruesa se emplean energías de más de 10 megavatios/m<sup>2</sup>, con lo que se produce la evaporación del material depositado. En pátinas o costras muy finas la ablación se produce con menores intensidades. Su velocidad de trabajo se sitúa en torno a los 100 cm<sup>2</sup>/min en paramentos lisos, aunque siempre depende de la intensidad necesaria y del relieve

Cuando bajo la capa de suciedad existe un recubrimiento cromático, éste no se ve afectado por la limpieza con láser si se ejecuta con la intensidad adecuada. No obstante pueden surgir complicaciones, especialmente cuando se trata de colocaciones rojizas.

En resumen, las ventajas más importantes de la limpieza con láser son:

- Escasa o nula agresividad física, lo que permite limpiar piedras muy decohesionadas o friables, sin necesidad de preconsolidarlas.
- Elevada selectividad.
- Ausencia de contacto con la piedra.
- Inexistencia de medios adicionales (agua o abrasivos), lo que evita los daños por humedad o abrasión.

#### 2.5. Aplicación de ultrasonidos

Este método se emplea para el tratamiento de costras sin causar ningún daño a la piedra subyacente. La limpieza se realiza mediante ciertos aparatos capaces de transmitir unas vibraciones desde un emisor a través de una película de agua a la costra negra. El agua transmite las vibraciones y hace despegarse a la costra, eliminándose después por lavado los restos de suciedad.

Es un instrumento de precisión y, si se trabaja correctamente, puede ser muy útil en el levantamiento de capas de suciedad en esculturas policromadas. Dada su gran lentitud es aconsejable utilizarlo sólo en objetos de pequeñas dimensiones.

### 3. EXTRACCIÓN DE SALES SOLUBLES

Las sales solubles son una de las más importantes causas de deterioro de la piedra de edificación. La colocación de sus cristales dentro del espacio poroso de la piedra contribuye a microfisurarla y disgregarla. Por ello, cuando están presentes en la piedra deben eliminarse, aunque la extracción (desalinización) no es, en la práctica, una tarea sencilla. Una incompleta eliminación de las sales condiciona una mala evolución de los tratamientos de consolidación e hidrofugación.

Existe la posibilidad de, una vez analizadas las sales presentes en un edificio y conocidas las condiciones termodinámicas que controlan su formación, actuar en el entorno de manera que las sales no se generen de nuevo. Para ello es conveniente determinar las fuentes implicadas en su formación, que suelen ser: el agua procedente del suelo o de la lluvia, la contaminación ambiental y los morteros.

Un procedimiento habitual de extracción consiste en aplicar sobre la superficie de la piedra un material absorbente (como pasta de celulosa) embebido en agua destilada, el tiempo que sea necesario para solubilizar las sales (de las que previamente se conoce su naturaleza química). La pasta aplicada (apósito) se mantiene cubierta con una capa de polietileno todo el tiempo que dura esta fase. A continuación se retira el polietileno, se deja secar y, por último, se retira.

Seguidamente se diluye la pasta en agua destilada y se determina la concentración de sales presentes con un conductímetro. La operación de extracción se repite tantas veces como sea necesario hasta comprobar que no quedan sales solubles en la piedra, es decir, hasta que la solución deja de ser conductora.

Como soporte se puede utilizar también sepiolita, atapulgita, etc. Para costras duras con sales pueden utilizarse aditivos, tales como AEDT, bicarbonato sódico, bicarbonato o carbonato amónico.

En los últimos años se han considerado otros métodos de desalinización menos habituales y con resultados menos contrastados. Así, por ejem-



Figura 2. Limpieza con láser

Figura 3. Extracción de sales solubles

plo, se ha propuesto el uso del vacío, electrodiálisis, microondas y bacterias sulforreductoras.

#### 4. MÉTODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL BIOLÓGICO

El control del crecimiento de los agentes biológicos responsables del biodeterioro de las obras de arte, se encuentra dentro de las operaciones realizadas en las intervenciones de restauración. La eficacia de estos tratamientos depende del método y de los productos empleados, sin embargo, es necesario recalcar que los organismos volverán a crecer si las condiciones ambientales son favorables.

##### 4.1. Métodos indirectos

Suponen una inhibición o disminución del crecimiento biológico por modificación de los parámetros ambientales (humedad, temperatura,...) o de los factores fisico-químicos del sustrato (nutrientes).

Sin embargo no siempre es posible realizar la aplicación de este tipo de métodos, puesto que raras veces se puede provocar un cambio en las condiciones ambientales y llevar a cabo un control estricto de estos parámetros.

##### 4.2. Métodos directos

Suponen una acción directa sobre los organismos responsables del biodeterioro, es decir un tratamiento que consista en esterilización y/o erradicación de los organismos. Sin embargo, con el tiempo los materiales pétreos pueden ser nuevamente colonizados, por lo tanto estos métodos resultan útiles durante un cierto período de tiempo, debiendo llevarse a cabo un mantenimiento estricto del edificio después de restaurado.

##### Métodos mecánicos

Estos métodos se basan en la remoción física de los agentes biodeteriorantes con instrumentos manuales como bisturí, espátula, cepillo, aspirador, etc. Por su simplicidad son comúnmente empleados, sin embargo tienen la desventaja de no dar resultados de larga duración, puesto que resulta muy difícil obtener una eliminación completa de la estructura vegetativa o reproductiva de la especie presente, a menos que se dañe gravemente el sustrato. Los métodos mecánicos pueden resultar muy útiles sobre todo si se combinan con métodos químicos.



Figura 4. Aplicación de biocidas

## Métodos físicos

Estos métodos se basan en el empleo de radiaciones electromagnéticas y eléctricas con acción biocida o nociva para los organismos tratados.

La radiación ultravioleta muestra una gran actividad germicida. Este tipo de radiación es muy utilizado para la esterilización de superficies, utensilios y objetos.

Los rayos  $\gamma$  son radiaciones electromagnéticas con una frecuencia más elevada que los ultravioleta y, por tanto, con una mayor actividad biocida. Su aplicación se limita al tratamiento de materiales orgánicos (papel, pergamino y madera).

El uso de altas y bajas temperaturas también está restringido al caso de materiales orgánicos.

El tratamiento con ultrasonidos, empleado para la limpieza de objetos arqueológicos, madera mojada y tejidos modernos, puede tener analogías con los efectos biocidas.

## Métodos biológicos

Son aquéllos que utilizan especies parásitas o antagonistas para limitar el crecimiento de otras especies animales o vegetales.

En el caso de la flora vascular ruderal se puede pensar en el empleo de insectos fitófagos especializados, pero en la práctica existen numerosas dificultades y contraindicaciones.

En el caso de animales, sobre todo contra la avifauna, se han empleado especies antagonistas (predadores de pollos o de huevos) que reducen la densidad de población de otras especies.

En el contexto de los bienes culturales son necesarios mayores conocimientos acerca del comportamiento de los insectos en relación a sus enemigos naturales. La principal desventaja es su escasa eficacia al no erradicar completamente las plagas.

Las feromonas constituyen un método no tóxico de control que está siendo bastante investigado. Son sustancias muy específicas que intervienen en el apareamiento atrayendo al sexo contrario. Actualmente son sintetizadas químicamente y se aplican en trampas para atrapar al

mayor número de insectos, erradicándolos posteriormente con un insecticida.

## Métodos químicos

· Pesticidas y desinfectantes: características, requisitos y métodos de aplicación

### a) Definición y clasificación de los productos

Se denominan pesticidas las sustancias químicas utilizadas para eliminar el crecimiento de especies biológicas indeseables. La acción biocida contra microorganismos se llama desinfección y contra organismos macroscópicos como insectos y plantas se llama desinfestación.

Los pesticidas pueden ser clasificados dependiendo de:

- su naturaleza química (orgánicos o inorgánicos),
- los organismos a eliminar (existen diversos productos, pero en el caso del biodeterioro de las obras de arte se emplean bactericidas, fungicidas, algicidas, herbicidas e insecticidas),
- su modo de acción,
- y su uso o formulación.

En algunos productos comerciales, el principio activo, que indica la actividad biocida, aparece unido a otros aditivos que mejoran la eficacia del producto. Así pues, el mismo principio activo puede ser vendido en distintas formulaciones o mezclas con distintos nombres comerciales.

### b) Requisitos de los productos

Los requisitos de los productos que se emplean en la conservación de las obras de arte deben ser por una parte de tipo técnico y por otra de tipo sanitario:

- elevada eficacia contra los agentes biodeteriorantes,
- nula interferencia con los materiales constitutivos de la obra en estudio,

- baja toxicidad para la salud y
- bajo riesgo de contaminación ambiental.

La eficacia de un producto va en función de la actividad biocida contra los organismos a eliminar. Se define teniendo en cuenta la dosis necesaria (cantidad de pesticida/unidad de volumen de aire o superficie), el espectro de acción (amplia actividad contra los organismos) y la persistencia (duración del tratamiento en función de la permanencia de residuos tóxicos).

Existen una serie de factores que normalmente influyen en la eficacia de un tratamiento:

- concentración empleada,
- duración de la aplicación,
- estabilidad del producto,
- temperatura ambiental,
- entidad de la colonización,
- presencia de materiales orgánicos,
- presencia de fisuras en el sustrato,
- viento y lluvia durante el tratamiento,
- contenido de agua del sustrato,
- tipo de sustrato,
- tipo de disolvente,
- pH de la solución,
- intensidad luminosa y
- lluvia posterior al tratamiento.

La interferencia con el sustrato depende de la capacidad de reacción química que tenga el biocida y de la presencia o no de sustancias coloreadas presentes en la formulación del producto comercial. Por lo tanto es necesario verificar que el producto sea químicamente neutro, estable e incoloro.

Sin embargo, la interacción biocida-sustrato no sólo depende de algunas características químicas del principio activo, sino también de la concentración empleada, del tiempo de contacto, de la metodología de aplicación y del tipo de sustrato (composición mineralógica y porosidad).

La toxicidad de un producto se define como su capacidad de producir lesiones o la muerte. Para cuantificar la toxicidad de un producto se usa un índice referido a la cantidad de principio activo (suministrado por vía oral o por vía cutá-

nea) que resulta letal para el 50% de los animales usados en tests experimentales. Se indica con las siglas DL50 (Dosis Letal) = mg de producto/Kg de peso del animal. El valor que define la DL50 está condicionado por diversos factores: especie animal, variabilidad genética, edad, condiciones fisiológicas, factores ambientales, sustancias asociadas y degradación de la sustancia.

En base a esto se establecen las clases toxicológicas (en orden decreciente de toxicidad) de las formulaciones comerciales, de acuerdo con la normativa comunitaria (Dir. 92/32/CEE).

Todas las sustancias con actividad biocida utilizadas en el sector agrícola y civil- sanitario, deben ser registradas por la institución correspondiente, documentando los datos toxicológicos y la eficacia contra las distintas especies. Sobre esta base, las autoridades competentes clasifican las sustancias y les asignan la clase toxicológica, indicando las precauciones necesarias que deben ser tenidas en cuenta a la hora de manipular el producto.

El riesgo de contaminación ambiental es otro de los factores que debe ser tenido en cuenta. A veces, es posible que una dosis más o menos elevada del producto aplicado, se disperse en el ambiente.

### c) Modalidad de aplicación

Los biocidas pueden ser aplicados dependiendo del material constitutivo de la obra, de su estado de conservación, del organismo a eliminar, de la entidad y difusión del ataque y del producto elegido.

Los tratamientos pueden hacerse mediante pinceladas, aplicación de compresas, inyección, fumigación, etc.

Los productos vienen en formulaciones líquidas y sólidas y se disuelven o dispersan en agua o en disolventes orgánicos a distintas concentraciones.

En función del tipo de organismo se puede efectuar una remoción suave de la biomasa mediante el uso de instrumentos adecuados.

La pulverización y la aplicación mediante pincel del producto diluido son los métodos de tratamiento más comunes que se emplean. En el

caso de pinturas que presenten un estrato pictórico muy deteriorado, es preferible utilizar el sistema de pulverización.

La aplicación de compresas se realiza sobre todo en el caso de organismos que están en estrecho contacto con el sustrato, como los líquenes, con el fin de incrementar el tiempo de contacto de la solución biocida con el organismo.

La inyección de biocidas se puede efectuar en el caso de materiales leñosos deteriorados por insectos, aprovechando los orificios y galerías que han dejado en la madera.

La fumigación o dispersión de un biocida gaseoso en el aire se emplea en el caso de materiales orgánicos. Este método tiene como ventajas una alta eficacia y una penetración más profunda en el material constitutivo. Sin embargo, debido a la alta toxicidad que presentan las sustancias usadas como fumigantes, el tratamiento debe realizarse en cámara de fumigación u otro ambiente perfectamente sellado. Actualmente, se emplean gases inertes (nitrógeno o argón) en condiciones de humedad relativa baja.

#### Atmósferas controladas. Gases inertes

La aplicación de productos biocidas, como la fumigación con gases (óxido de etileno, bromuro de metilo, fosfinas, etc.), puede ocasionar graves problemas de toxicidad en las personas que los usan y alteraciones en las propiedades físico-químicas de los materiales que constituyen las obras de arte.

Como tratamiento alternativo, se propone la aplicación de un gas inerte (argón o nitrógeno) en un sistema herméticamente cerrado, en cuyo interior se deposita el objeto infestado. Es necesario llevar el control de ciertos factores ambientales: temperatura, humedad relativa y concentración de oxígeno. Se han realizado investigaciones en laboratorio que indican que una atmósfera de gas inerte, aplicada a baja concentración de oxígeno, produce una anoxia completa en todas las fases del ciclo biológico de especies de insectos destructores de bienes culturales.

El objetivo es eliminar por completo cualquier plaga de insectos y disminuir el desarrollo de microorganismos aerobios que se encuentren

alterando las obras de arte. El gas descrito no es tóxico, tiene un bajo coste y es estable por lo que no produce alteraciones físico-químicas en los objetos tratados.

#### · Bactericidas, fungicidas y algicidas

Compuestos inorgánicos  
Compuestos organometálicos  
Compuestos fenólicos y derivados  
Compuestos del amonio cuaternario  
Mezclas

#### · Herbicidas (líquenes, musgos y plantas vasculares)

Compuestos inorgánicos  
Derivados de la urea  
Diazinas  
Triazinas  
Piridinas  
Compuestos fosfoorgánicos  
Mezclas

### 4.3. Ensayos con biocidas

El estudio de las diferentes formas de vida que aparecen sobre un monumento es la base para la consiguiente selección de los tratamientos biocidas para la conservación.

#### Determinación de la eficacia

Se realizan una serie de tratamientos biocidas in situ y posteriormente ensayos de laboratorio: aplicación del producto y observación de la interfase liquen-sustrato.

La eficacia de los distintos tratamientos se estudia mediante observaciones directas de los organismos en varios intervalos de tiempo y mediante el uso del microscopio óptico y del microscopio electrónico de barrido.

#### Determinación de la interacción biocida-piedra

El objetivo de este estudio es verificar el efecto de los tratamientos biocidas sobre los materia-



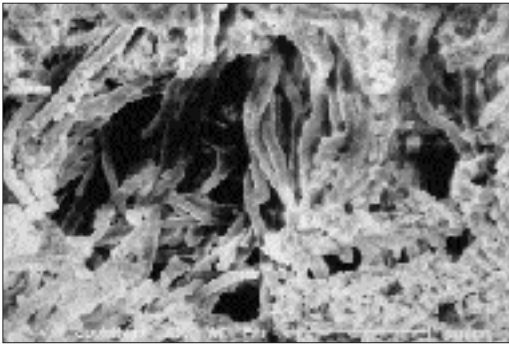
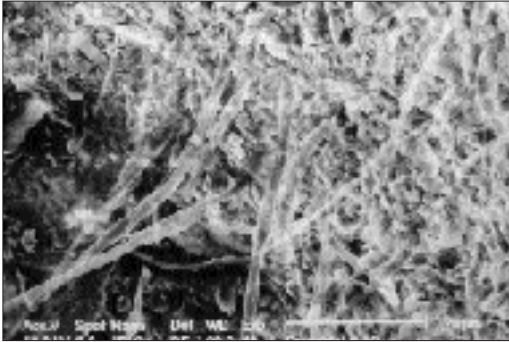


Figura 5 a. Hifas de líquenes tratados con cloruro de benzalconio, observación al SEM

Figura 5 b. Hifas de líquenes sin tratar, observación al SEM

les pétreos, utilizando diversos ensayos y métodos de aplicación de los productos. Así pues, las características de dichos materiales se determinan antes y después del tratamiento biocida.

Por un lado se procede a la preparación de los biocidas en dosis determinadas para los distintos tratamientos.

Los métodos de análisis son los siguientes:

- Absorción por capilaridad
- Alteración cromática
- Ensayos de alteración acelerada
- Impregnación por inmersión y observación al microscopio electrónico de barrido

## 5. CONSOLIDACIÓN

Por consolidación se entiende la aplicación de un material que, al penetrar en profundidad en la piedra, mejora su cohesión, sus características mecánicas y la adhesión de las capas alteradas al sustrato sano. La aplicación de un producto consolidante es necesaria únicamente cuando la piedra ha perdido cohesión y debe introducirse un material que consiga la unión entre los granos minerales que la forman y que han quedado sueltos y la adherencia entre la capa alterada y la sana.

Los tratamientos efectuados hace más de tres o cuatro décadas aportan escasa información acerca del comportamiento de los productos utilizados, ya que existe poca documentación sobre sus características, sus técnicas de aplicación, el estado de la piedra antes de la misma, etc. Aunque en la actualidad los tratamientos son descritos en profundidad y su evolución seguida detalladamente a lo largo de los años, la lentitud de los procesos de alteración hace que, en la mayoría de los casos, no exista la adecuada información sobre el comportamiento de los productos usados, y que haya que seguir recurriendo a los ensayos acelerados de laboratorio para llegar a la elección de los más apropiados.

Los principales métodos de consolidación se basan fundamentalmente en tres procesos:

- 1) Reemplazar aquellos constituyentes de la piedra que son propensos al ataque atmosférico



rico, y precipitar materiales químicamente resistentes en sus poros, para consolidar los granos sueltos. Estos serían los tratamientos con soluciones de compuestos inorgánicos.

2) Precipitar sílice, procedente de ésteres de silicona, en los poros de la piedra. Los productos organosilícicos consisten en monómeros, oligómeros o polímeros de dicha familia y su efecto final es producir un depósito de sílice que une los granos sueltos.

3) Impregnar la piedra con productos orgánicos con objeto de cementar los granos que han quedado sueltos a causa de la alteración, e impermeabilizar y proteger la piedra de posteriores ataques. Los productos orgánicos rodean los granos de la piedra de una red de un polímero orgánico que, teóricamente, no debe llenar los poros.

Los consolidantes inorgánicos parecen los más apropiados, por su similitud con los componentes de la piedra, y resisten mejor, en general, la acción de la intemperie. Sin embargo, sus características mecánicas son claramente inferiores a las de los orgánicos, y es difícil lograr una buena penetración del tratamiento, uno de los aspectos fundamentales de la consolidación. Los polímeros orgánicos, además de su mayor alterabilidad, poseen ciertas características muy diferentes de aquéllas de la piedra; por ejemplo, sus coeficientes de expansión térmica son mayores que los de la piedra, originándose tensiones entre el consolidante y el sustrato al variar la temperatura. Los organosilícicos pueden considerarse intermedios entre los anteriores; una vez polimerizados su esqueleto está formado por átomos de oxígeno y de silicio, de naturaleza inorgánica, mientras que su origen y mecanismo de polimerización guardan relación con los productos orgánicos, pudiendo alcanzar profundidades de penetración y características mecánicas similares a las de éstos.

### 5.1. Características de los consolidantes

Las características que deben reunir los consolidantes son las siguientes:

a) Valor consolidante, ya que la función de un consolidante es restablecer la cohesión de los granos de la piedra deteriorada. Para obtener una medida cuantitativa del valor de la consolidación se usan las medidas de la resistencia a la compresión, a la tracción, de la dureza superficial o de la resistencia a la abrasión.

b) Alterabilidad de la piedra consolidada, debe ser inferior a la de la piedra sin tratar, ya que de lo contrario sería preferible no tratarla y sustituirla. Depende tanto de las características del producto como de las de la piedra y también de los factores de alteración. Se determina con la ayuda de ensayos de alteración acelerada.

c) Profundidad de penetración. Un consolidante debe restablecer la cohesión entre la zona externa alterada y el sustrato interno sin alterar. La interfase entre la zona tratada y la sin tratar marca un cambio de propiedades tales como porosidad o permeabilidad al agua líquida y vapor; si este cambio es muy brusco, puede llegarse al desprendimiento de la capa tratada. La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la viscosidad del producto y al ángulo de contacto con la piedra.

d) Modificación de la porosidad y porometría. La alterabilidad de una piedra está muy relacionada con su contenido de agua y con las posibilidades de movimiento de ésta en su interior, función de la cantidad de poros y del tamaño de éstos. Si un tratamiento produce una disminución de porosidad muy acusada o un aumento en los microporos, la alterabilidad de la piedra se verá incrementada.

e) Capacidad de transferencia de humedad. Los consolidantes deben permitir el paso de humedad a través de la piedra, para impedir la acumulación de agua y sales en determinadas zonas.

f) Compatibilidad con la piedra. En el aspecto químico, esto significa que no deben formar-

se compuestos que puedan reaccionar con los componentes de la piedra o que puedan afectar a la estructura cristalina. Desde el punto de vista físico, las propiedades de la piedra consolidada deben ser similares a las de la piedra sin tratar, a fin de que no se creen tensiones entre la capa tratada y el sustrato interno.

g) Efecto en el aspecto. La piedra no debe sufrir cambios de color o de brillo a causa de un tratamiento. Además, el aspecto superficial no debe alterarse significativamente con el paso del tiempo por efecto de los agentes ambientales, especialmente la radiación UV.

### 5.2. Consolidantes inorgánicos

La utilización de compuestos inorgánicos con fines de consolidación data de varios siglos y alcanzó su máximo desarrollo en el XIX. Estos compuestos, de naturaleza semejante a la de los componentes de la piedra, parecerían, en principio, los más idóneos para su restauración. Sin embargo, esta similitud hace que la piedra se siga alterando de la misma forma en que lo ha hecho antes de la consolidación.

Sus ventajas son su mayor duración y una gran inercia frente a la radiación UV. Entre sus inconvenientes se encuentran su mayor fragilidad y menor elasticidad, la dificultad de conseguir una buena penetración lo que produce la formación de costras delgadas y duras, el cambio de color de la superficie, la formación de sales solubles como subproducto, el crecimiento de cristales que puede generar tensiones en el interior de los poros, y su baja acción consolidante.

Entre ellos se encuentran los siguientes:

a) Hidróxido cálcico en forma de soluciones o suspensiones acuosas. El consolidante es el carbonato cálcico que se forma por reacción con el anhídrido carbónico atmosférico.

b) Hidróxido de bario. Los otros hidróxidos alcalinotérreos reaccionan igual con el anhídrido

carbónico atmosférico, con la ventaja de que los carbonatos que se forman son menos solubles que el cálcico y, por tanto, más resistentes a la alteración.

c) Silicatos alcalinos. Con ellos se obtiene la precipitación de sílice. Su principal problema es la formación de sales solubles como subproducto y su bajísima penetración.

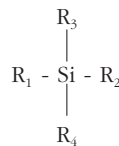
d) Derivados del Flúor. El ácido fluorhídrico reacciona en las piedras calizas dando fluoruro cálcico, y en las areniscas dando fluosilicato, en ambos casos en costras muy finas. Con el ácido fluosilícico y los fluosilicatos se obtienen fluoruro cálcico y sílice, pero se forma una costra muy fina y de distinta composición que el sustrato, que normalmente termina desprendiéndose.

e) Anhídrido carbónico y carbonato. Empleando estos compuestos se pretende reconvertir el yeso, formado como consecuencia de la alteración, en carbonato cálcico.

f) Otros: estearato de cinc y aluminio, sulfato de aluminio, ácido fosfórico, fosfatos, aluminato potásico, etc.

### 5.3. Consolidantes organosilícicos

Su acción consolidante consiste en la formación de una estructura reticular semejante a la de la sílice. Inicialmente se usaron en el tratamiento de piedras silíceas, pero su aplicación se ha extendido, con muy buenos resultados, a materiales calizos. Su composición se basa en moléculas del tipo



donde  $R_i$  son radicales de dos tipos:

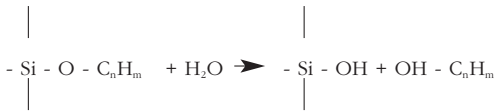
- O -  $C_nH_m$  alcoxí
- $C_nH_m$  alquilo

Tabla 1. Compuestos organosilícicos consolidantes

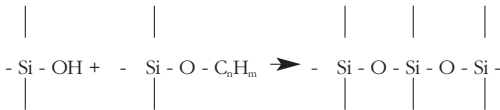
DENOMINACIÓN	FABRICANTE	COMPOSICIÓN
Rhodorsil X 54 802	Rhône-Poulenc	Metiltrimetoxisilano
Rhodorsil XR 893	Rhône-Poulenc	Metilfenilpolisiloxano
Rhodorsil 10336	Rhône-Poulenc	Alquilarilpolisiloxano
Consolidante OH	Wacker-Chimie	Silicato de etilo
Consolidante H	Wacker-Chimie	Silicato de etilo + metiltrimetoxisilano
Motema 28	MOTEMA	Silicato de etilo
Motema Sylan	MOTEMA	Silicato de etilo + alcoxisilano
Tegovakon V	Th Goldschmidt	Silicato de etilo
Tegovakon T	Th Goldschmidt	Silicato de etilo + metiltriatoxisilano
Dynasil A	Dynamit Nobel	Silicato de etilo
Brethane	Building Research Station	Triatoxisilano
Dow-Corning Z 6070	Dow Chemical	Metiltrimetoxisilano
Dri Film 104	General Electric	Alcoxisilano
ICI EP 5850	ICI	Metiltriatoxisilano

El nombre que reciben es el de alquilalcoxisilanos, con prefijos que indiquen el número de radicales de cada tipo que existen en la molécula. Estos productos pueden utilizarse en forma de monómeros de los tipos anteriores o de material parcial o totalmente polimerizado.

El proceso de polimerización en el interior de la piedra cuando se utilizan monómeros comienza por la hidrólisis del grupo alcoxi



y continúa con la polimerización propiamente dicha



que continúa hasta que todos los grupos alcoxi han reaccionado.

Los grupos alquilo permanecen sin reaccionar y son los que caracterizan el tipo de polímero formado:

Si se parte de un tetraalcoxisilano se obtiene una estructura análoga a la de la sílice y tiene sólo efecto consolidante

Si se parte de un alquiltrialcoxisilano queda una polímero tridimensional con grupos orgánicos, por lo que tiene propiedades consolidantes e hidrófugas.

Si se parte de un dialquildialcoxisilano resulta un polímero lineal con dos grupos orgánicos en cada átomo de silicio, por lo que tiene sólo efecto hidrófugo.

#### 5.4. Consolidantes orgánicos. Polímeros sintéticos

Entre los productos consolidantes orgánicos se utilizan algunos de origen natural, si bien son los compuestos sintéticos los más empleados, especialmente a partir de los años sesenta. Prácticamente todos estos productos tienen, además

de su carácter consolidante, efecto hidrófugo, debido a su composición orgánica. Pueden aplicarse en forma de polímeros, disueltos en un diluyente apropiado, o en forma de monómeros, líquidos o disueltos, que después polimericen en el interior de la piedra.

De forma general, los grandes problemas de la consolidación con productos orgánicos son la penetración y la resistencia a la radiación solar.

La penetración de un producto líquido viene condicionada por su viscosidad; las macromoléculas de un polímero, de elevada viscosidad, tienen una penetración pequeña si no se diluyen a concentraciones muy bajas. Por otra parte, la evaporación del solvente en la superficie de la piedra provoca la migración de la solución desde el interior hacia la superficie, con el resultado de que el polímero se deposita en una zona muy estrecha.

Si se utilizan monómeros y se polimerizan en el interior de la piedra, los problemas relacionados con la penetración se reducen considerablemente. Sin embargo, aparecen otros debidos a las dificultades para que esta polimerización se produzca correctamente en el interior de la piedra.

El efecto de la radiación UV depende de los enlaces sobre los que actúa; prácticamente todos los polímeros orgánicos absorben radiación, pero las resinas epoxi se alteran con mayor rapidez y en mayor medida.

Los distintos tipos de productos pertenecen a los siguientes grupos:

a) Ceras. Las ceras naturales se encuentran entre los primeros productos empleados para proteger la piedra. Las sintéticas son derivados del petróleo y destaca especialmente la microcristalina. Pueden aplicarse fundidas o disueltas, y su principal inconveniente es el ablandamiento a altas temperaturas y la retención de polvo en este caso.

b) Polímeros acrílicos. Los monómeros más utilizados son derivados de los ácidos metacrílico y acrílico, produciéndose los polimetacrilatos o los poliacrilatos. En los productos comerciales son muy frecuentes las mezclas

Tabla 2. Polímeros orgánicos usados como consolidantes

Denominación	Fabricante	Composición
Acrílicos		
Paraloid B72	Röhm & Haas	Metilacrilato + etil-metacrilato
Paraloid B44	Röhm & Haas	Metilmetacrilato + etilacrilato
Motema Finish	MOTEMA	Polimetilmetacrilato
Bedacril 122 X	ICI	Poli-n-butilmetacrilato
Acrilsilicónicos		
E 0057	ARD Raccanello	
Producto 640	Mased	
Epoxis		
Araldit PZ820	Ciba Geigy	Derivado de Bisfenol A
Araldit DY 022	Ciba Geigy	Butanodioldiglicidiléter
Araldit XB2962	Ciba Geigy	Polifuncional alifática
Epoxisilicónico		
Rhodorsil 1330C	Rhône-Poulenc	Metilfenilpolisiloxano y epoxi
Otros		
Isostar C	M.P.M.	Poliuretano
Oxanpierre P/529 PIE	Metalfix	Poliuretano
Stratyl A 228	Rhône-Progil	Estireno Poliéster
Mowilith 35/73	Hoechst	Acetato de vinilo

de distintos monómeros. También se emplean en combinación con los productos organosilícicos, dando polímeros acrílsilicónicos.

c) Resinas epoxi. Su principal campo de aplicación es como adhesivos y morteros. Se utilizan en forma de dos componentes que se mezclan junto con un catalizador para proceder a su aplicación.

d) Resinas de estireno poliéster. Son copolímeros formados por la combinación de varios monómeros, que se aplican disueltos y con un catalizador.

e) Polímeros vinílicos, poliuretanos, nylon, resinas fluoradas, etc.

### 5.5. Aplicación de los tratamientos: disolventes y emulsiones

El modo de aplicar los tratamientos es un aspecto muy importante, ya que puede condicionar de forma decisiva la evolución de la piedra tratada. El éxito de un tratamiento depende, en primer lugar de la profundidad de penetración y de la distribución del producto en el interior de la piedra. Los principales factores que influyen en la penetración de los productos de tratamiento en la piedra porosa son:

- La naturaleza del consolidante y del disolvente.
- La concentración, viscosidad y tensión superficial de la solución.

- El tiempo de contacto entre la piedra y la solución.
- Las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente.
- La porosidad de la piedra.

Las firmas comerciales que suministran los productos de tratamiento suelen facilitar datos sobre los factores que se acaban de mencionar.

La aplicación de los productos puede hacerse con nebulizador, pincel, apósitos y gota a gota. Los dos primeros procedimientos son los más ampliamente utilizados; el resto suele reservarse para zonas concretas, con problemas más específicos.

En laboratorio los productos suelen aplicarse por: capilaridad, inmersión total, inmersión total al vacío, gota a gota, en autoclave, por nebulización, etc. Cuando se hacen pruebas experimentales en el laboratorio para valorar la idoneidad de los tratamientos, conviene aplicar éstos con los mismos procedimientos que se van a emplear en la obra.

En trabajos de mayor contenido científico, cuando se pretende estudiar las propiedades y durabilidad de diferentes sistemas piedra-tratamiento, es conveniente utilizar varios procedimientos de aplicación, a fin de disponer de los correspondientes patrones de comportamiento como referencia.

Los disolventes más frecuentemente utilizados son: agua, alcohol, acetona, white spirit, tricloroetano, tolueno y xileno. Algunos de ellos son tóxicos, por lo que deben tomarse las debidas precauciones. Otros son contaminantes y su vertido a la atmósfera puede perjudicar la capa de ozono, por lo que las empresas químicas que los fabrican están diseñando una nueva generación de productos denominados emulsiones.

Las emulsiones son productos de dos fases, el producto activo y el agua en la cual dicho producto viene emulsionado. Antes de aplicar una emulsión suele diluirse nuevamente en agua para facilitar su penetración. La ventaja de las emulsiones es que no son tóxicas ni contaminantes. El inconveniente es que suelen tener una caducidad más corta que el resto de los productos, por lo que deben aplicarse lo antes posible (antes de tres meses) después de su preparación.

El comportamiento del producto polimerizado es similar al resto de los productos con idénticos principios activos. Sin embargo, hasta la actualidad la experimentación de estos productos aplicados a la piedra es escasa.

## 6. HIDROFUGACION

La humedad es un factor de esencial importancia en el proceso de deterioro de los materiales de construcción. Los hidrófugos son productos incoloros utilizados para reducir la absorción de agua a través de la superficie de los materiales, sin afectar sensiblemente a su aspecto.

La hidrofugación, también llamada protección, se basa en la aplicación de un tratamiento que impida la entrada de agua líquida en la piedra pero que permita la salida del agua en forma de vapor, es decir, que mantenga la "respiración" del material. Este tipo de tratamiento debe utilizarse siempre que el agua sea un factor de alteración importante y complementándolo con medidas que impidan la entrada de agua por otros frentes: resane de cornisas, canalizaciones de los desagües de las cubiertas, etc.

Dado que la entrada de agua líquida se produce normalmente por la superficie, la penetración de estos tratamientos no es necesario que sea muy grande, aunque sí es conveniente que no se limite a una capa superficial de poco espesor. La alterabilidad frente a los agentes atmosféricos es muy importante, ya que deben permanecer eficaces en la superficie de la piedra, y sin afectar al aspecto de la misma.

Esta "protección" puede conseguirse por medio de:

- 1) Taponamiento de los poros y capilares; en este grupo podrían incluirse los llamados tratamientos de "impregnación total", cuyo objetivo es rellenar completamente todos los huecos del material. De esta forma, la piedra se conserva impidiendo el desarrollo de mecanismos de alteración. Este procedimiento ha sido utilizado con productos acrílicos y sólo es aplicable a objetos pequeños, en los que, sometiéndolos previamente a vacío puede asegurarse el llenado total de los poros. Este

sistema presenta el inconveniente de que un fallo en una pequeña zona puede permitir que comience la alteración.

2) Creación de una película más o menos adherida a la superficie del material, con productos filmógenos o semifilmógenos, la cual aísla a la piedra de los agentes agresivos presentes en el medio ambiente. Por tratarse de un tratamiento superficial sólo en casos contados se podría lograr el aislamiento de todas las caras del material, de forma que los agentes agresivos tendrían la posibilidad de acceder a su interior con el problema adicional de que no podrían salir. Como en el caso anterior, sólo es aplicable a objetos pequeños, y también un fallo en la película puede tener efectos contraproducentes.

3) Disminución de la energía superficial del soporte; el agua no moja al sustrato al aumentar su ángulo de contacto. Se permite la respiración del material y el intercambio de vapor de agua con el ambiente. Si el agua líquida accede al interior del material por una superficie no tratada puede volver al exterior en forma de vapor.

### 6.1. Características de los hidrófugos

Un tratamiento hidrófugo debe reunir las siguientes características:

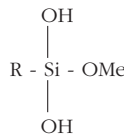
- a) Impermeabilidad al agua líquida.
- b) Permeabilidad al agua vapor, de forma que si el agua consigue penetrar pueda evaporarse de la piedra y el material no permanezca mojado durante mucho tiempo.
- c) Estabilidad frente a los agentes de alteración y frente a la radiación UV.
- d) Reversibilidad o posibilidad de aplicar un nuevo tratamiento encima.
- e) Buena adhesión al material para que no pueda ser eliminado por la lluvia.

f) Suficiente profundidad de penetración.

Para conseguir todo ello, las moléculas hidrófugas deben tener un lado hidrofílico por el que se adhieren a la piedra y un lado hidrofóbico que repela la humedad. De esta manera, se forma una red de moléculas que recubren los granos del material pero sin obturar los poros y capilares.

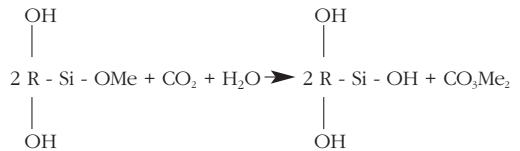
### 6.2. Siliconatos

Son compuestos basados en monómeros del tipo



donde R es un radical alquilo (orgánico) y Me un metal alcalino

La reacción que tiene lugar en la piedra comienza con la hidrólisis



continuando con la polimerización, quedando un radical alquilo unido a cada átomo de silicio.

La polimerización es bastante lenta y sólo se produce bien en materiales muy porosos. Tienen el inconveniente de la formación de carbonatos alcalinos, muy solubles.

### 6.3. Productos organosilícicos

Pertencen al mismo grupo de los vistos como consolidantes. Serían aquellos compuestos basados en monómeros en los cuales existen radicales alquilo.

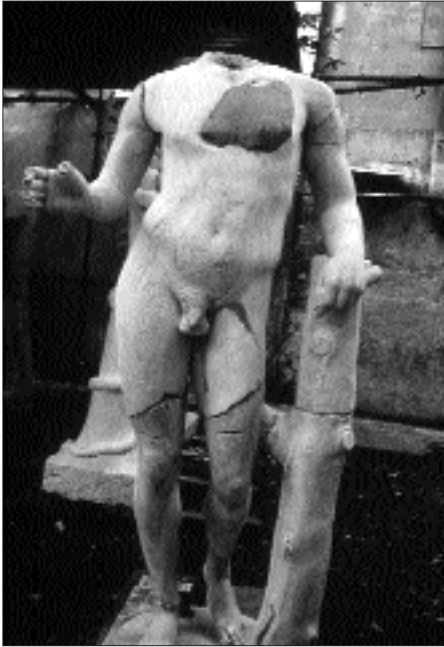


Figura 6. Reposición de material con cemento

#### 6.4. Productos organometálicos

Son sales de ácidos grasos superiores y de iones metálicos, fundamentalmente sodio, potasio, magnesio, cinc y aluminio. Se han utilizado para el tratamiento de edificios modernos, pero su aplicación a monumentos es escasa. El más empleado es el estearato de aluminio. Pueden aplicarse en solución acuosa o en solventes orgánicos, obteniéndose una hidrofugación más marcada en este último caso.

#### 6.5. Polímeros orgánicos

Se trata de los mismos productos utilizados como consolidantes. Los más adecuados para su uso como hidrorrepelentes son aquéllos más estables frente a los agentes de alteración, ya que deben permanecer eficaces especialmente en la superficie.

### 7. SUSTITUCIÓN

Consiste en el cambio de una piedra por otra, de aspecto y características petrofísicas adecuadas al edificio y ambiente donde se va a ubicar. Realizando los estudios petrofísicos necesarios es posible seleccionar los tipos de piedras más adecuados para cada ambiente, o también, dentro de un determinado litotipo, elegir las variedades de mayor durabilidad.

Por ejemplo, muchas rocas sedimentarias, de las utilizadas en el patrimonio arquitectónico español, presentan características intrínsecas diferentes, que las pueden hacer más o menos adecuadas para su uso en una edificación concreta, aunque el aspecto externo sea similar. La selección de las variedades más idóneas en cada caso es una de las finalidades que habrá que plantearse en la etapa de sustitución.

### 8. REINTEGRACIÓN

La finalidad de la reintegración es la recuperación de los volúmenes o de las formas arquitectónicas. Para ello se suele utilizar piedra natural o artificial, morteros, etc. Es una de las etapas que hay



Tabla 3. Productos hidrófugos

DENOMINACIÓN	FABRICANTE	COMPOSICIÓN
Tegosivin HL 100	Goldschmidt	Polisiloxano
Baysilone LV	Bayer	Resina silicónica
Rhodorsil 11309	Rhône-Poulenc	Metil fenil polisiloxano
Fomblin Y Met	Montefluos	Perfluoropoliéter
Fomblin YR	Montefluos	Perfluoropoliéter
ARD REP 56.420	ARD Raccanello	Resina silicona
BS 20	Wacker	Alquilsiliconato potásico
BS 15	Wacker	Metilsiliconato potásico
BS 28	Wacker	
290 L	Wacker	Siloxano oligómero
090 L	Wacker	Alquilalcoxisiloxano oligómero
Silirain-Water		Siliconato potásico
Transkote	Sandtex Ital.	Estearato de aluminio
Cosmolloid	Boissellier & Lawrence	Cera microcristalina



Figura 7. Montaje de piezas con pernos metálicos



Figura 8. Montaje de escultura y reintegración

que acometer en casi todas las intervenciones de conservación, bien sea por criterios estéticos o funcionales. Suele incluirse también en esta etapa el retacado de juntas y relleno de fisuras (algunos manuales lo denominan complementación). El mortero, una vez fraguado, debe ser químicamente estable y con características físico-mecánicas parecidas a las de la piedra que une.

El aspecto final de las fisuras, grietas y juntas, una vez limpias y rellenas, no debe diferir del de la piedra en cuanto a color, brillo y textura. Para ello se recomienda que los áridos de los morteros se obtengan de la misma piedra que la utilizada en la edificación.

## 9. MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN PREVENTIVA

Son actuaciones encaminadas a conseguir una buena eficacia, y duración de los resultados obtenidos en las anteriores etapas (mantenimiento), así como a frenar el ritmo creciente de deterioro de la piedra, especialmente en zonas urbanas e industriales, actuando sobre los agentes que lo generan (conservación preventiva). Estas dos etapas no se contemplan de forma habitual en los programas de conservación de piedra, que suelen estar centrados casi exclusivamente en la intervención directa sobre la piedra (conservación activa). Dado que todos estos tratamientos tienen una vida limitada, hay que considerar toda la secuencia de operaciones como un trabajo de mantenimiento, que debe repetirse después de cierto número de años, tras las oportunas revisiones

En la etapa de mantenimiento debe incluirse la revisión periódica y el control de los factores de alteración relacionados con la fábrica y con la piedra propiamente dicha. Por ejemplo, el control del drenaje del agua en cornisas, terrazas, etc. y de las humedades de la edificación es fundamental.

En cuanto a la conservación preventiva el registro de los parámetros medioambientales y de los contaminantes atmosféricos en el entorno del edificio es uno de los primeros aspectos a tener en cuenta. Es imprescindible un buen diseño en la toma y medida de estos datos, para que puedan correlacionarse posteriormente entre sí y con las lesiones observadas en la piedra.



## BIBLIOGRAFÍA

- Atti del 11 corso di informazione ASSIRCCO Perugia 6-7-8 novembre 1979 La Conservazione dei Monumenti: metodologie di ricerca e tecniche di consolidamento contro il degrado Casa Editrice KAPPA srl. p. 25-40
- CANEVA, G., M.P. NUGARI, O. SALVADORI (1994). La biologia nel Restauro. Nardini, Firenze.
- CANEVA, G., NUGARI M.P.; SALVADORI, O. (1996). Il controllo del degrado biologico. Nardini, Firenze.
- ESBERT, R.M.; ORDAZ, J.; ALONSO, F.J.; MONTOTO, M. Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y ceramicos Col-legi d'Aparelladors y Arquitectes Tècnics de Barcelona, Barcelona 1997 p.67-87.
- LAZZARINI L.; LAURENZI-TABASSO, M. Il restauro della pietra. CEDAN. Ed. Dott. Antonio Milani, 1986.
- LAZZARINI, L. Studi preliminari sui materiali lapidei della Basilica di S. Marco a Venezia. Conservazione dei monumenti, ATI, Firenze, 1974, pp. 77-88.
- LAZZARINI, L. Treatment card of Venecian monuments and sculptures. Preprints of the 3rd. Int. Cong. of Detedoration and Conservation of Stones, Vecencia, 1979.
- LEWIN, S.Z. The preservation of natural stones, 1893-1935, an annotated bibliography. AATA, 1981, Vol. 6, n. 1, pp. 185-272.
- LEWIN, S.Z.; BAER, N.S. Studies in Conservation, 1974, Vol. 19, pp. 24-35.
- LÓPEZ DE AZCONA, M.C. Métodos de aplicación de productos utilizados en obras de restauración: casos prácticos, V Congreso de Geoquímica de España, 1993.
- LÓPEZ, J. Utilización de consolidantes e hidrofugantes en la conservación de la piedra natural. Características técnicas de algunos de los productos más utilizados actualmente. V Cong. de Geoquímica de España, 1993.
- MARCOS, R.M. Valoración de propiedades en rocas carbonatadas cuando se someten a tratamientos de consolidación. V Congreso de Geoquímica de España, 1993.
- MARCOS, R.M. Tratamientos de conservación aplicados a zonas carbonatadas: Catedral de León. (Tesis Doctoral), Area de Petrología y Geoquímica, Dpto. de Geologia. Universidad de Oiiedo, 1992.
- MORA, P.; MORA, L. Metodo per la rimozione di incostrazioni su pletre calcaree e dipinti murali. Ist. di Fisica Tecnica del'Univesitá di Roma, CNR Centro di Studio Cause di Deperimento e Metodi di Conservazione delle Opere d'Arte, pubbl. NO 12, Roma, 1972.
- PAVIA, S.;CARO, S.; PEREZ, F.; LOPEZ, F. Protection of the stone of San Bartotomé church in Logroño (La RiM), Spain. 7th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisboa, 1992. pp. 1335-1340.
- PRICE, C.A. Stone conservation. An Over new of Current Research. The Getty Conservation Institute, 1996.

- REALINI, M. y TONIOLO, L. (Eds.). 'The oxalate films in the conservation of works of art. Centro CNR "Gino Bozza", Editearn, Milán, 1996.
- ROSSI MANARESSI, R. Stone protection from antiquity to the beginning of the industrial revolution. *Science and Technology for Cultural Heritage*, 1993, Vol. 2, pp. 149-159.
- RUIZ-VILLAR, L. Criterios y problemática de la selección y uso de consolidantes e hidrofugantes. V Cong. de Geoquímica de España, 1993, 3 p.
- RUIZ-VILLAR, L. La presencia del color. Catálogo técnico divulgativo de la restauración de la fachada de Sto. Domingo de Soña (Coresal), Junta de Castilla y León, 1994.p. 114
- SAMEÑO PUERTO, M.; VILLEGAS SÁNCHEZ, R.; GARCÍA ROWE, J. (1996). Estudio de la interacción de los biocidas con los materiales pétreos del yacimiento del cerro de la plaza de armas de Puente Tablas (Jaén). III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Granada
- SCHNABEL, L. (1991). The treatment of biological growths on stone: A conservator's viewpoint. *International Biodeterioration*: Vol. 28, 125-131. *Biodeterioration of Cultural Property* (Ed. Robert J. Koestler). Elsevier, London and New York
- VAILLANT CALLOL, M. Y N. VALENTÍN RODRIGO (1996). Principios básicos de la Conservación Documental y Causas de su Deterioro. Ministerio de Educación y Cultura. Instituto de Patrimonio Histórico Español,
- VALENTÍN, N. (1994). Comparative Analysis of Insect Control by Nitrogen, Argon and Carbon Dioxide in Museum, Archive and Herbarium Collections. *International Biodeterioration & Biodegradation* 32. Elsevier, Science Limited, England, pp. 263-278.
- VILLEGAS, R; VALE,J.F. Evaluation of the behaviour of water repellent treatment for stone. 7th int. cong. on Deterioration and conservation of stone, Lisboa, 1992 pp. 123-1263.
- VILLEGAS, R. Estudio de la alterabilidad y respuesta a tratamientos de conservación de los principales tipos de piedra utilizados en Catedrales andaluzas. Tesis Doctoral. Univ. Sevilla. 1989.
- VILLEGAS, R. Efecto de la contaminación atmosférica sobre los materiales pétreos. La alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla. Estudio de tratamientos de conservación. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Univ. Sevilla. 1985.
- VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; VALE, J. F. ; MARTÍN, A. Diagnóstico y tratamiento de la piedra. I. La alteración de la piedra en monumentos. II. Consolidantes e hidrófugos. Productos para el tratamiento de materiales pétreos. I. C. Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Monografía n1 400. Madrid. 1990,

# Metodología para la evaluación y estudio previo de tratamientos

Rosario Villegas Sánchez  
Departamento de Análisis. IAPH. Sevilla

## 1. INTRODUCCIÓN

Toda obra del Patrimonio Histórico está sometida a la acción de una serie de agentes externos, que determinan su evolución a lo largo del tiempo. Estos agentes son los conocidos como factores extrínsecos de alteración, ya que condicionan en gran medida las transformaciones que sufren los materiales que constituyen la obra. La propia estructura y los materiales de la pieza conforman los factores intrínsecos de alteración, ya que sus características definen su evolución natural.

Cualquier material que se introduzca en la obra o cualquier actuación que se realice sobre ella en una intervención de restauración va a modificar su relación con el ambiente, de forma que su comportamiento futuro puede verse alterado. Cuando se interviene una pieza el objetivo es lograr que su comportamiento mejore, es decir, que su alterabilidad disminuya, pero puede darse el caso de que se consiga el efecto contrario.

Cuando se aplican tratamientos experimentados a materiales cuya respuesta antes los factores extrínsecos también se conoce, se puede garantizar que el objetivo antes mencionado se conseguirá. En los casos en que se van a utilizar técnicas o productos nuevos para materiales de los que no se poseen datos, es conveniente llevar a cabo una investigación previa para poder determinar, al menos de forma cualitativa, cuál será su evolución en el futuro. Con mayor motivo debe realizarse este tipo de estudios cuando, durante la intervención, se aplican diferentes tratamientos que inciden sobre la misma obra.

En el caso de los bienes inmuebles o arqueológicos aparecen dos circunstancias que hacen necesario el estudio previo de los tratamientos. En primer lugar, las condiciones externas que afectan a cada obra son muy diferentes, tanto climáticas, como de uso, de contaminación atmosférica, etc., por lo que los factores de alteración presentes van a ser muy diferentes en cada caso. En segundo lugar, los materiales empleados, especialmente la piedra, varían de un edificio a otro, de forma que su estado de conservación va a ser totalmente distinto.

Adicionalmente se encuentra otro “problema”, que es el gran número de productos de tratamiento que se fabrican y comercializan y sobre los cuales hay muy poca experiencia en cuanto a los resultados que proporcionan a medio plazo.

Es decir, coinciden dos hechos, el entorno y el material, que varían por completo de un caso a otro. Esto hace que un tratamiento pueda comportarse de distinta forma cuando se utilice en obras diferentes tanto por el sustrato al que se aplica (la piedra) como por los agentes de alteración que actúan. Ello pone de manifiesto la necesidad de recurrir a la evaluación previa de estos tratamientos.

En este capítulo se va a presentar la metodología que puede aplicarse para realizar el estudio previo de distintos tipos de tratamientos: limpieza y extracción de sales, biocidas, consolidantes e hidrófugos. Esta metodología se ha puesto a punto en el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico aplicándola en diversos proyectos, y es muy semejante a la que se emplea en otros organismos (ICR, Normal).

## 2. EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS

### 2.1. Metodología general

La metodología general a aplicar para determinar la idoneidad de cualquier tipo de técnica y producto de tratamiento es independiente del tipo de obra que se esté estudiando, y debe centrarse en evaluar los siguientes aspectos:

- Compatibilidad de los productos y técnicas empleados con los materiales originales de la obra o con otros productos o técnicas de tratamiento que se vayan a utilizar.
- Eficacia del tratamiento, es decir, que con él se consiga el fin que se persigue.
- Resistencia a los agentes de alteración que actuarán sobre la obra una vez restaurada.

En general, los métodos y técnicas de análisis y ensayo que podrían utilizarse para determinar estos tres puntos son los mismos que sirven para medir las diferentes características del material, si bien enfocados desde otro punto de vista. Tan sólo hay un grupo de técnicas cuya finalidad principal es determinar la alterabilidad de las muestras, que son los ensayos de alteración acelerada.

El estudio de estos tres aspectos se lleva a la práctica de la siguiente forma:

- Aplicación del tratamiento a probetas adecuadamente preparadas, de características semejantes a las de la obra a tratar (materiales, uniones, estado de conservación, etc.).
- Estudio de la compatibilidad con los materiales originales: se determinan una serie de propiedades del material que pueden verse modificadas con la aplicación del tratamiento (propiedades físicas, mecánicas, textura, color, etc.) y se decide si esas modificaciones son aceptables o no.
- Estudio de la compatibilidad de unos tratamientos con otros: normalmente se aplican varios tratamientos al mismo material, especialmente de limpieza y biocidas y posteriormente de consolidación y/o hidrofugación. Aunque los primeros se eliminan tras su

empleo, debería estudiarse el efecto de esta aplicación sucesiva de productos, tratando de la misma manera las probetas.

- Evaluación de la eficacia del tratamiento: en función del tipo de tratamiento, se determinarán distintas características que se pretendan mejorar. Para la limpieza o la extracción de sales solubles, su eficacia se podrá medir, por ejemplo, analizando la superficie para determinar la presencia de los componentes de la costra o de dichas sales. Del efecto de los consolidantes son significativas las propiedades mecánicas, que pueden medirse directa o indirectamente. En el caso de los hidrófugos, se determinarán las propiedades relacionadas con la absorción de agua. Por último, en la aplicación de biocidas, se cuantificará la cantidad de organismos que se eliminen o el tiempo necesario para conseguir un efecto determinado.
- Determinación de la resistencia a los agentes de alteración: se someten las probetas ya tratadas a ensayos que reproduzcan el efecto de los agentes y mecanismos de alteración que actúen sobre la obra. Normalmente se efectúan ensayos de alteración acelerada, para obtener resultados en plazos cortos.

### 2.2. Aplicación del tratamiento

Antes de proceder a la evaluación de los tratamientos estrictamente hablando, una etapa muy importante es la preparación de las muestras, de la que puede obtenerse información muy útil para programar la aplicación a la obra.

Dado que la piedra es un material normalmente heterogéneo, si se quiere obtener resultados significativos es necesario utilizar un número relativamente alto de probetas, de distintas formas y dimensiones, que normalmente es difícil obtener del edificio; en ocasiones es posible encontrar restos de intervenciones anteriores en las que se hayan sustituido bloques o piezas, pero casi siempre deberá recurrirse a material de la cantera o de una formación geológica semejante.

Las probetas que normalmente se utilizan son paralelepípedos o cilindros de dimensiones muy

variadas; las más frecuentemente empleadas son las cúbicas y, entre ellas, las de 5 cm de arista.

Cuando se usan muestras de cantera debe de tenerse en cuenta que el estado de la piedra es muy diferente del que presenta la del monumento. Por ello, las probetas de cantera deberían prepararse previamente para conseguir que su estado sea lo más parecido posible al del edificio, sometiéndolas a ensayos de alteración acelerada. Sin embargo, como la evaluación del comportamiento de los productos se realiza normalmente de forma comparativa y dada la gran duración de los ensayos de alteración acelerada, se opta habitualmente por utilizar dichas probetas sin ningún tipo de acondicionamiento previo.

Antes de proceder a la aplicación de los tratamientos a las probetas, es conveniente que se elimine el material que se haya depositado superficialmente durante el corte y se seque el agua absorbida. El secado puede llevarse a cabo en estufa, con lo cual es total, o al aire, de forma que quede un pequeño contenido de humedad; esta segunda opción reproduce mejor el estado del material en el edificio.

Las probetas deben caracterizarse previamente a la realización de los tratamientos, para determinar cómo se modifican sus propiedades tras dicha aplicación. En función del tratamiento se medirán diferentes características: propiedades mecánicas, hídricas, color, adherencia, etc.

La aplicación de los tratamientos de limpieza y de extracción de sales puede llevarse a cabo in situ en pequeñas zonas de muestra, cuando el objetivo es determinar su eficacia y las mejores condiciones de utilización. De estos testigos se extraerán las muestras oportunas para evaluar el resultado de la limpieza. Para estudiar la compatibilidad con el material o con los tratamientos posteriores o bien la alterabilidad futura de la piedra, la aplicación puede efectuarse en probetas que se someterán después a diversos ensayos.

Las mismas consideraciones pueden hacerse acerca de la aplicación de los tratamientos biocidas, tanto para eliminar plantas superiores como musgos, líquenes o algas.

En el caso de estos tratamientos puede ser necesario llevar a cabo un lavado con agua

para eliminar los restos de producto, tanto si se van a estudiar solos como en combinación con tratamientos posteriores de consolidación o protección.

Los tratamientos consolidantes e hidrofugantes pueden aplicarse a las probetas por todas o alguna(s) cara(s), impregnando el material completamente o sólo hasta cierta profundidad. La aplicación puede realizarse de diversas formas: por absorción capilar de las probetas; por inmersión de las probetas en el producto; por pulverización o con brocha, que serían los métodos más semejantes a los usados en la intervención en el edificio.

En algunos casos puede interesar que la impregnación sea parcial, para observar el efecto de la interfase piedra tratada/sin tratar, que suele ser donde se manifiestan con más intensidad algunos mecanismos de alteración.

Durante la aplicación de un tratamiento a las probetas pueden medirse datos útiles para la intervención en la obra: consumo unitario de producto, tiempo de aplicación, secado o curado, condiciones ambientales (temperatura y humedad) más favorables, activación del tratamiento con algún tipo de energía (calor o radiación), etc.

Tras la aplicación de consolidantes o hidrófugos debe dejarse el tiempo suficiente para el secado de los tratamientos, con objeto de que tenga lugar la evaporación del disolvente y la polimerización del producto activo, cuando se empleen tratamientos en forma de monómeros u oligómeros. La duración de esta etapa depende en parte de la volatilidad del disolvente que se emplee, la cual no debe ser excesiva para que el producto activo tenga tiempo de precipitar y fijarse sobre los granos de la piedra y no retorne hacia la superficie. El curado puede realizarse en condiciones de temperatura y humedad relativa controladas y constantes, de forma que se pueda reproducir el proceso, o simplemente en un recinto con ventilación para eliminar los productos que se vayan evaporando. Es conveniente que la temperatura no sea muy elevada para que el secado no sea excesivamente rápido.

El control de este proceso se realiza siguiendo la evolución del peso de las probetas; los pro-



ductos que se aplican en forma de monómeros tardan como mínimo 15 días en curarse y bastante menos, unos 5 días, los que se utilizan como polímeros. Hay que tener en cuenta también que estos datos pueden variar bastante en función de la volatilidad del disolvente que se emplee.

Después de finalizada la aplicación de los tratamientos se pueden estudiar diversas características de las probetas, que proporcionan información sobre lo que ocurrirá en la aplicación real y sobre el comportamiento futuro del material; entre ellas las más interesantes serían:

- textura y características de la superficie del material después de la limpieza o aplicación de biocidas
- profundidad de penetración de consolidantes o hidrófugos
- incremento de peso de la probetas en estos casos
- morfología de la película del producto depositado sobre la piedra.

La superficie del material puede alterarse después de la aplicación de un tratamiento de limpieza, ya sea por efectos mecánicos (en tratamientos abrasivos), térmicos (por el uso de láser), por disolución o hidratación de los componentes de la piedra (cuando se utiliza agua), o por reacción química (en limpiezas con productos químicos). Estos cambios pueden estudiarse por técnicas microscópicas, especialmente electrónica de barrido, que puede combinarse con el microanálisis por EDX para determinar las posibles reacciones químicas. En el caso de los tratamientos biocidas podrían producirse cambios por causas semejantes.

La profundidad de penetración de un tratamiento consolidante o hidrófugo se determina cortando las probetas por su zona media y estudiándola después con diversos métodos: microscopía electrónica, calcinación de la probeta, absorción de agua, etc. Este dato puede servir para determinar varios factores: la idoneidad del disolvente utilizado (si es muy volátil el producto penetrará poco), la concentración de la disolución (si es muy alta en relación

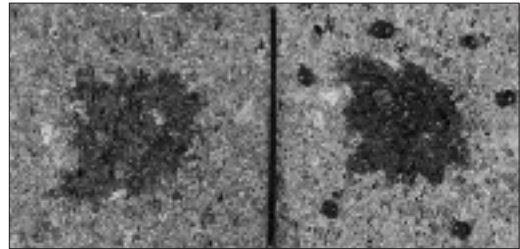
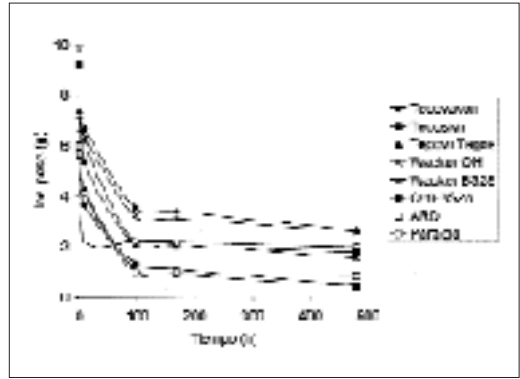


Figura 1. Secado de los tratamientos, probetas de Guadix

Figura 2. Penetración de tratamiento, probeta de Loja

a la porosidad de la piedra la penetración será baja), o el tiempo de contacto entre el tratamiento y el soporte (penetración más baja cuanto menor sea el tiempo de contacto). Todos estos datos son útiles para definir la técnica de aplicación. En ocasiones puede ser conveniente utilizar el tratamiento diluido y aplicarlo varias veces hasta conseguir la profundidad deseada.

El incremento de peso de las probetas tras el tratamiento está relacionado por una parte con la porosidad de las mismas y por otra con las características del producto: contenido de materia activa y forma en que se encuentra ésta, monómero, oligómero o polímero.

La morfología de la película de producto se estudia al SEM. Un producto de tratamiento, ya sea hidrófugo o consolidante, debe formar una película que recubra los granos constituyentes de la piedra de la forma más continua posible, pero sin obtener por completo los poros y capilares, ya que impediría la "respiración" del material. También es posible observar si la película de producto presenta fisuras o grietas, o si se forman poros en ella, todo lo cual contribuiría a disminuir su efectividad, ya que quedarían abiertos caminos para que los agentes de alteración llegasen hasta los granos de la piedra.

### 2.3. Compatibilidad con el material: modificación de las características

El primer paso en la evaluación de los tratamientos, propiamente dicha, sería determinar cómo se modifican algunas características intrínsecas del material.

El color y el aspecto superficial de la piedra pueden verse modificados al cambiar la forma en que se refleja la luz. Este cambio puede cuantificarse de forma instrumental, por ejemplo, con un colorímetro o un espectrofotómetro UV-Vis con el dispositivo adecuado para medir en muestras sólidas, y también puede hacerse con ayuda de alguna carta de patrones de color, por ejemplo, la carta Munsell para medida de colores de suelos.

Esta característica puede variar con cualquiera de los tratamientos mencionados. Con los tratamientos de limpieza o biocidas, los cambios se deberán, fundamentalmente, a la eliminación de la suciedad (costras depósitos, eflorescencias, etc.) o de los organismos existentes en la superficie, aunque también pueden producirse variaciones debido a posibles interacciones (reacciones químicas, disolución, reprecipitación, deposición de algún componente, etc.) de los productos empleados con la piedra. La medida del color puede utilizarse tanto para valorar el grado de limpieza o de eliminación de organis-

Tabla 1. Color (coordenadas CIE) Probetas de Guadix

Tratamiento	Y	x	y
Sin tratar	37.06	0.3554	0.3662
Tegovakon	37.48	0.3518	0.3627
Tegosivin HL100	36.11	0.3545	0.3648
Consolidante OH	40.20	0.3475	0.3615
BS 28	37.06	0.3532	0.3647
ARD 55050	32.04	0.3563	0.3676
Paraloid B72	26.31	0.3659	0.3707

mos de la superficie como para identificar posibles reacciones superficiales.

Con los tratamientos de consolidación o hidrofugación el cambio se debe a la permanencia del producto en el interior de la piedra, lo cual normalmente se traduce en oscurecimiento y aparición de brillo. Estos cambios generalmente se atenúan rápidamente con el tiempo.

La colorimetría puede aplicarse tanto para llevar a cabo el seguimiento del color a lo largo del tiempo en los tratamientos aplicados in situ, como para estudiar los cambios que sufren las probetas tratadas tras la realización de los diferentes ensayos.

Otras propiedades que pueden proporcionar una información importante son las físicas: porosidad, porometría, superficie específica, permeabilidad a gases y vapores.

Las variaciones más importantes se producirán por la aplicación de tratamientos consolidantes o hidrófugos, ya que su aplicación implica la introducción de una sustancia que va a permanecer en los poros de la piedra y que, además, interactúa de forma diferente con el agua y los gases atmosféricos.

Normalmente la variación de porosidad del material está directamente relacionada con la cantidad de producto que permanece en el mismo y depende de la porosidad original de la pie-

dra y de las características del tratamiento. Más importante que esta variación es la que sufre la distribución de tamaños de poros; los poros por debajo de  $1\ \mu\text{m}$  (microporos) son los más susceptibles a la alteración por mecanismos de cristalización de sales o heladicidad, por lo que si un tratamiento llena parcialmente los poros grandes y los convierte en microporos, posiblemente aumentará la alterabilidad del material.

La superficie específica es un índice del área expuesta al ambiente y se puede obtener a partir de los datos de tamaños de poros. Si se produce una disminución acusada indica que el tratamiento ha rellenado los poros, lo cual afectará a la capacidad de respiración del material.

La modificación de la higroscopicidad y la permeabilidad está en parte relacionada con la variación en la porosidad y porometría, pero también depende de las características superficiales de los productos que se depositan en el interior de la piedra. Si la permeabilidad o la absorción de humedad por higroscopicidad de la zona tratada se ve alterada significativamente respecto del valor original se pueden producir acumulaciones de humedad y sales en la interfase, con los consiguientes problemas de alteración por separación de placas.

La velocidad de evaporación de agua es una de las características hídricas más importantes,

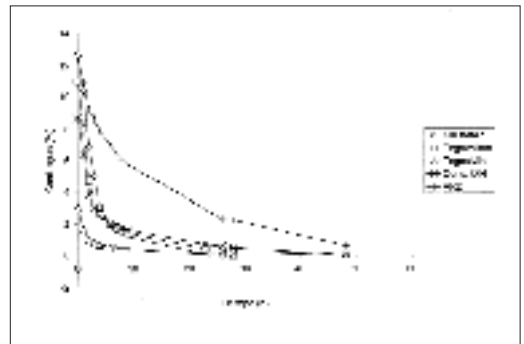
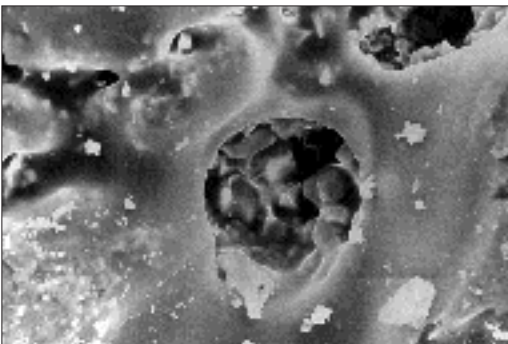


Figura 3. Tratamiento acrílico visto al SEM

Figura 4. Desorción de agua, probetas de Carmona

no sólo en el caso de productos hidrófugos sino también para los consolidantes. Esta medida se lleva a cabo con las probetas saturadas de agua, lo cual, en el caso de las probetas tratadas, debe realizarse por absorción a vacío. Las probetas se colocan en atmósfera con temperatura y humedad relativa controladas y se pesan periódicamente hasta peso constante. Durante el secado de un material como la piedra se observan dos fases. En la primera, al estar la probeta saturada de agua, ésta puede moverse en el interior del sistema poroso de la piedra en forma líquida y la evaporación se produce desde el agua líquida que llega a la superficie de la piedra; de esta forma, la velocidad de secado es constante y característica de cada tipo de piedra. Cuando el contenido de agua es menor de cierto valor, se producen discontinuidades en la película líquida y la salida del agua tiene lugar como vapor desde el interior de la probeta; éste es el contenido de agua crítico, característico de cada material. A partir de este momento, la velocidad de secado se hace mucho más baja.

Por tanto, en este ensayo se determinan dos características muy importantes: la velocidad de secado inicial y el contenido crítico de agua. Los tratamientos pueden modificar (normalmente disminuir) la velocidad de secado - con lo cual el material permanece húmedo más tiempo - y también el contenido crítico (normalmente aumentarlo) - con lo que la piedra queda con un contenido residual de humedad más elevado - favoreciéndose todos los mecanismos de alteración relacionados con la presencia de agua.

Todas estas propiedades físicas también se pueden ver modificadas, si bien en una zona más superficial, por la realización de tratamientos de limpieza o de extracción de sales. En este caso se podría deber a la disolución y/o recristalización de algunos constituyentes de la piedra o de los morteros adyacentes, o incluso de las sales solubles presentes en el interior de los poros. Algunos productos de limpieza, prácticamente ya en desuso, dejan sales solubles en el interior de la piedra por lo que, además de otros efectos indeseables, también contribuirían a modificar sus características.

#### 2.4. Eficacia del tratamiento

La eficacia de cualquier tipo de tratamiento se determinará a través de la medida de alguna característica que sea significativa del objetivo que se quiere conseguir.

Por otro lado, también debe tenerse en cuenta que el comportamiento de un determinado tratamiento puede variar en función de las condiciones ambientales que se hayan dado durante el tiempo de aplicación. Por lo tanto, se puede aprovechar esta fase del estudio para determinar las condiciones de aplicación más adecuadas: condiciones de temperatura y humedad ambientales, aplicación de radiación, estado del soporte (seco o con contenido de humedad en equilibrio con el aire), presencia de sales solubles, existencia de fisuras macroscópicas, etc. Por ejemplo, algunos tratamientos, como los organosilícicos, necesitan una pequeña cantidad de agua para polimerizar; los consolidantes no son capaces de rellenar fisuras grandes, los tramientos de limpieza con papetas deben aplicarse a temperaturas no muy elevadas para mantener la humedad más tiempo, etc.

La eficacia de un tratamiento de limpieza o de extracción de sales ha de determinarse mediante medidas en puntos de ensayo en el edificio. Después de finalizado el tratamiento en todas sus fases (cuando sea necesario un lavado final con agua, o la eliminación de los restos de suciedad por medios mecánicos, etc.) se tomarán muestras que se analizarán o estudiarán para determinar el grado de eliminación de los productos extraños a la piedra: sulfatos, oxalatos, sales solubles, restos orgánicos, etc. Para comparar distintos tratamientos se podrá realizar un análisis cuantitativo de la capa superficial.

Para los tratamientos biocidas la eficacia puede determinarse también por métodos analíticos, por ejemplo, para zonas con algas puede cuantificarse la cantidad de biomasa presente, o bien por inspección visual o con instrumentos de aumento, midiendo las superficies que quedan libres de líquenes, musgos, plantas, etc. También pueden estudiarse muestras con ayuda de la microscopía óptica o electrónica, observando así el efecto de los tratamientos a distintas profundidades.

La aplicación de los productos hidrófugos proteger el material de la acción del principal factor de alteración, el agua; para ello se debe disminuir la entrada de agua líquida a través de la superficie tratada, pero procurando que la salida de agua en forma de vapor no se vea afectada significativamente, para que la humedad que pueda penetrar por otras zonas no se acumule en el interior del material. Para medir la eficacia de este tipo de tratamientos se recurre, por tanto, a la determinación de las propiedades relacionadas con el movimiento de agua, fundamentalmente la absorción.

La absorción de agua puede medirse por inmersión (a presión atmosférica, a vacío, a presión, a ebullición) o por capilaridad. El peso de las probetas se controla periódicamente hasta alcanzar valor constante, o bien se fija previamente una duración del ensayo. A partir de los datos del ensayo se calculan los coeficientes de absorción (capilar, por inmersión) y los contenidos de agua máximos.

Otras medidas relacionadas son la velocidad de absorción de gotas y el ángulo de contacto agua-piedra, que informan sobre la hidrofugación superficial. Cuanto mayor sea el ángulo de contacto más tiempo tardará el agua en penetrar en el material.

La aplicación de un consolidante tiene como finalidad devolver o aumentar la cohesión del

material. Por ello su eficacia deberá evaluarse viendo cómo se modifican las características mecánicas del mismo.

Las propiedades mecánicas globales pueden medirse por métodos directos o por métodos indirectos. Las principales medidas directas son la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión. Sin embargo, estos ensayos no son de empleo muy general por su carácter destructivo y por requerir probetas relativamente grande y en número elevado.

Los ensayos indirectos serían fundamentalmente la velocidad de propagación del sonido y la medida del módulo de resonancia. La velocidad del sonido es tanto más elevada cuanto mejor sea la calidad mecánica del material, de forma que los tratamientos deben provocar un aumento en dicho valor. Esta determinación tiene la ventaja de que puede llevarse a cabo in situ.

Otro tipo de propiedades mecánicas que pueden proporcionar información sobre el comportamiento de los tratamientos consolidantes son las propiedades mecánicas superficiales. Se puede considerar que esta información es más significativa del efecto del tratamiento, ya que la zona impregnada se reduce, incluso en el mejor caso, a pocos centímetros. Las más empleadas serían: dureza al rayado, dureza a la abrasión, dureza a

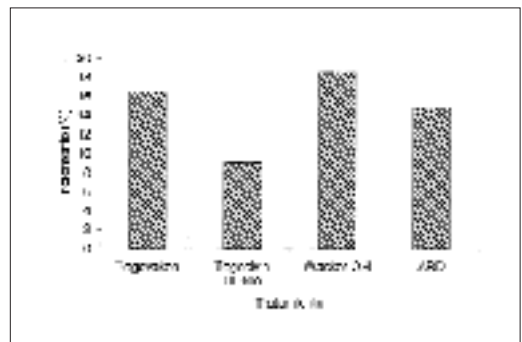
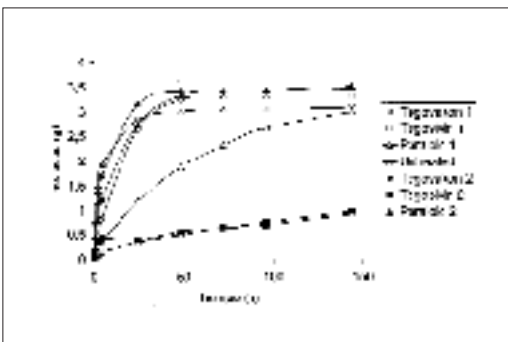


Figura 5. Absorción por inmersión, arenisca Constantina. 1 antes, 2 después ensayo heladicidad  
 Figura 6. Incremento de dureza superficial. probetas de Carmona

la penetración estática o dinámica. Esta última puede medirse in situ, por ejemplo, con un esclerómetro.

### 2.5. Resistencia a los agentes de deterioro: ensayos de alteración acelerada

Una vez tratadas las probetas y medidas todas sus características, el siguiente paso sería determinar la resistencia a la alteración de la piedra tratada, sometiendo las probetas a ensayos de alteración, eligiendo aquéllos que mejor reproduzcan las condiciones reales de exposición y los mecanismos de alteración que tengan lugar en el caso que se estudie.

Existen pocas referencias sobre ensayos a la intemperie con piedras, debido a su larga duración por la lenta alteración de estos materiales. En la mayoría de los casos, los ensayos a la intemperie se realizan fundamentalmente para realizar el seguimiento del comportamiento de tratamientos aplicados sobre probetas o elementos preparados a propósito. Normalmente el grado de alteración alcanzado es pequeño, y numerosos tratamientos no pierden sus características.

De ello se deduce la necesidad de realizar ensayos de alteración acelerada para acortar la escala del tiempo. Los ensayos acelerados se basan en una acción violenta y concentrada en el tiempo de los principales factores de alteración.

Uno de los inconvenientes que se les atribuyen a los ensayos que se indican a continuación es que son demasiado simplificados y sólo consideran el efecto de un único factor de alteración, sin tener en cuenta que pueden existir efectos sinérgicos entre las distintas variables. Por ello no existen garantías de que actúen los mismos mecanismos de alteración y de que se puedan comparar sus resultados con los obtenidos en la exposición real. Para paliar esto, numerosos autores recurren a la realización de combinaciones de ensayos, que, normalmente, consisten en ciclos en los que se van alternando los distintos factores de alteración.

Existen cinco tipos básicos de ensayos acelerados:

- Heladicidad
- Cristalización de sales

- Ciclos termohigrométricos
- Ensayos de radiación UV
- Ataque químico con soluciones o atmósferas contaminadas

El IAPH, a través de su Programa de Normalización de Estudios Previos, ha publicado ensayos recomendados de cada uno de los tipos indicados.

### Heladicidad

Los objetivos del ensayo de heladicidad son reproducir el clima al que está sometido el material, o crear condiciones más severas, para obtener resultados en un menor intervalo de tiempo y, de esta forma, estudiar los daños originados por el hielo.

Este tipo de ensayos consiste, en líneas generales, en una serie de ciclos que incluyen una fase de hielo y otra de deshielo; en la primera, que generalmente se lleva a cabo al aire, la muestra saturada de agua se somete durante unas horas a temperaturas del orden de  $-15^{\circ}$  a  $-25^{\circ}$  C. La fase de deshielo puede tener lugar bien en aire, bien en agua y la temperatura varía entre  $1^{\circ}$  C y temperatura ambiente.

Para evaluar los resultados se efectúan diversas medidas, siendo las más frecuentes la pérdida de peso y la observación, a simple vista o con microscopio, de la aparición de fisuras o grietas. También pueden determinarse las propiedades físicas, hídricas y mecánicas y determinar las variaciones sufridas.

### Cristalización de sales

Este ensayo tiene como objetivo simular las tensiones que se producen en el interior de los poros del material cuando cristalizan o se hidratan sales; ambos hechos implican un aumento de volumen considerable, de forma que puede llegarse a la ruptura del material.

El fundamento de este ensayo consiste en inducir sucesivamente la solubilización y cristalización de una sal determinada en el interior de las muestras. Esto se logra sometiendo las muestras a una fase de impregnación de la sal y a otra

posterior de secado, repitiéndose este ciclo un determinado número de veces.

La sal más frecuentemente utilizada es el sulfato sódico ( $\text{SO}_4\text{Na}_2$ ), pero también lo son cloruro sódico ( $\text{ClNa}$ ), sulfato cálcico ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), sulfato magnésico ( $\text{SO}_4\text{Mg}$ ), sulfato amónico ( $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$ ), bisulfato amónico ( $\text{SO}_4\text{HNNH}_4$ ), etc. Todos los sulfatos pueden cristalizar con distinto número de moléculas de agua. En especial el sulfato sódico puede cristalizar hasta con 10 moléculas de agua por cada molécula de sal ( $\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ), con lo que se produce un aumento de volumen del 308% con respecto a la sal anhidra, por lo que está particularmente indicado para simular las tensiones que se crean en el interior de la piedra como consecuencia de la cristalización e hidratación de sales.

La concentración de las soluciones no influye en la severidad del ensayo. Las concentraciones más frecuentes son el 10% y el 14%. La temperatura de la solución es una variable importante, ya que a temperatura baja se produce la cristalización del sulfato sódico en forma hidratada y el consiguiente aumento de volumen acelera la desintegración de las probetas. La impregnación con la solución salina puede efectuarse por inmersión, capilaridad o niebla salina.

La fase de secado se realiza a 651 o 1051C. Con 651C existe el problema de que aumenta el tiempo necesario para lograr un secado completo y es difícil conseguir que la duración del ciclo sea igual o inferior a un día; por otra parte, cuando se estudian muestras con tratamientos orgánicos, la adopción de temperaturas elevadas puede degradarlos. Es posible acelerar el proceso utilizando vacío. Conseguir una eliminación total del agua de la muestra es primordial, ya que afecta a los resultados relativos. La fase de secado incluye enfriamiento en desecador antes de abordar el siguiente ciclo.

La evaluación del ensayo suele hacerse por examen visual de las alteraciones, comprobación de la pérdida de peso y de la variación de porosidad o porometría. También pueden medirse las propiedades hídricas y mecánicas y determinar las variaciones sufridas.

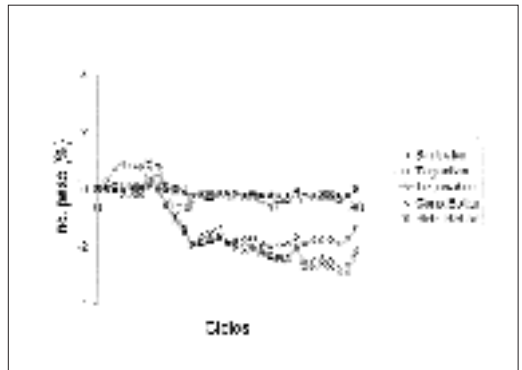
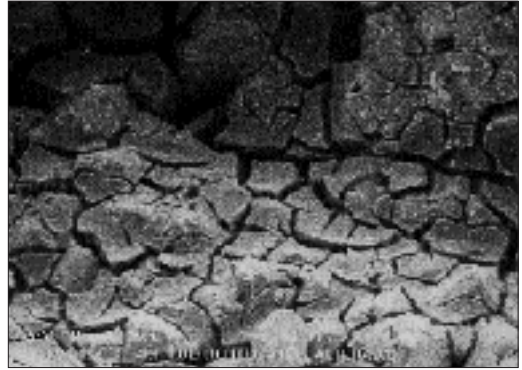


Figura 7. Superficie de probeta tratada tras ensayo de heladicidad, SEM

Figura 8. Ensayo de cristalización de sales, probetas de Huelva

Figura 9. Probeta de Guadix tras ensayo de cristalización de sales



## Ciclos termohigrométricos

Los ensayos termohigrométricos estudian los efectos que las variaciones de temperatura y humedad tienen en los materiales pétreos.

Las condiciones de humedad se pueden lograr fundamentalmente de tres formas:

- Por exposición a una atmósfera con humedad relativa elevada (cerca de la saturación) lo cual se consigue normalmente utilizando una cámara climática.
- Por inmersión en agua normalmente a temperatura ambiente.
- Con niebla, manteniendo las proximidades de la muestra y ésta misma a una temperatura inferior a la del resto del ambiente, para provocar condensaciones.

Normalmente se establecen ciclos con condiciones variables que tengan la duración suficiente para que la muestra llegue al equilibrio. Estos ensayos, muy poco severos y por tanto de gran duración, son aplicables sólo a la evaluación de tratamientos, ya que la gran mayoría de las piedras prácticamente no se alteran en estas condiciones.

Normalmente no se producen alteraciones macroscópicas, por lo que para evaluar los resultados debe recurrirse a determinar las propiedades físicas, hídricas y mecánicas y ver las variaciones sufridas.

## Ensayos de radiación UV

Los ensayos de radiación están orientados a determinar el efecto de la radiación UV sobre los materiales, especialmente los tratamientos de tipo orgánico. La radiación utilizada es exclusivamente la ultravioleta, con energía suficiente para alterar sólo determinados enlaces químicos presentes en los compuestos orgánicos; los compuestos inorgánicos componentes de las rocas no se ven afectados por esta radiación.

En numerosos casos el ensayo consiste sólo en someter las muestras a radiación UV durante períodos prolongados de tiempo, oscilando desde pocos días hasta un mes. En algunas ocasio-

nes se combina el efecto de la radiación con los ciclos termohigrométricos.

La evaluación de los resultados se realiza determinando las variaciones en las propiedades de las muestras, ya que no aparecen alteraciones macroscópicas.

## Ataque químico. Ensayos en atmósferas simuladas

Es bien conocida la importancia de la contaminación atmosférica en la alteración de los materiales pétreos, con efectos que vienen a sumarse a los de los agentes meteorológicos, multiplicando enormemente la velocidad de deterioro. Los contaminantes más peligrosos desde este punto de vista son gases ácidos capaces de reaccionar con los componentes de la piedra.

Inicialmente la investigación se centró casi exclusivamente en el anhídrido sulfuroso que, bien en la atmósfera, bien sobre la piedra, puede transformarse en ácidos sulfuroso o sulfúrico, que reaccionan con el carbonato cálcico. Sin embargo, más recientemente se han llevado a cabo algunas experiencias en las que se estudia el efecto de otros contaminantes (como los óxidos y ácidos del nitrógeno y otros). El efecto de estos compuestos sobre la piedra es el que se intenta reproducir por medio de este tipo de ensayos.

Una primera aproximación para reproducir en el laboratorio los mecanismos implicados en estas reacciones consiste en simular el ataque químico con soluciones, que contienen en la mayoría de los casos ácido sulfúrico en distintas concentraciones. El contacto entre la solución ácida y las muestras puede conseguirse por inmersión o capilaridad, produciéndose un ataque muy activo. Sin considerar el grado de severidad del ataque, está claro que los mecanismos de reacción en fase líquida serán diferentes a los que tienen lugar en fase gaseosa.

Una mayor aproximación a los mecanismos reales se consigue con la utilización de niebla o lluvia ácidas, normalmente de ácido sulfúrico, en otras ocasiones acompañado de otros compuestos: cloruro sódico, ácido nítrico.

Evidentemente, los ensayos en atmósferas contaminadas están más próximos a la realidad



que el ataque con soluciones. La mayoría de los ensayos de los que se tienen referencias usan atmósferas contaminadas con anhídrido sulfuroso, aunque en pocos casos se introducen otros contaminantes: ácido fluorhídrico, óxidos de nitrógeno o hidrocarburos, amoníaco, ácido nítrico. Las concentraciones de anhídrido sulfuroso utilizadas oscilan entre pocas partes por millón hasta 10.000, en función del grado de aceleración deseado.

La humedad de las muestras es un factor decisivo en los mecanismos y velocidades de alteración con anhídrido sulfuroso. La mayoría de los ensayos se desarrollan a humedades relativas altas y simulando lluvia con pulverización de agua.

En los últimos años se han desarrollado numerosas instalaciones de simulación ambiental que permiten la generación de atmósferas contaminadas, controlando además todas las variables ambientales - temperatura, humedad relativa, concentración de los gases contaminantes - y permitiendo también el empleo de radiación UV y la simulación de lluvia o niebla (con agua o soluciones de distinto tipo). En este tipo de cámaras es posible simular la acción de todos los factores de alteración, pudiendo desarrollarse todos los tipos de ensayos anteriormente mencionados, tanto de forma separada como combinados. Los ensayos que se desarrollan en estas instalaciones son los que mejor pueden reproducir las condiciones reales de exposición.

### 3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los datos obtenidos sobre los distintos aspectos que determinan el comportamiento de un producto de tratamiento puede seleccionarse el que mejor responda a las necesidades que presenta la obra a restaurar.

No puede concluirse que los resultados obtenidos por estos medios vayan a proporcionar una garantía total acerca del tratamiento adoptado. Lo que sí parece comúnmente aceptado es que esta metodología es muy útil para descartar aquellos tratamientos inadecuados. A pesar de ello, se tienen suficientes elementos de seguridad para evitar, en lo posible, actuaciones desafortunadas.

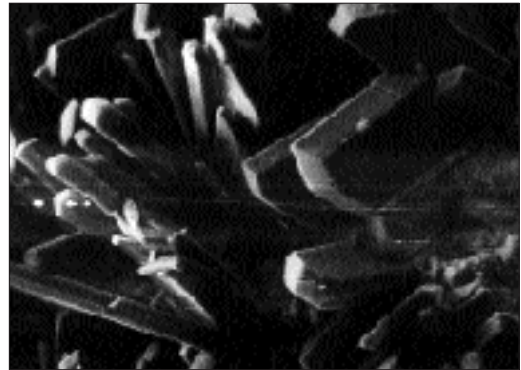
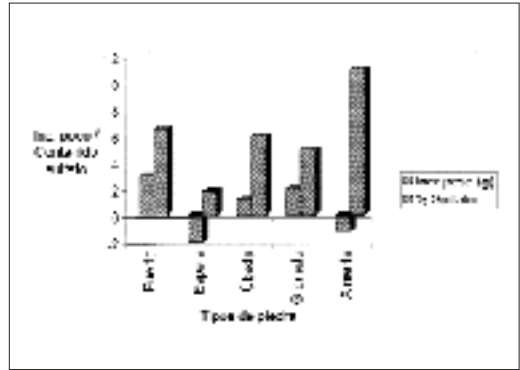


Figura 10. Ensayo en atmósfera contaminada. Formación de yeso en la superficie

Figura 11. Muestra del Puerto de Santa María tras ensayo de ataque con atmósfera contaminada, SEM

## BIBLIOGRAFÍA

- ESPINOSA, J.; VILLEGAS, R. La Puerta de Córdoba. La investigación científica aplicada a la caracterización de materiales y la selección de tratamientos de conservación. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 33, 120-130, 2000. ISSN1136-1867
- HONEYBORNE, D.B., et al.: Comments on the tests proposed in Doc. RILEM 25 PEM 73/10. Microporosity Doc. RILEM 25 PEM 73/15, 1973.
- MAMILLAN, M.; BOUINEAU, A.: Essais de gel. Doc. RILEM 58 VTP, 81/17.
- ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; SEBASTIÁN, E. Programa de Normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 15, 60-61, 1996 ISSN1136-1867
- ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades Hídricas. 1 Parte. PH<sup>a</sup> Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 22, 45-49, 1998 ISSN1136-1867
- ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades Hídricas. 2 Parte. PH<sup>a</sup> Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 23, 40-45, 1998 ISSN1136-1867
- VILLEGAS, R.; ONTIVEROS, E. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades mecánicas. 1 Parte. PH<sup>a</sup> Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 28, 73-78, 1999 ISSN1136-1867
- ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades mecánicas. 2ª Parte. PH<sup>a</sup> Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 32, 121-129, 2000 ISSN1136-1867

RILEM 6-PAN: Méthodes d'essai des pierres naturelles et artificielles. *Materiaux et Constructions* 5 (28), 231-257, 1972.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M.: Artificial ageing tests on stones, marbles and bricks. *L'Ingegnere* 45 (6), 483-502, 1971.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M.: Un sistema di invecchiamento artificiales di materiale lapideo: risultati preliminari. *Problemi di conservazione*, parte II, 359-374, 1973.

ROSSI-MANARESI, R.: Salt crystallization test. *Doc. RILEM* 58 VTP 81/16.

TABASSO, M.; ROSSI-DORIA, P.: Proposal for a method to control the conservation treatments on stones. *L'Ingegnere* 4 (Ap. 1974) *Doc. RILEM-PEM* 74/34.

VILLEGAS, R. Efecto de la contaminación atmosférica sobre los materiales pétreos. La alteración de

la piedra de la Catedral de Sevilla. Estudio de tratamientos de conservación. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Univ. Sevilla. 1985.

VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Ensayos de alteración de materiales pétreos. *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 31, 78-88, 2000 ISSN1136-1867

VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; VALE, J. F.; MARTÍN, A. Diagnóstico y tratamiento de la piedra. I. La alteración de la piedra en monumentos. II. Consolidantes e hidrófugos. Productos para el tratamiento de materiales pétreos. I. C. Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Monografía n1 400. Madrid. 1990.

VOS, B.H.: Hygric methods for the determination of the behaviour of stones. Deterioration and protection of stone monuments. *Proc. Int. Symp. Paris*, 1978, 3.8.

# El papel de la analítica de los materiales en la restauración del patrimonio inmueble

Pedro Salmerón Escobar  
Arquitecto

## 1. PREÁMBULO

Esta aportación a la reedición del libro *Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción de los edificios históricos* recoge los temas más relevantes de las conferencias sobre intervenciones prácticas en el patrimonio inmueble, impartidas en el curso que organiza anualmente el IAPH y la Universidad de Granada, cubriendo un aspecto de vital importancia para la formación de los profesionales de la conservación y restauración del patrimonio cultural.

Es, al mismo tiempo, una reflexión crítica sobre un proceso que se ha ido depurando con el tiempo hasta hacerse imprescindible en cualquier intervención que se plantee con unos mínimos de calidad. El lector encontrará algunas claves sobre la forma en la que se ha desarrollado este acercamiento a la analítica de los materiales, para que vea la situación actual a partir de la experiencia de más de una década de un equipo de profesionales bastante amplio, que vienen fundamentalmente de dos campos diferenciados: la intervención restauradora (incluyendo a arquitectos, arquitectos técnicos, arqueólogos, historiadores, restauradores, conservadores, etc.) y la analítica (geólogos, químicos, físicos, etc.), y la relación fundamental de todos ellos con la administración pública y la empresa que ejecuta los trabajos. Esta división del trabajo, y por tanto del papel que cada uno juega en el proceso, tiene un interés especial desde el momento en el que la intervención sobre el patrimonio cultural se convierte en una actividad en la que confluyen campos diversos

del conocimiento y de la acción: cultura, tecnología, innovación, empleo, gestión etc. hasta adquirir un grado de complejidad adecuado a los fines de ese patrimonio y al papel que desempeña en la sociedad actual.

En el apartado siguiente se describe el punto de partida de esta experiencia con el Plan de Catedrales de Andalucía y los aspectos novedosos que planteó en diversos campos de la intervención en el patrimonio cultural. Después abordamos problemas concretos de metodología tal y como se exponen en el curso, con objeto proporcionar a los asistentes una visión que complementa las clases recibidas de teoría y laboratorio con la aplicación a intervenciones concretas.

## 2. CONSIDERACIONES DE PARTIDA. EL PLAN DE CATEDRALES DE ANDALUCÍA

En 1988 - 1989 se iniciaron los trabajos de intervención en las catedrales a partir del Plan de Catedrales de Andalucía de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, con independencia de otras acciones anteriores programadas por el Ministerio de Cultura, los cabildos catedralicios o la propia Junta de Andalucía.

En aquel momento la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía planteó a los equipos que se responsabilizaron de la conservación de las catedrales la necesidad de programar los trabajos más urgentes a realizar. Nos encontramos de esa forma con una propuesta de cierto calado porque significaba seleccionar para intervenir en unos objetos de gran valor material y simbólico.

Pero el Plan de Catedrales de Andalucía iba más allá de unas acciones puntuales por importantes que fueran; en realidad planteaba una acción combinada en varios campos que se resumía en tres grandes apartados:

PLAN DE CATEDRALES DE ANDALUCÍA (1988)  
Apartados básicos para el desarrollo de los trabajos

- Definición y ejecución de las intervenciones de emergencia
- Definición de intervenciones ordinarias
- Levantamiento fotogramétrico
- Diagnóstico previo

En el debate que se establecía a partir de este planteamiento parecía necesario considerar no sólo al objeto sino también a la propia ciudad, porque las catedrales forman parte esencial de los cascos históricos, y el deterioro, como proceso lógico de envejecimiento y transformación de las estructuras físicas, se convierte en un recorrido de influencias mutuas, donde la decadencia o la vitalidad de la ciudad y sus gentes tiene un reflejo y respuesta incuestionables en estos grandes edificios. Hoy deberíamos profundizar de manera intensa en estas relaciones porque las catedrales están en el centro de muchas acciones de revitalización, de uso de

los recursos patrimoniales, de intensificación de la demanda turística, etc.

No se trataba sólo de considerar el influjo mutuo ciudad – monumento, que nos hace pensar en los problemas de contaminación atmosférica, en las modificaciones que impone el turismo de forma paulatina, o en los valores de centralidad de los ámbitos inmediatos a las catedrales, sino atender al mismo tiempo a un contexto global donde el clima, el sismo, el viento, los factores biológicos y una larga lista de factores influyen decisivamente sobre las fábricas pétreas, los revestimientos, el hierro, las esculturas y pináculos desafiantes, las vidrieras...

La conservación del patrimonio atiende de forma particular las manifestaciones de un deterioro o cambio de las estructuras materiales que es parte de la cualidad de su existencia, hasta el punto que en muchas ocasiones no es necesario intervenir, o debemos hacerlo con la mínima interferencia en la materia constitutiva de las cosas. Este difícil equilibrio es, en muchos casos, el resultado de una actitud de respeto por esa forma de estar en el mundo, haciendo que adquiera sentido el valor de antigüedad de los objetos que no significa la reverencia o adoración incondicional de lo vetusto.

Estas consideraciones nos parecían evidentes entonces, y ahora toman plena actualidad cuando



Figura 1. Fotografía aérea del Conjunto Catedralicio de Granada realizada para el levantamiento fotogramétrico. Foycar (1986)



Figura 2. Levantamiento del Conjunto Catedralicio de Granada. Planta general. Se indica la posición de la Portada del Perdón al que hace referencia este artículo

tantas actuaciones han alterado de forma innecesaria excelentes cualidades materiales de pequeñas y grandes estructuras de nuestro patrimonio. Pero también se ha progresado mucho en la convicción de investigar, comprobar e intervenir con conocimiento de los procesos que transforman y condicionan la materia.

El problema que planteaba la administración andaluza había que contestarlo con objetividad y emprendimos un acercamiento al objeto, que, de alguna manera, nos ha dejado una huella que permanece en el tiempo a un equipo extenso de profesionales que creemos firmemente en las ventajas de los análisis previos y de las comprobaciones continuas, y que sabemos, que cuando no se hace, se actúa a ciegas, o por intuición, o por experiencia, pero sin apoyo científico. Y no es cuestión de decir aquí hasta dónde se acierta en estos casos, sino cuánto nos alejamos de esa realidad física sobre la que intervenimos.

El apartado correspondiente a las intervenciones era especialmente delicado porque debían resolverse en un primer acercamiento problemas urgentes que implicaban al mismo tiempo a las condiciones de conservación de las catedrales, a la revalorización del patrimonio catedralicio ante los ciudadanos, e incluso a la seguridad en la vía pública, ya que los deterioros afectaban

a fachadas que presentaban problemas graves de desprendimientos.

En el caso de la catedral de Granada la selección de los trabajos de emergencia se planteó con el orden que se presenta a continuación, y su desarrollo permitió poner a punto las técnicas de análisis de materiales y seguimiento de los trabajos durante las obras:

Conjunto Catedralicio de Granada:

- Cornisas de la Iglesia del Sagrario
- Cresterías de la Capilla Real
- Fachada de la Catedral a la plaza de las Pasiegas (I): escultura del arcángel San Miguel
- Fachada de la Catedral a la plaza de las Pasiegas (II): esculturas, cornisas y pináculos

Al mismo tiempo los equipos recibieron dos encargos que han tenido una gran trascendencia para el desarrollo posterior de los trabajos en las catedrales y en otros monumentos: un levantamiento fotogramétrico y un diagnóstico previo, que permitiesen disponer de planimetría fiable y de una orientación del estado y cualidades de las catedrales.

La información que se ha generado a partir de ese momento tiene un gran valor para estos profesionales pero desconocemos la profundidad y detalle de los conocimientos adquiridos

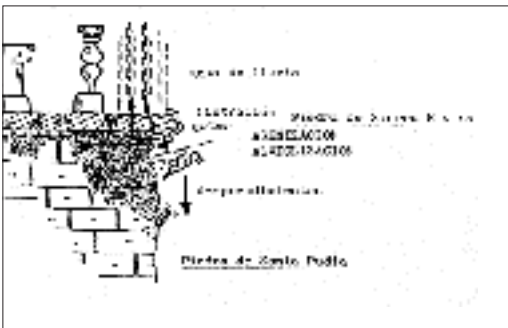


Figura 3. Alteración de los materiales pétreos del Conjunto Catedralicio de Granada. Gráfico sobre el proceso de arenización y alveolización

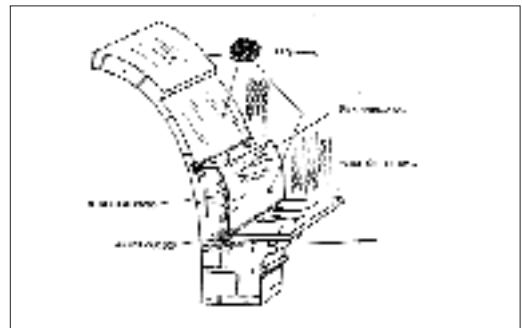


Figura 4. Esquema de alteraciones en zonas de cúpulas y cornisas de la iglesia del Sagrario

en las demás catedrales, porque el quehacer diario de nuestro trabajo obvia desgraciadamente un intercambio fluido de información y las publicaciones que el caso demanda. Quizá sea una de las tareas más interesantes que deberían afrontarse ahora con los planes directores de las catedrales andaluzas finalizados en fecha reciente (2001)

El diagnóstico previo en el caso de la Catedral de Granada comprendía los siguientes estudios sectoriales:

Diagnóstico previo de la Catedral de Granada  
Estudios sectoriales

- Investigación histórica
- Investigación arqueológica
- Intervención urbanística
- Programas espaciales
- Análisis del subsuelo
- Análisis de la construcción
- Intervención sobre bienes muebles
- Programas singulares
- Difusión
- Estimación económica

Los epígrafes dan una idea de la amplitud de los trabajos, incluyendo en el Análisis de la construcción un trabajo específico sobre el comportamiento de los materiales pétreos realizado por un amplio equipo de profesionales, dirigido por los catedráticos de la Universidad de Sevilla Emilio Galán y Antonio Martín. El estudio realizado que se tituló *El estado de alteración de la piedra del conjunto catedralicio de Granada: información, valoración global y plan de actuación* (1988), permitió sentar las bases de las primeras intervenciones en la Catedral estableciendo las prioridades en función de los deterioros más significativos. Figuras 6 y 7

Para el equipo redactor de los proyectos de emergencia que se sucedieron durante un periodo de cuatro años, supuso la posibilidad de actuar a partir de un conocimiento preciso de los materiales y los factores de degradación, y la posibilidad de hacer un seguimiento de los trabajos con este mismo equipo. Adjuntamos algunos gráficos significativos del estudio citado sobre los problemas de degradación de los materiales pétreos,

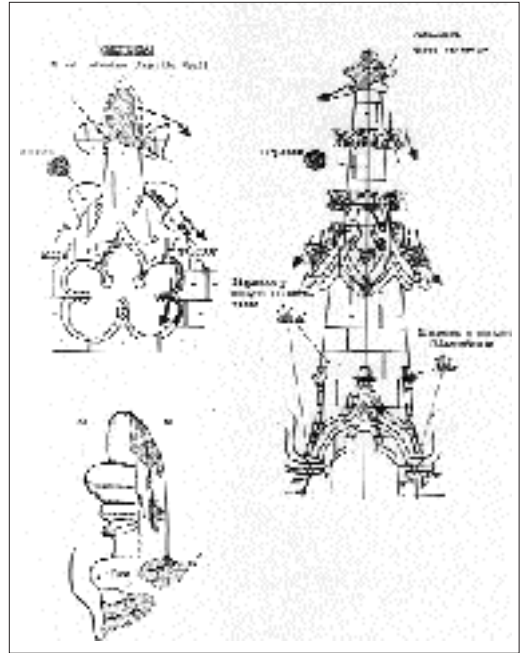


Figura 5. Esquema de deterioros en los pináculos y cresterías de la Capilla Real

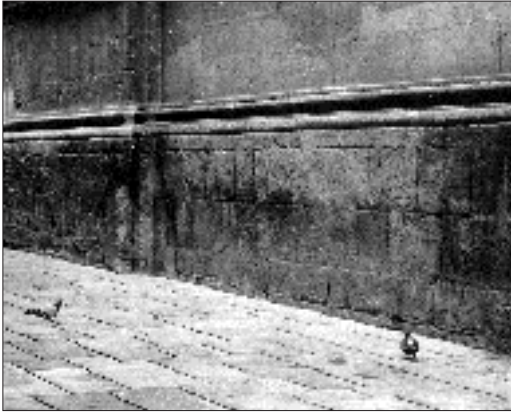


Figura 6. Arenizaciones en zócalos de la iglesia del Sagrario producidas por humedad ascendente

Figura 7. Cresterías de la Capilla Real. Disgregaciones producidas en zonas ornamentadas

especialmente elementos ornamentales, que nos resultaron especialmente útiles en la definición de los trabajos de intervención. Figuras 3, 4 y 5

La escasez de presupuesto en los años de arranque de los trabajos de restauración, hizo que el equipo de Antonio Martín y Emilio Galán no pudiese continuarlos desde Sevilla, momento en el que conectamos (1991) con el grupo de investigación Estudio y Conservación de materiales pétreos en Edificios Históricos de la Universidad de Granada, dirigido por Eduardo Sebastián Pardo, director a su vez de este curso de técnicas de diagnóstico, que en 2003 cumplirá su undécima edición. Esta vinculación supuso para nosotros la posibilidad de realizar la analítica de cada caso concreto y el seguimiento de las obras. Para los trabajos de análisis se ha contado con el equipamiento del Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada y, por tanto, la posibilidad de llevar a cabo cualquier analítica compleja.

Es necesario resaltar que esta doble andadura de nuestro equipo y el de la Universidad de Granada ha supuesto un refuerzo mutuo para la realización de estudios de materiales pétreos y la posibilidad de ofrecer la analítica del caso como algo normal, que introduce patrones de racionalidad en las intervenciones y asegura su cometido. En muchas ocasiones hemos contado con un ofrecimiento abierto por parte del grupo de investigación Estudio y conservación de materiales pétreos en edificios históricos que nos ha proporcionado información previa con un coste muy bajo y un perfil limitado pero suficiente para situar el proyecto. En otras ocasiones, que van siendo las más frecuentes, se han realizado encargos específicos para hacer los estudios previos a cargo del promotor, con la profundidad necesaria al caso. En lo que respecta al apoyo científico en el tajo de obra, hemos recurrido al 1% del presupuesto de ejecución material, que por ley debe ser invertido en control de calidad en toda obra. Las pautas de la analítica las hemos establecido en la memoria y pliego de condiciones y el contratista ha sufragado los gastos dentro de ese tope, que ha resultado suficiente en la mayoría de los casos.



### 3. CONOCIMIENTO E INTERVENCIÓN

La inquietud por el conocimiento es probablemente el aspecto que más me gustaría transmitir a los profesionales que siguen este curso o se acercan a este libro con alguna pregunta que formular, porque esa sería la motivación que nos ha guiado a muchos a la hora de indagar acerca de las claves de un problema que se nos planteaba en una restauración y cómo abordarlo.

Esta primera reflexión nos lleva a una cuestión importante que se relaciona con la problemática (general) del objeto que se restaura, de forma que el planteamiento de la acción restauradora inspira buena parte de los estudios sabiendo en cada momento el lugar que ocupa cada uno de los análisis que hacemos.

Esta forma de proceder está relacionada con un necesario distanciamiento del objeto que se analiza para no diluir excesivamente la investigación, estableciendo un adecuado paralelismo entre los fines de aquella y el desarrollo de las pautas de análisis. Otra cuestión a tener en cuenta es la continuidad de la analítica, tanto para comprobar la ejecución de los trabajos como para proceder a rectificar los tratamientos y actuaciones, si se observan aspectos que habían quedado velados en un primer trabajo de acercamiento al objeto.

La analítica de los materiales y elementos constructivos no es una finalidad en sí misma para el restaurador sino un instrumento para conducir su trabajo y apoyar científicamente sus decisiones. El peso de este conocimiento debe ser estimado dentro de un conjunto de factores entre los cuales se encuentra el análisis histórico – documental, la arqueología, los criterios de buena construcción (en el caso de los inmuebles), la consideración de los factores medioambientales etc. Con toda seguridad son esas perspectivas las que nos permitirán situarnos adecuadamente frente al objeto y actuar con mayor seguridad.

A veces este conjunto de factores nos coloca ante situaciones que están por encima de nuestra propia capacidad para intervenir y dependen de circunstancias que no se controlan al cien por cien desde la intervención. Es una situación difi-

cil que servirá para acotar adecuadamente el cometido de nuestro trabajo y aconsejar actuaciones preventivas o limitadas e incluso la posibilidad de no intervenir. Algunos monumentos se ubican en áreas de contaminación urbana o industrial muy importante que nos enfrentan con unos retos que tienen una escala de rango superior, porque las medidas de control de emisión de residuos o las de reducción o eliminación del tráfico, pertenecen a instancias diferentes a las de la intervención directa sobre el objeto. Recuerdo a este respecto una observación sobre las esculturas de bronce de Roma cuando se expuso al público la restauración de la escultura ecuestre de Marco Aurelio en el comienzo de los 90: los bronces de la antigüedad romana y los de la época de Mussolini, previos a la segunda guerra mundial, tenían deterioros muy parecidos debidos a la acción del medio ambiente urbano en los últimos decenios.

Estos problemas no tienen solución fácil y las decisiones se adoptan con cautela y lentitud o sencillamente no se toma ninguna medida. En estos casos debe reconocerse, al menos, el carácter limitado del trabajo que acometemos y la adopción de medidas de protección de las superficies que van a estar expuestas. En algunos casos especialmente graves, cuando se trata de elementos singulares como una escultura, y una vez comprobada la irreversibilidad de los daños si siguen las condiciones adversas, puede proponerse el traslado a un local protegido (un museo) colocando una réplica en el emplazamiento original. Normalmente el trabajo de restauración nos sitúa en la primera perspectiva para procurar que los edificios y todos los elementos asociados a los mismos conserven sus atributos de originalidad o autenticidad en las mejores condiciones de conservación.

En otra perspectiva se sitúan aspectos de rango general que dependen de nuestra acción sin que puedan ser trasvasados a otras instancias de decisión. Nos referimos a factores causales que afectan al estado de conservación de los materiales constitutivos y que exigen su corrección para evitar nuevos procesos de deterioro. Es relativamente frecuente encontrar problemas de humedades, de tipo estructural o de clima



interior de un ambiente que permanecen sin resolver después de una restauración provocando la continuidad de los deterioros. En estos casos los esfuerzos realizados por recuperar un elemento se ven abocados a un resultado parcial o al fracaso.

Vamos a exponer dos experiencias que pueden servir de ejemplo del proceso seguido, el primero, la restauración de la escultura del arcángel San Miguel de la fachada a plaza de las Pasiegas de la Catedral de Granada, basado en un estudio general sobre los materiales pétreos de todo el monumento y el segundo, la restauración de la Portada del Perdón de la Catedral de Granada, con analítica específica para la intervención.

### 3.1. El viento y el sismo como protagonistas

La escultura del arcángel San Miguel de la Catedral de Granada.

Cuando estábamos recorriendo los diferentes niveles de cubierta del conjunto catedralicio de Granada para realizar el diagnóstico del monumento, y más concretamente cuando nos acercamos en 1988 a las cornisas altas de la iglesia del Sagrario para solucionar los problemas de desprendimiento que presentaban, observamos una fisuración vertical importante del cuerpo de la escultura del arcángel San Miguel situado en la fachada hacia la plaza de las Pasiegas y deterioros visibles de la base que aconsejaban acometer una intervención de emergencia.

La escultura remata el cuerpo de fachada que linda con la iglesia del Sagrario. El extremo superior de este cuerpo se corona con una cúpula sobre la que se eleva una falsa linterna cuyo remate en forma de cupulín recibe la peana de la escultura. El conjunto tiene una altura notable (43 m hasta el extremo de la escultura frente a los 56 m de la torre) y juega un papel determinante en la composición de la fachada contrapesando el papel de la torre inacabada de la catedral. Para la escultura implica una situación muy expuesta a los agentes atmosféricos y las acciones de tipo mecánico.

La escultura, que se esculpió en dos grandes piezas con una junta a nivel de la cintura, pre-

sentaba fisuras importantes. Aparentemente el problema se debía a los procesos de deterioro de la calcarenita definidos en el diagnóstico de los materiales pétreos al que hemos hecho referencia al principio, y contábamos con la más que probable colaboración de algún anclaje interior. Accedimos a la escultura gracias a una plataforma montada con andamios hasta la base de la escultura y observamos los daños que reflejan las fotografías.

La peana de piedra sobre la que se apoya la escultura se estrecha al unirse con el cupulín de la falsa linterna. Este artificio despega la escultura respecto al volumen arquitectónico dándole una apariencia de esbeltez y ligereza bastante acertada pero le ofrece un apoyo exiguu que no puede resolverse sin la ayuda de un anclaje. La piedra calcarenítica de la peana presentaba deterioros por pérdida de cohesión del material cementante, roturas en el borde inferior y diversas fisuras, una de las cuales recorría verticalmente la peana por lados opuestos. La fisuración y las roturas hacían pensar en problemas mecánicos más que en procesos de oxidación de los anclajes interiores. La presencia de morteros de cemento en la unión de la escultura con la peana nos evidenciaba una intervención reciente. La piedra con la que está ejecutada la escultura, también calcarenita, había sido seleccionada con acierto porque se conservaba en condiciones excelentes salvo los problemas de fisuración de tipo estructural. Figura 8

La fisura vertical de la peana se prolongaba hacia abajo en el cupulín que hace de apoyo de la peana y hacia arriba en la pieza inferior del cuerpo de la escultura, situación que evidenciaba comportamientos similares ante acciones de tipo mecánico que actuaban de modo selectivo. El torso de la escultura tenía una fisura horizontal cercana a la cintura y sendas fisuras en los brazos y en las uniones de las alas de bronce con el torso. Las reparaciones con mortero de cemento enmascaraban las fisuras y la junta que separa las dos partes en las que está dividida la escultura.

Cuando se retiraron las alas de bronce, el torso, los brazos y la cabeza se desprendieron

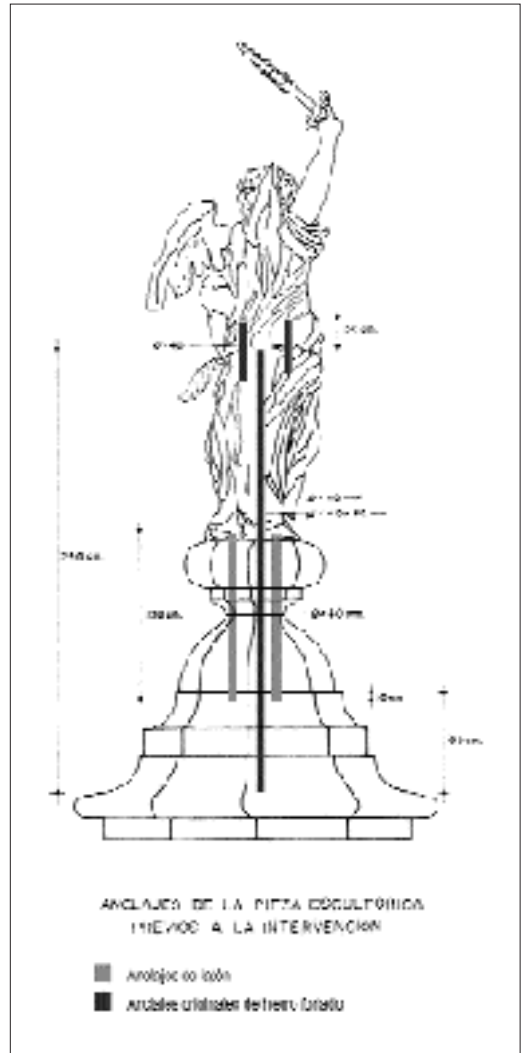


Figura 8. Fotografía del arcángel San Miguel en la que se indican las fisuras que presentaba la escultura antes de la intervención.

Figura 9. Esquema de la escultura y anclajes



Figura 10. Vista donde se aprecian con detalle las fracturas de la escultura y el deterioro de la base

Figura 11. Fragmentos de la escultura después del desmontaje

con facilidad a través de las fracturas que estaban presentes en la escultura por el efecto de palanca de todos estos elementos, especialmente las alas. El resto del torso pudo removerse con facilidad apareciendo dos anclajes de hierro de 40 mm de diámetro y 50 cm de largo que unían las dos partes del cuerpo -ver ilustraciones-. Apareció también la cabeza del vástago central que recorría la parte inferior de la escultura, que a su vez quedó troceada en dos partes gracias al plano vertical de rotura. La escultura quedó al fin dividida en 11 partes: cabeza, torso, ala izquierda, ala derecha, brazo izquierdo y palma de bronce, brazo derecho y espada de hierro forjado, pierna izquierda, pierna derecha y pies. Figura 11

De la parte superior de la peana emergían las cabezas de dos vástagos de latón de 40 mm de diámetro y 1,20 m de longitud y el vástago central constituido por una barra de hierro de sección irregular de unos 60 mm de diámetro. Los tres vástagos estaban alineados y la peana literalmente rota por un plano central vertical que coincidía con la posición de los vástagos como se puede apreciar en la fotografía. Figuras 12 y 13

Retirada la peana se pudieron extraer los vástagos laterales de latón y el vástago central que tenía una longitud de 2,90 m, de los cuales 1,10 m cubrían el trayecto de la parte inferior del cuerpo y 1,80 m perforaban la peana y el cupulín de la falsa linterna. La parte inferior del vástago central no era circular sino un cuadradillo de 40 x 65 mm, probablemente fabricado en la fragua de esta forma para dificultar el giro una vez colado el plomo que rellenaba la holgura entre la pieza de hierro y la piedra. Figura 8

La idea original fue, con toda probabilidad, anclar la escultura con un solo vástago central al igual que se hace con los grandes pináculos y dejar que la unión funcionase admitiendo un juego parecido al de una falsa rótula. Los movimientos acabaron arruinando la unión de la peana y el cupulín, que es la parte más delicada de todo el conjunto, y la reparación se hizo añadiendo los dos vástagos de latón.

Después de esta reparación los tres vástagos alineados no anclaron mejor la escultura sino que provocaron un aumento de las tensiones y

un plano de fragilidad evidente, ya que cualquier esfuerzo debido al viento o al sismo, que no fuese en la misma dirección que este plano resistente, hacía que el conjunto de los vástagos funcionase como una palanca dentro de la masa pétreo. Las tensiones no se disipaban en la junta como ocurre cuando existe un solo anclaje en el centro y la escultura en su conjunto acabó acusando la coerción que imponían los tres vástagos.

En la intervención se eliminaron todos los vástagos incluyendo el central de hierro forjado de 2,90 m. Se reparó la escultura, limpiando los planos de fractura, eliminando morteros de antiguas reparaciones, pegando las partes fracturadas con resina epoxi y cosiendo con varilla de acero inoxidable embebida en resina epoxi. La peana se reconstruyó con piedra artificial armada con acero inoxidable, incluyendo un tubo pasante de acero inoxidable anclado mediante tres pletinas -ver esquema-. Se prefirió esta solución para dotar a la peana de mayor resistencia a las acciones de flexo tracción que le impone una situación tan delicada. Figuras 14 y 15

El nuevo anclaje se realizó con una barra de acero inoxidable de 5,90 m de longitud y 55 mm de diámetro, taladrando el eje de la linterna y embebiendo el anclaje con resina epoxi. Una vez emplazado el nuevo vástago se fueron introduciendo los diferentes elementos:

1. Un disco de acero inoxidable de 3 mm de espesor asentado con mortero de cal sobre la superficie plana que remata el cupulín
2. Un disco de neopreno de 20 mm de espesor
3. La peana con otro disco de acero inoxidable de 3 mm de espesor colocado en la base de aquella y soldado al tubo de acero embebido en la peana
4. Parte inferior del cuerpo de la escultura embebiendo el anclaje en resina epoxi. Figura 16
5. Torso de la escultura cosido a la parte inferior mediante varilla de acero inoxidable
6. Colocación de las alas de bronce ayudadas de unas fijaciones para aminorar el movimiento sobre la zona de anclaje.
7. Colocación de la palma y espada

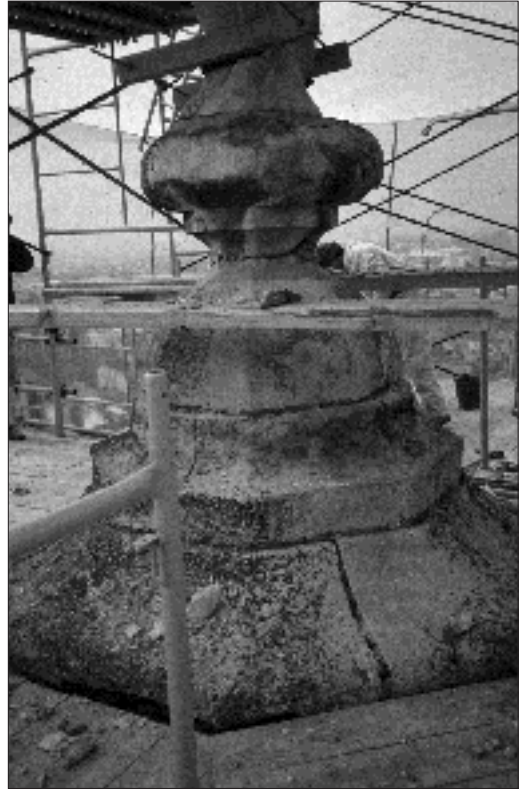


Figura 12. Detalle de los deterioros de la peana y del encuentro con la falsa linterna

Figura 13. Fragmentación de la base y vista de los vástagos de anclaje alineados formando un único plano



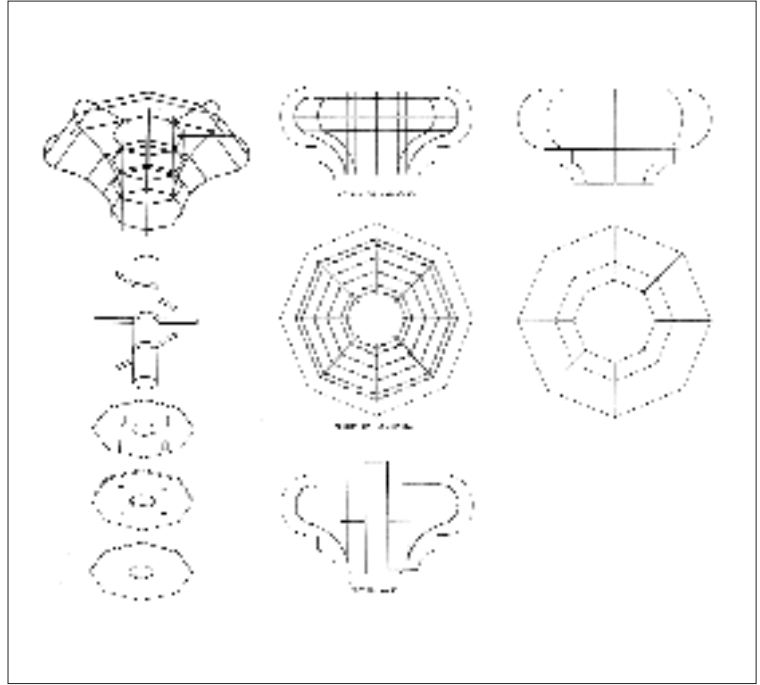
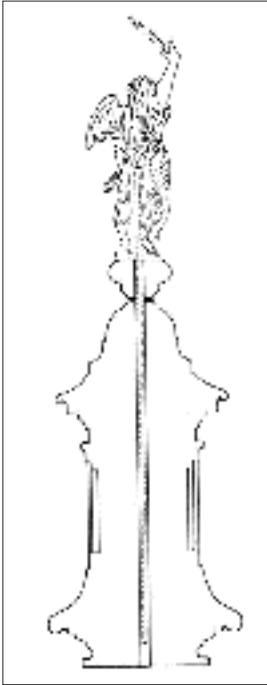
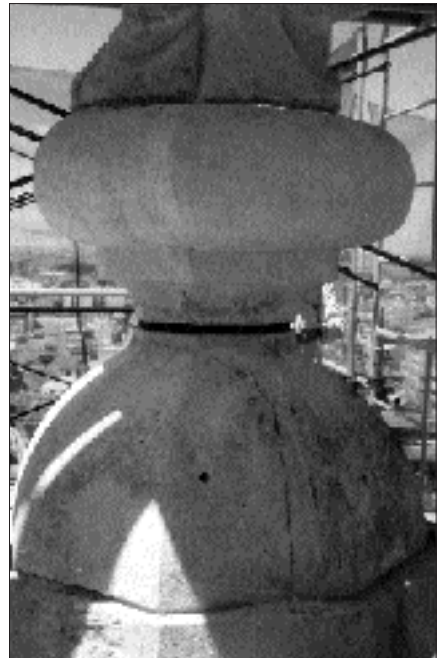


Fig. 14. Esquema general de sujeción de la escultura con un solo vástago de acero inoxidable

Fig. 15. Detalle de armado y montaje de la nueva basa de piedra artificial

Fig. 16. Detalle del montaje de la escultura

Fig. 17. Vista de la nueva basa



El diseño de la unión entre peana y linterna quedó configurado de forma similar a una rótula, confiriendo al neopreno un papel de amortiguación y protegiendo los bordes de las dos superficies pétreas de contacto mediante los discos de acero inoxidable. De esta forma al moverse la escultura por efecto del viento o del sismo, se distribuyen las tensiones en el perímetro del apoyo y se evitan las roturas en cuña del material pétreo.

Posteriormente, en intervenciones similares en pináculos con una casuística menos problemática, hemos renovado la junta de mortero de cal entre el pináculo y la base de apoyo y hemos confinado el mortero mediante una abrazadera para evitar que sea expulsado en los movimientos que experimenta por acciones horizontales como las que hemos descrito.

En el caso de la escultura el análisis de las fracturas, la distinción de los anclajes según los materiales en los que estaban fabricados y la certeza de las acciones<sup>1</sup> en elementos esbeltos de esta Catedral nos permitieron reconstruir un apoyo más lógico en línea con la solución original. Figuras 17 y 18

### 3.2. La Portada del Perdón de la Catedral de Granada

Contaminación y degradación en un ambiente urbano

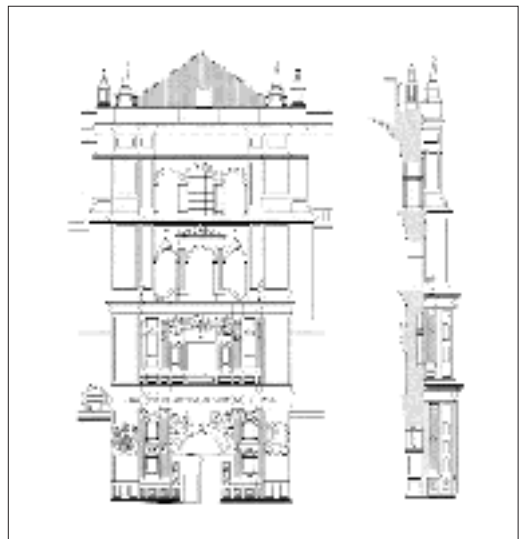
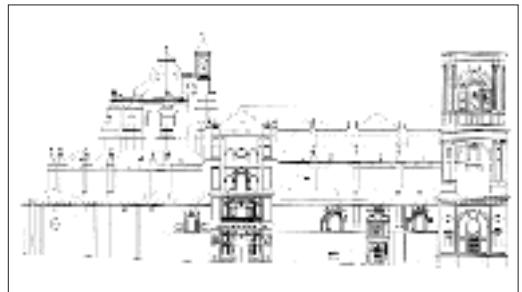
La portada, de una escala monumental, remate del transepto de la Catedral hacia la calle Cárcel, fue trazada por Diego de Síloe que intervino de forma decisiva en su definición. La composición de esta portada pone el acento en los códigos estéticos y formales de la época y se convierte en un modelo que sirve como referencia decisiva para la iglesia del Salvador de Úbeda. La riqueza de la portada, que se manifiesta en el cuidado de los detalles y la decoración y se contrapone a la importante presencia de la torre, convierte a la fachada hacia la calle Cárcel en el exponente renacentista de toda la Catedral. Recordemos que la fachada opuesta está definida fundamentalmente por la Capilla Real (tardogótica) y la principal por la traza barroca de Alonso Cano y la iglesia del Sagrario también barroca.



Figura 18. Valores compositivos de la escultura en una vista en escorzo desde la plaza de Alonso Cano

Figura 19. Alzado de la Catedral de Granada a calle Cárcel Baja

Figura 20. Alzados frontal y lateral de la Portada del Perdón



Los problemas de conservación, que se detallarán más adelante, se manifestaban visualmente por la costra negra que recubría buena parte de la portada y por la pérdida de valores ornamentales por degradación de los materiales pétreos. La envergadura de la portada, la inaccesibilidad de la misma y la excepcional ornamentación aconsejaban realizar un estudio previo que fue encomendado al Grupo de Investigación Estudio y conservación de materiales pétreos en Edificios Históricos<sup>2</sup>. Los aspectos más relevantes del estudio se comentan a continuación, así como el vínculo entre las recomendaciones para intervenir y las determinaciones de proyecto y obra -en ejecución en el momento de redactar este artículo-. Figuras 21 y 22

Muchas veces nos preguntamos cual puede ser la propuesta de contenidos de un estudio de este tipo, tanto para el encargo del mismo como para el planteamiento de la relación con el futuro proyecto. Vamos a empezar por este aspecto, facilitando una guía indicativa para la realización de un estudio petrofísico<sup>3</sup>, que puede servir para que el redactor de un proyecto se dirija a un equipo de especialistas en análisis de materiales, o para que éstos lo ofrezcan como desarrollo a un proyectista o cliente interesado por un trabajo de esta naturaleza<sup>4</sup>.

#### Guía indicativa de contenidos para un estudio petrofísico

##### Aspectos introductorios

- Condiciones del encargo. Estructura del documento. Metodología empleada
- Breve descripción del edificio y del elemento a intervenir, destacando aquellos aspectos que interesen a la perspectiva del estudio a desarrollar
- Avance general sobre los materiales constitutivos y los problemas de conservación que se presentan
- Propuesta de analítica a desarrollar en el estudio petrofísico

##### Desarrollo del estudio petrofísico:

- Localización de los diferentes materiales pétreos en el elemento que se interviene:

Figura 21. Vista general de la Portada del Perdón antes de la intervención



Figura 22. Vista de detalle del cuerpo bajo de la Portada del Perdón antes de la intervención





- Tipos de piedra
- Distribución
- Caracterización mineralógica y textural. Análisis comparativo de materiales inalterados (cantera) y alterados (monumento)
  - Composición química y mineralógica
  - Características físico-mecánicas
  - Comportamiento hídrico
- Identificación / caracterización de las pátinas
- Evaluación de las características medioambientales del entorno y de las morfologías de alteración desarrolladas y su intensidad
- Elaboración de modelos de comportamiento:
  - Modelos de alteración de los materiales pétreos
  - Evaluación de la durabilidad del material pétreo mediante ensayos de alteración acelerada
  - Resultados de las pruebas de limpieza, consolidación, etc. ensayadas por diferentes procedimientos
- Evaluación del estado de conservación

#### Propuestas de actuación y recomendaciones:

- De tipo general
- Limpieza
- Consolidación y protección
- Eliminación / sustitución de elementos metálicos
- Supresión / sustitución de morteros de composición inapropiada
- Tratamiento de fisuras
- Restituciones y recrecidos de material
- Tratamiento de juntas

#### Propuestas para el control y seguimiento de la intervención

En este caso estamos hablando de un estudio bastante completo que incluye pruebas de limpieza, consolidación etc. La adaptación de este programa es posible en función de la disponibilidad de tiempo y presupuesto que se presente en la realidad, teniendo en cuenta que en muchos casos existen verdaderas dificultades para llevar a cabo estudios previos con un desarrollo suficiente. Aconsejamos un proceso de aproximación a este óptimo que señalamos, escogiendo en cada oca-

sión la analítica que mejor se adapte al problema que se nos presenta, reservando acciones complementarias en el desarrollo de la obra (a través del pliego de condiciones y memoria) y emplazando al promotor para previsiones de más largo alcance en el futuro. En nuestro caso estamos hablando de un periodo superior a los diez años con una receptividad cada vez mayor por parte del promotor, sea la administración pública o un particular.

Como nuestra preocupación en este artículo es mostrar la relación de utilidad entre los estudios analíticos y la intervención transmitiendo expectativas y resultados, seguiremos un método expositivo basado en esta especie de vidas paralelas que ofrece el modelo teórico – práctico que se construye en el estudio petrofísico y la realidad, con un andamio puesto y una empresa que tiene un contrato de obra y un proyecto que establece el juego de relaciones posibles.

#### Aspectos introductorios del estudio petrofísico

Los estudios petrofísicos suponen un acercamiento al objeto a través de su materialidad, una especie de buceo acerca de las condiciones en las cuales un material tan noble como la piedra, y otros materiales asociados en la construcción de las fábricas como los morteros, la cerámica, el hierro, la madera etc., reaccionan con la atmósfera, se transforman, escenificando de alguna forma la acción del hombre y del ambiente, el paso del tiempo, que puede reconocerse a través de cambios ostensibles o sutiles e incluso por medio de la degeneración acelerada de su aspecto y cualidades.

La reflexión inicial de estos trabajos es en muchas ocasiones el resultado de un diálogo con el cliente que demanda el trabajo, con el equipo de profesionales que va a responsabilizarse de la intervención, pero también el resultado de un primer acercamiento con el objeto y su ambiente, con la información que recibe del historiador, con los datos de anteriores intervenciones, con las aportaciones de material de archivo y sobre todo del conocimiento previo que el especialista tiene acerca de los materiales pétreos presentes en el inmueble y del significado de su uso y adaptación a sistemas constructivos complejos.



Figuras 23 a 26.  
Alteración de los materiales pétreos en la Portada del Perdón, formación de costras, descamaciones y fisuras en frisos, pináculos y capiteles

Aunque los aspectos introductorios de un estudio de este tipo estén contaminados con los resultados que se han obtenido a través del mismo, es importante que el equipo responsable de la analítica explique su visión del problema, porque este acercamiento sintético al objeto será clave a lo largo de todo el proceso, tanto de la analítica como de la intervención y el seguimiento de la obra, tanto para los propios investigadores como para el equipo del proyecto y la empresa adjudicataria. Y es interesante que el equipo anote sus primeras impresiones y establezca hipótesis y orientaciones que los datos obtenidos confirmarán o rectificarán.

La visión de los materiales constitutivos de la portada

Esta mirada general sobre los materiales es un componente atractivo del estudio que siempre descubre aspectos de interés. En nuestro caso, aunque es obvio que la Portada del Perdón está ejecutada con la calcarenita de Santa Pudía, ha sido importante saber, con carácter previo a la intervención, la distribución de los subtipos litológicos para aspectos tan decisivos como el color, que juega un papel fundamental en la valoración final de la portada una vez se va alcanzando un grado de limpieza suficiente en algunos casos ha aparecido un color anaranjado intenso poco habitual.

También ha sido interesante constatar que en esta portada, con un programa decorativo de gran magnitud, se ha utilizado la piedra calcarenítica salvo los basamentos que se han ejecutado en piedra de Sierra Elvira, mucho más fiable en cuanto a durabilidad. La unidad del material y su trabajabilidad fueron valorados especialmente por Síloe y no se acudió, como en otros monumentos de la ciudad, a ejecutar toda la portada en piedra de Sierra Elvira. Tampoco se eligió para las zonas con más decoración el subtipo de calcarenita litológicamente más compacto y durable. Una conclusión que no debe sorprender ya que la elección del material estaba determinado por muchos factores que no siempre coinciden con la durabilidad a largo plazo. Lo que sí se produce es un rechazo del material

fácilmente alterable ya que los problemas que se daban en estos casos se advertían en periodos muy cortos de tiempo para los que existían referencias muy claras a través de la experiencia y los conocimientos que se transmitían gracias a las maestrías y los gremios. Figuras 23 a 26

El acercamiento a la portada que ha permitido la obra ha confirmado con claridad los problemas de descomposición que se esperaban. Globalmente las condiciones de los frisos decorados permiten entrever una buena recuperación gracias a la protección aportada por las grandes cornisas que dividen los cuerpos de la portada, a las que el proyecto presta especial atención para mantener su papel de defensa del material. Creemos que los constructores de la Catedral eran conscientes de la debilidad de la piedra cuando se empleaba en decoraciones delicadas y en estos casos la selección del material era cuidadosa y aún más los dispositivos de protección o abrigo. Se ha confirmado, como veremos más adelante, una precaución supletoria consistente en añadir un revestimiento de protección con un mortero de cal de diferente espesor y consistencia, del que se conserva la policromía en algún caso. Pero esta no es una regla general y los descuidos a la hora de adoptar este tipo de precauciones ha permitido el progreso de deterioros significativos en lapsos de tiempo muy largos. Figuras 27 a 28



Figura 27. Mortero fino de cal revistiendo la piedra como protección que se mantiene en la intervención

Siguiendo una pauta similar, cuando es necesaria la sustitución de un elemento, acudimos al geólogo para que supervise el tipo de piedra de Santa Pudía que se suministra desde la cantera o desde el taller, descartando la que proviene de cortes inadecuados, cuyo comportamiento deficiente ha arrastrado deterioros múltiples en la catedral. Los problemas de recepción que se pueden dar en una obra por este motivo, originan pérdidas económicas y retrasos por lo que deben aclararse a través del pliego de condiciones, especificando que el tipo de piedra a emplear no se acoge solamente a una denominación genérica, sino a un subtipo determinado que puede condicionarse a la aprobación previa de una muestra del material. Otro aspecto que debe advertirse es la orientación de la pieza que se encarga para controlar la relación entre el corte y el lecho de formación del material. En muchas ocasiones hemos resuelto los posibles problemas de coordinación con la visita al taller del restaurador y el geólogo para seleccionar el material.

#### Caracterización de los materiales

Para que el estudio petrofísico adquiriera sentido para la intervención es necesario el conocimiento de los materiales pétreos antes y después de las alteraciones que se producen al exponer-



Figura 28. Policromía aplicada a un elemento de la portada. (Se indica con un recuadro la zona que se conserva)

los a todo tipo de acciones. Las muestras de material inalterado pueden extraerse de algunas partes del edificio pero es preferible hacerlo directamente en la cantera (Cortijo de Santa Pudía, canteras de Las Parideras y de La Escribana), para obtener una lectura de las propiedades de los tipos litológicos que se presentan y de su comportamiento. Las muestras alteradas de planos altos de la Portada del Perdón se obtuvieron con la ayuda de una grúa y las del primer nivel mediante un pequeño andamio.

En el caso de la Portada del Perdón la experimentación con la piedra original ha sido posible gracias al acceso disponible a las canteras, al taller que más trabaja este tipo de piedra y al conocimiento que el equipo de expertos tiene sobre la calcarenita por las investigaciones que han llevado a cabo en la propia Catedral y en diversos monumentos de la ciudad de Granada. La variación de contenidos de los elementos que componen la calcarenita a través de los procesos de alteración es posible observarla a través de un estudio comparativo del material en estado original y alterado, y no sólo a través de los elementos mayoritarios de los materiales pétreos, sino también de los traza (elementos minoritarios), especialmente de aquellos componentes que aparecen en los procesos de degradación. El investigador se apoyará en procedimientos apropiados a cada caso como la porosimetría, la microscopía electrónica de barrido, la difracción de rayos X etc., pero no se trata en este artículo de explicar la adecuación o fiabilidad de estas técnicas sino de evaluar las ventajas que aportan para la intervención.

En el caso de la Portada del Perdón hay una importante variación de concentraciones de elementos traza como el Mn, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba y Pb, entre las muestras de cantera y las de la portada, variación que es aún más acusada cuando los deterioros son mayores, llegando en el caso del Pb a enriquecimientos del 2500% con respecto al material de cantera. El proceso de oxidación de gases contaminantes como el SO<sub>2</sub>, puede ser catalizado por la presencia de V, Pb, Mn y Cu, formándose H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que puede reaccionar con la calcita y producir yeso -considerado en este caso como una sal soluble no como un aglomerante-. La presencia del Pb debida a los gases emitidos

por vehículos que utilizan la gasolina como combustible, como agente que propicia la formación de yeso, y la de Fe, Cr y Ni debidos al diésel, mayoritariamente presentes en las costras negras, sitúan a la portada en una situación de fragilidad clara para los próximos años. Nuestra intervención puede devolver cualidades perdidas a la portada por efecto de la contaminación y protegerla con tratamientos que aminoren los riesgos en un corto periodo de tiempo, pero no dispone de medios para detener el proceso global de agresión medioambiental. Figura 29

La porosidad sufre alteraciones importantes por la intervención del agua y la contaminación. En general los procesos de pérdida del material cementante que tienen lugar por la acción del agua suponen una elevación de la porosidad importante. El tipo litológico de calcarenita, nombrado en el estudio petrofísico como E1, pasa de una porosidad según los subtipos E1a (13%) y E1b (21%) a un 32% después de la alteración. El tipo más poroso E2 (40%), variedad que normalmente no se usaba, por ser rechazada por los constructores de la catedral debido al alto riesgo de deterioro que presenta, mantiene un grado de porosidad similar (41 %) en las escasas muestras que se han obtenido en la catedral (concretamente de un pináculo), lo que indica que el material alterado había desaparecido, ya que en este caso un ligero incremento en la pérdida del material cementante supone la rápida arenización de la piedra. En una piedra como la calcarenita que es macroporosa los problemas de alteración más significativos se dan en la variedad menos porosa, influyendo de forma clara en su aspecto y conservación. Los tratamientos que consolidan la piedra o la protegen mediante una hidrofugación ligera mejoran el comportamiento global del material.

Por el contrario en casos de alteración extrema la porosidad disminuye por la aparición de precipitaciones o crecimiento de nuevas fases minerales que ocluyen los poros, dejando poros de menor tamaño que hacen más reactivo al material pétreo a los procesos físico - químicos. Estos datos instruyen al equipo de proyecto para extremar los procedimientos que devuelven a condiciones ventajosas la relación de la piedra con el ambiente a través de la estructura porosa,

condición esencial de la conservación preventiva en este tipo de materiales.

Las propiedades mecánicas de la piedra varían de forma ostensible con los procesos de deterioro, la resistencia a compresión disminuye un 42-48 % en capas externas más alteradas y un 27-35 % en las zonas internas<sup>5</sup>. Este decaimiento de la resistencia puede tener una influencia apreciable en piezas muy expuestas a tensiones puntuales de bastante intensidad debidas al sismo o el viento, como ocurre en el caso de pináculos y elementos esbeltos similares, situaciones que la intervención debe cuidar: las pérdidas de material deben reponerse o restituirse, las fracturas coserse con vástagos de acero inoxidable o fibra de vidrio embebidos en resina, los apoyos pináculo – basa revisarse con detenimiento para garantizar un reparto homogéneo de esfuerzos y los anclajes internos sustituirse por acero inoxidable.

Características medioambientales y comportamiento del material

Los análisis sobre el clima y el medioambiente son comunes a los estudios petrofísicos pero no por ello menos necesarios. En nuestro caso nos han servido para constatar y explicar una buena parte de los deterioros de la catedral y para disponer una protección adecuada en situaciones adversas. Las variaciones extremas de temperatura en Granada que pueden oscilar en 20 °C en un mismo día, la intensidad de las precipitaciones en determinados periodos del año (aunque globalmente el clima pueda calificarse de semiárido), la presencia de escarcha y heladas en numerosas ocasiones, y los fenómenos de condensación en horas de madrugada en primavera y verano, son elocuentes a la hora de valorar los problemas, y sobre todo nos lleva al convencimiento de una penetración del agua hasta estratos interiores del material lo que implica disgregaciones, movimiento de sales, fracturas etc. El proyecto deberá armarse suficientemente para limpiar respetando las pátinas, consolidar e hidrofugar respetando siempre la estructura porosa del material. También nos hará cautos procediendo a sellar juntas, mejorando la estanqueidad de las cornisas y optimizando la evacuación de las aguas. Figura 30

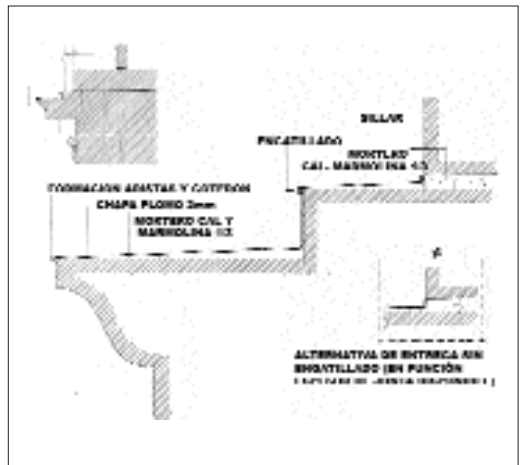


Figura 29. Costras provocadas por la contaminación en la parte inferior de las cornisas

Figura 30. Detalle de proyecto para la protección de cornisas con lámina de plomo

Un aspecto que nos ha preocupado con frecuencia en los trabajos de restauración ha sido la influencia de la lluvia y los cambios térmicos en el tajo de obra. Cuando se trata de intervenciones relacionadas con las cubiertas es necesario prever, en emplazamientos como Granada y en casos especialmente delicados -armaduras mudéjares, interiores con pinturas de interés etc.-, una sobrecubierta que esté diseñada y presupuestada en el proyecto. En actuaciones como la que nos ocupa, la información sobre la temperatura nos aconseja establecer un control diario de la misma; pueden valer termómetros digitales de pequeño tamaño colocados en distintos niveles de la intervención. En el caso de la portada del Perdón, orientada al norte, hemos dispuesto tres termómetros registrando la temperatura tres veces al día, lo que nos permite establecer limitaciones para aquellos procesos de intervención que dependen directamente de la interacción humedad – temperatura, como la limpieza con papetas o agua nebulizada, o en consolidaciones con silicato de etilo, absolutamente prohibidas en periodos de tiempo cercanos a los 0 °C. Al cabo de unas semanas el personal de obra tiene un conocimiento preciso de las tareas que pueden ejecutarse, de la evolución de las temperaturas durante el día y de las tareas sustitutorias que no están mediatizadas de forma tan clara por aquellas.

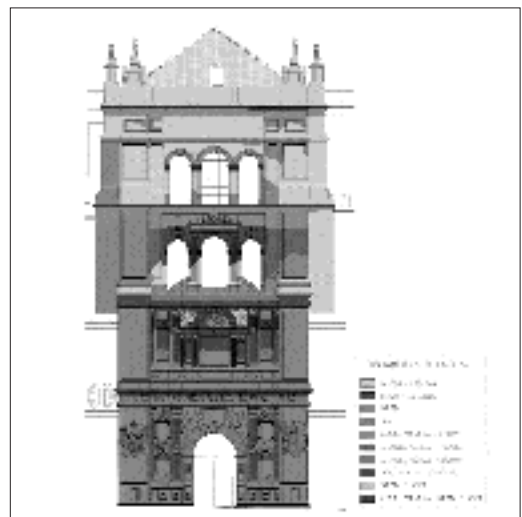
### Conservación y formas de alteración

Esta es una parte crucial de un estudio petro-físico, que en el caso de la Portada del Perdón advertía de los problemas de los dos cuerpos inferiores, con pérdidas masivas de material pétreo, fisuraciones y disgregaciones y los dos superiores con menores problemas de conservación. Se avanzaban las razones: mayor incidencia en la parte baja de la contaminación originada por el tráfico, más polvo acumulado, menor aireación, mayor dificultad de evacuación de las aguas (se hacía un supuesto sobre la somera pendiente de las grandes cornisas de estos cuerpos de la portada), costras más significativas, mayor relevancia de los deterioros causados por las palomas.

Se describen brevemente las formas de alteración más importantes:

- Arenización. Pérdidas grano a grano del material pétreo con especial incidencia en elementos labrados.
- Alveolización. Oquedades en zonas de material muy poroso y de dimensión elevada de grano.
- Costras. Blanquecinas, provocadas por la precipitación de calcita proveniente de la disolución de carbonatos de la propia calca-renita de Santa Pudia. Grises, por acumula-

Figura 31. Alzado de la Portada del Perdón con detalle de los tratamientos propuestos.





ción de polvo o partículas de contaminación atmosférica, arcillas, calcita y yeso. Negras, compuestas por partículas de contaminación, hollín y abundante yeso originado por la acción de los contaminantes sobre el propio material pétreo. Las costras grises y negras se concentran en forma notable en la parte inferior de cornisas y en general en zonas protegidas del impacto de la lluvia.

- Desplacados y descamaciones. Desprendimientos con forma de placas o escamas, debido a la marcada anisotropía que presentan los cristales de calcita constituyentes de la calcarenita, con diferentes magnitudes de dilatación dependiendo de la dirección del cristal que se considere. Morfologías de alteración que también podrían originarse por la acción del agua de lluvia que primero disuelve la calcita y luego recristaliza o precipita en la superficie del elemento pétreo dando lugar a pequeñas placas de dicha fase mineral. Se sitúan en los cuerpos altos de la portada y en elementos de remate como pináculos y cornisas superiores.

Esta parte del estudio tiene una incidencia muy clara en proyecto porque orienta las determinaciones del mismo, obligando a representar los deterioros en planos de alzados y a proceder a la evaluación de los tratamientos en todos los documentos del proyecto -memoria, presupuestos, pliego de condiciones-. La alteración que tiene una incidencia mayor en los costes y previsiones de proyecto en el caso de una portada es la que representan las costras negras potenciadas por la contaminación atmosférica, ya que los procedimientos de limpieza deben contemplar la dificultad de eliminación de las mismas por su alta adherencia al soporte pétreo, haciendo necesario el láser en los casos más comprometidos, para evitar levantar el propio sustrato al tratar el elemento arquitectónico. El empleo del láser significa una elevación muy importante de los costos -en el proyecto de restauración de esta portada está valorado en 618,92 euros/m<sup>2</sup>-. En casos menos delicados es efectiva la limpieza con bisturí que estaría en un escalón de coste inferior -197,45 euros/m<sup>2</sup> para nuestro caso-. Con una perspectiva de coste aún menor,



Figuras 32 a 35.

Trabajos de limpieza con papeta en la portada

Trabajos de limpieza con bisturí en la portada

Prueba de limpieza con láser para el estudio petrofísico

Trabajos de limpieza con láser en la portada



Figura 36. Ensayo de pátina en un elemento restaurado

para aplicaciones en superficies de mayor entidad es recomendable el uso de papeta -41,22 euros/m<sup>2</sup>- pero habrá zonas que se resistan y exijan un tratamiento complementario y puntual con microchorro y un abrasivo estudiado para el caso. La limpieza será muy diferente en zonas sin costras ya que se conseguirán buenos resultados con el uso exclusivo de la papeta, con limpieza superficial con agua nebulizada o simplemente sin intervenir. En general desechamos un método de limpieza uniforme para toda la portada, prefiriendo la aplicación de sistemas distintos según el problema que se presenta. Creemos que con este criterio preservamos mejor las cualidades del elemento que restauramos aunque nos obligue a un estudio de las pátinas para valorar adecuadamente las diferentes zonas. Figuras 31 a 36

Esta primera aproximación al estado de conservación le sirve al autor del proyecto para hacer una evaluación económica general y corregir o afinar ante el cliente el presupuesto asignado a la intervención evitando desviaciones posteriores. Como precaución supletoria a la hora de medir y valorar debemos ser cautos para considerar todos los tratamientos y superposiciones de éstos que consigan el fin propuesto.

Otro aspecto importante que se deriva de este tramo del estudio es la posibilidad de acotar los límites de la intervención para situarla en el contexto adecuado. En un caso de gran influencia de la contaminación, causada en buena parte por la circulación de vehículos que en una calle estrecha convierte a la portada en un captador de humos y polvo, el proceso de conservación emprendido puede devolver al ciudadano una buena parte de las cualidades estéticas, formales y simbólicas de una portada que se convirtió en emblema compositivo en el renacimiento andaluz. Los tratamientos de hidrofugación y consolidación ayudarán durante un tiempo a rechazar o aminorar los efectos de nuevos depósitos, pero ese reencuentro será frustrante a medio plazo si no se plantea ante las administraciones públicas, Ayuntamiento de Granada y Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, una acción conjunta para erradicar o restringir al máximo el tráfico por la zona. Esta



puede ser una contribución extra de los equipos que intervienen en la restauración del patrimonio para cooperar en proyectos más complejos que incluyan acciones sobre el entorno, y progresivamente definan nuevas relaciones de los monumentos con la ciudad, con el ambiente. Los estudios analíticos contribuyen a poner en pie los argumentos, pronosticar una evolución en el tiempo, acotar una posible pérdida<sup>6</sup> si no se adoptan medidas de rango superior, y en definitiva facilitar el camino para tomar decisiones de otro nivel.

#### Modelos de alteración con tratamientos aplicados a las muestras de material pétreo

Buena parte de los resultados del estudio se apoyan en los modelos de ensayo de la piedra que determinaron la importante alterabilidad de la calcarenita frente a fenómenos de cristalización de sales y al ataque específico de agentes degradantes causados por la contaminación atmosférica. Las propiedades macroporosas de la calcarenita no han resultado ser un seguro suficiente respecto al deterioro porque la piedra tiene un bajo nivel de cementación de los granos. Al mismo tiempo, la presencia de partículas provenientes de la contaminación inciden de forma drástica como catalizadores en la producción de yeso, ocasionando, como hemos visto, pérdidas masivas e irreparables de material pétreo. Estos ensayos son una base decisiva para la intervención, porque dispondremos de un diagnóstico afinado sobre el estado de conservación de los materiales pétreos y sobre todo una idea detallada del proceso de degradación, su posible evolución en el futuro y una mayor seguridad respecto a las medidas que pueden adoptarse.

El estudio de la Portada del Perdón tiene además dos apartados sobre tratamientos de consolidación y protección a requerimiento del equipo que iba a redactar el proyecto de intervención, ya que nuestra experiencia en otros trabajos con la calcarenita nos había ofrecido resultados heterogéneos. Este apartado del estudio petrofísico daba una respuesta a las dudas del proyectista, cuestión que trae de la mano la conveniencia de

participar en el encargo de este tipo de trabajos; de hecho los equipos que realizan los estudios petrofísicos se dirigen habitualmente a los redactores del proyecto si éstos no han planteado las necesidades con carácter previo.

En lo que se refiere a los consolidantes el estudio establece sus recomendaciones sin necesidad de construir un modelo de alteración, ya que el equipo de analítica conocía el comportamiento de la calcarenita respecto a determinados productos por su colaboración en anteriores trabajos. Las resinas acrílicas se habían probado con deficientes resultados por una concentración excesiva del producto en estratos superficiales, que implicaba una discontinuidad importante con riesgo de caída de la costra consolidada respecto a los estratos inferiores inmediatos. El silicato de etilo se había mostrado muy eficaz tomando las precauciones debidas respecto a la aplicación: concentración, saturación y temperatura ambiente adecuada para su uso. Este consolidante no ocluye los poros, el producto que precipita es inorgánico, muy estable en el tiempo, compatible con la calcarenita y con excelente poder reagregante, mejorando la durabilidad frente a agentes de deterioro como el agua, el hielo – deshielo y la cristalización de sales. El estudio petrofísico recomendaba, en cualquier caso, que las consolidaciones con silicato etilo se llevaran a cabo solamente en las zonas con problemas de disgregación y que no se extendieran de forma generalizada a toda la portada.

La protección de la piedra era un aspecto importante de la intervención por los problemas de contaminación que se añaden a los que origina el agua. El equipo de analítica estableció un ensayo comparado con productos con base silicónica que se han elegido para la intervención por su buen comportamiento. Al mismo tiempo se analizaron polímeros floururados que se aplicaron a muestras de calcarenita de diferentes tipos, determinando también el buen comportamiento de uno de ellos que finalmente no se ha elegido para su aplicación.

Este es un apartado concluyente del estudio porque ha orientado de forma decisiva el proyecto de intervención en dos aspectos funda-

mentales como la consolidación y la protección, basándose en la evolución de los materiales a partir de ensayos específicos y la construcción de modelos de alteración que simulan las condiciones en las que se encuentra la portada. Algunos modelos de alteración y de comportamiento de la calcarenita realizados en este trabajo y otros similares podrían convertirse, a través de canales de información adecuados, en referencias que puedan ser utilizadas y desarrolladas para trabajos de intervención e intercambio de experiencias entre profesionales.

#### El seguimiento de los trabajos durante la intervención

Los estudios previos a la restauración, realizados con intensidad diferente según el programa de necesidades y el presupuesto, se han ido imponiendo progresivamente en nuestro contexto hasta ser algo relativamente frecuente en las intervenciones, por su aceptación a nivel metodológico y por la mayor seguridad y claridad que aportan al proyecto y a las inversiones, de forma que son parte del calendario que se establece para intervenir. Sin embargo queda más camino por recorrer en el seguimiento de los trabajos de restauración en el patrimonio inmueble. En algunos casos esta ausencia de seguimiento del estudio petrofísico ocurre porque la intervención tiene aspectos que entran en el control de calidad habitual referido a la estructura, albañilería, revestimientos, instalaciones etc. quedando descolgado el tratamiento de los materiales pétreos durante el transcurso de los trabajos, en otras circunstancias el propio proyecto tiene definida insuficientemente esa relación o aplicación, que durante la obra es difícil de instaurar cuando el proceso de la misma está en marcha.

En nuestra experiencia particular la presencia del geólogo, especialmente si de él ha dependido el estudio previo, nos ha resultado del máximo interés, y para el especialista el tajo de obra le ha devuelto aquellos aspectos que interesan realmente en la recuperación del material pétreo, haciéndole cambiar en su orientación y apreciaciones.

Nuestra recomendación es dar las pautas de seguimiento en el estudio petrofísico, y éstas incluirlas en el proyecto -memoria y pliego de condiciones-, para que tengan un detalle suficiente y la empresa adjudicataria adquiera un conocimiento del tema desde el momento que se presenta al concurso de adjudicación. En el transcurso de las obras hemos comprobado con frecuencia que estos aspectos de los documentos del proyecto son leídos con atención y su puesta en práctica es bastante fluida.

En el caso de la Portada del Perdón el seguimiento de la intervención se está llevando a cabo por parte del equipo que redactó el estudio petrofísico y ha resultado especialmente revelador respecto a la aparición de revocos de cal recubriendo la piedra, especialmente en zonas muy ornamentadas. El análisis de los revocos nos ha permitido identificar una composición en la que predominan la calcita y el cuarzo y en menor medida la dolomita y el yeso. Los revocos, con un espesor variable según las zonas, tienen un grado de adherencia al soporte desigual pero se van a conservar en todos los casos donde no exista degradación de la piedra o de su función protectora. Esto obligará a estudiar cuidadosamente las pátinas para entonar las diferentes zonas de la fachada.

La analítica propuesta en proyecto abarca también a los materiales que se van a usar en la restauración: cales, árido, pigmentos etc. Como dato curioso uno de los pigmentos ha sido rechazado porque el yeso era predominante en la composición. Es frecuente la preocupación por la relación entre el cemento y las sales que amenazan a tantas intervenciones, pero a veces éstas proceden de los áridos o de los propios pigmentos que pueden utilizar vehículos inapropiados y escasamente comprobados.

Aportamos finalmente unas recomendaciones para el seguimiento de las intervenciones que pueden servir como orientación general. Los aspectos que se proponen pueden seleccionarse en pliego y/o memoria a juicio del autor del proyecto, siendo conveniente hacer una advertencia en ambos sobre la vinculación entre los dos documentos y la obligatoriedad de cumplimiento de las especificaciones.

Guía indicativa para el seguimiento de las intervenciones

- Disponer en el pliego el uso del 1% del presupuesto para el control de calidad.
- Establecer con claridad el control de calidad de la obra definiendo:
  - Tipos de ensayos a efectuar.
  - Elementos a los que se aplica: piedra y sus tipos, aglomerantes, áridos, morteros preparados, pigmentos, cerámica -especialmente ladrillos por la incidencia de sales en revestimientos o en acabados de fábrica vista-, metales etc.
  - Reconocimiento y validación de productos industriales para tratamientos (consolidantes, protectivos, insecticidas, fungicidas, etc.)
  - Número de ensayos por elemento.
  - Control de recepción de materiales en el tajo de obra especificando en un formulario sencillo: fecha de recepción, tipo de material, fabricante, destino del material -general para toda la obra o específico de un trabajo concreto-. Esto le permite a la dirección de obra comprobar cambios posibles de materiales, fabricantes etc. y ordenar la conveniencia de comprobación mediante un nuevo ensayo

(procedimiento especialmente útil en cales o áridos que tienen una influencia decisiva en la marcha de los trabajos)

- Pautas para el control de la temperatura para la aplicación de tratamientos, puesta en obra de morteros y trabajos con aporte de agua.
- Pautas para la medición y control de la humedad tanto en problemas de ambiente que deban ser reacondicionados en obra, como en mediciones de la humedad en elementos constructivos, especialmente muros.

Las indicaciones que se han avanzado en esta contribución a la nueva edición del libro sobre técnicas de diagnóstico, proceden de nuestra experiencia en la restauración y de las observaciones que hemos recibido a lo largo del tiempo de profesionales y operarios de un espectro muy amplio de conocimientos. En los anexos que se acompañan se citan a buena parte de ellos, profesionales y empresas, esperando se disculpe cualquier omisión involuntaria. También se citan a las instituciones y administraciones responsables en diferente escala de los trabajos de restauración de la catedral de Granada. Conste como evidencia de la complejidad del proceso al que nos referimos y como agradecimiento a sus aportaciones

## NOTAS

1. En Granada se producen sismos diarios de baja intensidad que afectan especialmente a los elementos que destacan en el perfil de estos grandes monumentos y que de alguna forma reciben o liberan parte de la energía que se transmite desde los estratos inferiores.
2. El estudio se titula: Estudio petrográfico de la Portada del Perdón de la Catedral de Granada (1995).
3. Hemos preferido la denominación de estudio petrofísico en vez de estudio petrográfico porque en estos trabajos, además de los aspectos de composición o textura, se reseñan otro tipo de parámetros muy importantes para la intervención que se refieren al comportamiento cromático, porosimétrico, hídrico, mecánico etc. de los materiales. Además el análisis de tratamientos a aplicar, que forman parte fundamental de este tipo de estudios, abarca aspectos que también se separan de lo que estrictamente se entiende por estudio petrográfico.
4. Los contenidos que se especifican se han reelaborado a partir del trabajo realizado para la Portada del Perdón, por el Grupo de Investigación Estudio y conservación de materiales pétreos en edificios históricos.
5. Datos del estudio petrofísico de la Portada del Perdón para una muestra de una cornisa.
6. La contaminación no sólo facilita la formación de costras negras en las que es mayoritaria la presencia del yeso, sino también la penetración y/o formación de éste en estratos internos de la piedra, provocando destrucciones de bloques enteros de calcarenita a medio
7. En ladrillos de tejar con buen aspecto externo hemos encontrado yeso por haberse fabricado con arcillas contaminadas.

ANEXO 1  
TRABAJOS DE ANALÍTICA Y ESTUDIOS  
PETROFÍSICOS SOBRE LA CATEDRAL DE  
GRANADA.

E. Galán, catedrático de la Universidad de Sevilla, A. Martín, catedrático de la Universidad de Sevilla, M. Alcalde, ingeniero industrial; M. A. Bello, químico; M. Forteza, farmacéutica; M. A. Guerrero, bióloga; L. Martín, química; E. Mayoral, geólogo; M. J. Ortega, bióloga y M. A. Vázquez, geólogo. El estado de alteración de la piedra en el Conjunto Catedralicio de Granada. Información macroscópica, valoración global y plan de actuación. Granada, marzo de 1988.

Grupo de Investigación “Estudio y conservación de materiales pétreos en edificios históricos”, Universidad de Granada, Departamento de Mineralogía y Petrología. Estudio petrográfico de la Portada del Perdón de la Catedral de Granada. Granada, diciembre de 1995.

Grupo de Investigación “Estudio y conservación de materiales pétreos en edificios históricos”, Universidad de Granada, Departamento de Mineralogía y Petrología. E. Sebastián Pardo, M.J. de la Torre López, G. Cultrone, O. Cazalla, L. Linares, A. Luque. Análisis composicional y textural de los revocos y costras negras de la fachada de la Portada del Perdón (Catedral de Granada). Granada, abril de 2003.

ANEXO 2  
PROFESIONALES QUE HAN COLABORADO EN  
LAS INTERVENCIONES DE LA CATEDRAL DE  
GRANADA DESDE 1988.

Javier Algarra. Fotógrafo  
Antonio Almagro Gorbea. Arquitecto  
A. Almazán. Restituidor  
Fabio Aramini. Físico  
Juan Arenilla. Historiador del arte  
Raniero Baglione. Restaurador  
Sandro Bianchi. Historiador del arte  
Carlo Cacace. Físico  
Emilio Caro Rodríguez. Historiador del Arte

Susana Castro Rodríguez. Delineante  
María Cullell Muro. Arquitecta técnica  
Elisa Entrena Núñez. Arquitecta técnica  
Román Fernández Baca. Arquitecto  
Gabriel Ferreras. Historiador del arte  
Diego Garzón Osuna. Arquitecto  
Joan Albert Glatigny. Restaurador  
Antonio Gómez Becerra. Arqueólogo  
María José González. Restauradora  
Nicole Goudeberde. Restauradora  
Lamberto Guerrero. Especialista en tratamientos de la madera  
Ignacio Henares Cuéllar. Historiador del arte  
Nieves Jiménez Díaz. Archivera  
José Manuel Linares Felipe. Estudiante de arquitectura  
J.M. Lodeiro. Topógrafo  
Rafael López Guzmán. Historiador del Arte  
Manuel López Valdivieso. Arquitecto Técnico  
Jose María Losada. Historiador del arte  
Rocío Magdaleno. Restauradora  
Antonio Malpica Cuello. Arqueólogo  
María de Socorro Mantilla de los Rios. Restauradora  
Beatriz Martín Peinado. Restauradora  
Francisco Javier Martínez Medina. Historiador del arte.  
Luis Martínez Montiel. Historiador del arte  
Pedro Martínez Serna. Estudiante de arquitectura  
Lilian Maskeleine Kleiner. Química  
Fernando Matilla Galindo. Estudiante de arquitectura  
Miguel Ángel Mercado Hervás. Ldo. en Bellas Artes. Conservación y restauración obras de arte  
Araceli Montero. Restauradora  
Dionisio Olgoso Moreno. Licenciado en Bellas Artes. Especialidad de restauración pictórica  
G. Olivares. Fotógrafo  
Francisco Oliver Ruiz. Restaurador de obras de arte  
María José Ortega Gálvez. Restauradora.  
Inés A. Osuna Cerdá. Restauradora.  
Javier de Pablos Ramos. Historiador del Arte  
María Antonietta de Paolis. Arquitecta  
María Luisa Palomo Navarro. Licenciada en Geografía e Historia  
Catherine Perrier d’Ieteren. Historiadora del arte  
Antonio Puertas. Arquitecto técnico  
María Felisa Ramírez Martín. Arquitecta técnica

Angela Regio. Restauradora  
 Laura Rivas Medina. Historiadora del Arte  
 Manuel Robles Iglesias. Delineante  
 José María Rodríguez Acosta. Restaurador de obras de arte  
 Pedro Salinas Aivar. Estudiante de Arquitectura Técnica  
 Angela Salmerón Palomo. Ingeniera de Caminos  
 Lucía Salmerón Palomo. Técnica en audiovisuales  
 Federico Salmerón Escobar. Arquitecto  
 Pedro Salmerón Escobar. Arquitecto  
 J. Sandoval. Restituidor  
 Manuel Serrano Ruiz. Historiador del arte  
 Alejandro Suárez Rancaño. Restaurador de obras de arte  
 Benoit de Tapol. Conservador  
 Andrés Toro Mochón. Arquitecto técnico  
 Juan de Mata Vico Rodríguez. Arquitecto Técnico  
 Guido Van der Voorde. Físico radiólogo  
 María del Mar Villafranca Jiménez. Historiadora del arte  
 Santiago Yuste Rodríguez de Dios. Estudiante de arquitectura

Grupo de Investigación de la Universidad de Granada: “Estudio y Conservación de materiales pétreos en Edificios Históricos”.

Carlos M. Rodríguez Navarro. Geólogo  
 Eduardo M. Sebastián Pardo. Geólogo  
 Giuseppe Cultrone. Geólogo  
 Olga Cazalla Vázquez. Geóloga  
 María José de la Torre. Geóloga

Equipo de investigación sobre materiales pétreos de la Universidad de Sevilla.

M. Alcalde. Ingeniero industrial  
 M. A. Bello. Químico  
 M. Forteza. Farmacéutica  
 E. Galán. Geólogo  
 M. A. Guerrero. Bióloga  
 A. Martín. Químico  
 L. Martín. Química  
 E. Mayoral. Geólogo  
 M. J. Ortega. Bióloga  
 M. A. Vázquez. Geóloga

Director de los trabajos de restauración  
 Pedro Salmerón Escobar. Arquitecto

ANEXO 3  
 CONTRATISTAS PRINCIPALES QUE HAN COLABORADO EN LOS TRABAJOS DE RESTAURACIÓN DESDE 1988

CPA S.A.(Conservación del Patrimonio Artístico S.A.)  
 Construcciones Fernández Adarve  
 Alberto Domínguez Blanco. Restauración de Monumentos S.A.

ANEXO 4  
 INSTITUCIONES

Cabildo Catedralicio  
 Cabildo de la Capilla Real  
 Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía  
 Instituto Centrale per il Restauro, (ICR), Roma  
 Instituto del Patrimonio Histórico Español  
 Institut Royal du Patrimoine Artistique (IRPA), Bruselas  
 Ministerio de Educación y Cultura  
 Ministerio de Fomento  
 Parroquia del Sagrario  
 Universidad de Granada  
 Universidad Libre de Bruselas

Institución responsable de la dirección y coordinación de los trabajos  
 Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía  
 Dirección general de Bienes Culturales  
 Delegación de la Consejería de Cultura en Granada  
 Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico