
CUADERNOS

T É C N I C O S



METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE
TRATAMIENTOS PARA LA CONSERVACIÓN DE LOS
EDIFICIOS HISTÓRICOS

© JUNTA DE ANDALUCÍA
Consejería de Cultura

Año de edición: 2003

Autores varios

Coordinación editorial: Rosario Villegas Sánchez y Eduardo M.
Sebastián Pardo

Secretaría: Fátima Marín

Foto de portada: Detalle de plano del Puente Nuevo de Ronda.
Aldehuela, 1786. Archivo General de Simancas

Diseño de la colección: Marcelo Martín

Maquetación: Manolo García

Fotocomposición e impresión: Editorial Comares - Granada

ISBN: xx-xxxx-xxx-x

Depósito Legal: xx

CUADERNOS
T É C N I C O S

Metodología de diagnóstico y
evaluación de tratamientos para
la conservación de los edificios
históricos

Presentación

Julián Martínez García
Director General de Bienes
Culturales

La protección y conservación del Patrimonio Inmueble precisa de una fase de conocimiento e investigación previos que debe utilizar las técnicas de análisis y ensayo que actualmente están disponibles y que permiten caracterizar perfectamente los materiales, su estado de conservación y definir las causas y los mecanismos de deterioro.

La restauración y conservación de los monumentos ha evolucionado desde las artes plásticas y los oficios hasta un conocimiento científico, de forma que la fase de tratamiento sólo puede concebirse como una actuación integrada que requiere de las diversas aportaciones de equipos interdisciplinares.

Cualquier intervención sobre un objeto histórico debe de seguir el desarrollo común a toda metodología científica: investigación de las fuentes, análisis, interpretación y síntesis. Sólo en estas condiciones, el trabajo realizado preserva la integridad física del objeto y hace accesible su significado. Esta aproximación aumenta nuestra capacidad de descifrar el mensaje y contribuye, de esta forma, a un nuevo reconocimiento. Actualmente no se comprende únicamente la conservación del monumento aislado; éstos necesitan la protección de su entorno inmediato y del sitio histórico, sin la cual pierden gran parte de su sentido social y cultural. De ello se desprende la necesidad de una valoración especializada de aspectos diversos, como las estructuras, las técnicas constructivas y los materiales, además del entorno natural, antrópico y biótico.

El conocimiento correcto de las herramientas científicas disponibles permite obtener el máximo partido de las mismas. Entre las cuestiones que pueden plantearse, destaca saber qué puede esperarse de ellas, pero también es importante la definición de otros aspectos, tales como las técnicas correctas de muestreo, la duración temporal del proceso analítico y el margen de confianza de los resultados que se obtienen.

En cualquier caso, en un área de conocimiento tan amplia resulta difícil dominar los diversos parámetros presentes. Por ello se hace necesario reflexionar acerca de una metodología de trabajo que permita definir las actuaciones más adecuadas a la hora de intervenir en un edificio histórico; se debe entender el análisis científico como un auxi-

lio que tendrá la profundidad y el rigor que cada circunstancia precise, sin excesos injustificados. Es decir, el estudio del material y de sus patologías no es una finalidad en sí mismo, sino un instrumento básico para las determinaciones proyectuales y por tanto ligado a una finalidad real, cual es la conservación del patrimonio.

Para intentar dar respuesta a todas estas preguntas y facilitar a los profesionales responsables de la conservación del Patrimonio Inmueble el conocimiento de su utilidad, la Consejería de Cultura, a través del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, ha impartido el curso “Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos” que ya ha cumplido la décima edición y cuyos contenidos fundamentales se recogieron en un volumen del mismo título publicado por la Consejería en 1996.

Siete años después se vuelve a editar un libro relacionado con el mismo, en el que se recogen los contenidos fundamentales del curso, que se han ido depurando con el tiempo y la experiencia, agrupados en capítulos que reflejan la metodología a aplicar para llevar a cabo el diagnóstico y la propuesta de tratamiento.

Esperamos que sea tan útil como el anterior para todos aquellos profesionales relacionados con la conservación del Patrimonio Inmueble y que cumpla su objetivo principal, dar a conocer las técnicas científicas aplicables al estudio de los materiales y la información que pueden proporcionar.

Quiero expresar nuestro agradecimiento al Grupo de Investigación sobre “Alteración y Conservación de materiales pétreos en Edificios Históricos”, de la Universidad de Granada, promotor del curso desde su origen así como de la publicación de este y del anterior libro, además de asiduo colaborador del Instituto en sus actividades investigadoras sobre el Patrimonio Inmueble andaluz. Deseamos que esta fructífera cooperación se mantenga y amplíe en actuaciones futuras.

9	I. INTRODUCCIÓN: METODOLOGÍA DE ESTUDIOS PREVIOS Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO
	Manuel Alcalde Moreno, Rosario Villegas Sánchez
21	II. MATERIALES Y ALTERACIONES
22	1. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA DE ROCAS ORNAMENTALES Y DE CONSTRUCCIÓN DE USO EN LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS
	Nicolás Velilla Sánchez
36	2. MORTEROS DE RESTAURACIÓN Y MORTEROS ANTIGUOS TÉCNICAS DE ESTUDIO
	Olga Cazalla Vázquez María José de la Torre López
48	3. LOS MATERIALES CERÁMICOS EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO
	Eduardo Sebastián Pardo & Giuseppe Cultrone
58	4. INDICADORES DE ALTERACIÓN DE LOS MATERIALES PÉTREOS
	Manuel Alcalde Moreno Rosario Villegas Sánchez
72	5. FACTORES BIOLÓGICOS DE ALTERACIÓN
	Marta Sameño Puerto
95	III. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
96	1. LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO
	Eduardo M. Sebastián Pardo
104	2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DE LOS MATERIALES LAPÍDEOS.
	María José de la Torre López

3. UTILIDAD DE LA MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO EN EL ESTUDIO Y CONSERVACION DEL PATRIMONIO HISTORICO María José de la Torre López	112
4. FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA MICROSCOPIA Carlos Rodríguez Navarro	122
5. ANÁLISIS POROSIMÉTRICO DE ROCAS ORNAMENTALES Carlos Rodríguez Navarro	134
6. LAS ROCAS EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO: NORMAS Y REFERENCIAS PARA LA INVESTIGACIÓN CON TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO UGO ZEZZA ®	154
IV. TRATAMIENTOS	167
1. TIPOLOGÍA DE MATERIALES PARA TRATAMIENTO Raniero Baglioni. Rosario Villegas Sánchez. Marta Sameño Puerto.	168
2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y ESTUDIO PREVIO DE TRATAMIENTOS Rosario Villegas Sánchez.	194
3. EL PAPEL DE LA ANALÍTICA DE LOS MATERIALES EN LA RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO INMUEBLE Pedro Salmerón Escobar	208



I. Introducción: metodología de estudios previos y propuesta de tratamientos

1. Introducción
2. El proyecto de restauración. Fase de estudios previos
3. Caracterización de materiales y factores de alteración
4. Propuesta y evaluación de tratamientos
5. Programa de seguimiento

Introducción: metodología de estudios previos y propuesta de tratamientos

Manuel Alcalde Moreno

Profesor Titular Dpto. Ingeniería Química y Ambiental. Univ. Sevilla

Rosario Villegas Sánchez

Dpto. Análisis. IAPH

1. INTRODUCCIÓN

El creciente deterioro que en el último siglo han sufrido los materiales constitutivos del Patrimonio Inmueble, junto con una mayor conciencia sobre las necesidades de conservación del mismo, han producido un auge en las intervenciones de conservación-restauración en monumentos.

En una etapa inicial, la urgencia con la que debían acometerse algunas intervenciones para evitar la destrucción completa de la obra, además del desconocimiento de los mecanismos involucrados en los procesos de alteración de los materiales, han sido la causa de actuaciones poco afortunadas que, en ocasiones, han dado como resultado aquéllo que se pretendía impedir.

El estado actual de conocimientos y la experiencia que numerosos investigadores han alcanzado en el estudio de los factores y mecanismos de deterioro, así como la información que se posee sobre los resultados de diferentes productos y técnicas de tratamiento, hacen que no sea aceptable la intervención sin un conocimiento previo lo más amplio posible de lo que está sucediendo en el edificio.

Este libro pretende reunir una metodología para el estudio de la alteración de la piedra de los monumentos y de las medidas de conservación, que puede ser útil a la hora de elaborar un proyecto de restauración o, al menos, que ayude a clarificar los criterios que los responsables de un monumento han de manejar a la hora de tomar decisiones. También se pretende mostrar el papel que las distintas técnicas científicas pueden jugar, dando apoyo a la toma de decisiones en cualquier fase de la intervención.

En esta introducción se hace una síntesis y se presenta una visión global de dicha metodología y en los sucesivos capítulos se desarrollan cada uno de los puntos aquí expuestos.

2. EL PROYECTO DE RESTAURACIÓN. FASE DE ESTUDIOS PREVIOS

El proyecto de restauración debe contener todas las actuaciones que vayan a realizarse sobre el monumento, tendentes a su conservación. Las improvisaciones que pudieran surgir en el transcurso de la obra deben quedar reducidas al mínimo y, en cualquier caso, deben quedar reflejadas en un informe final.

Las actuaciones que se propongan en el Proyecto serán las dictadas por los resultados obtenidos en la etapa de estudios previos, cuya primera fase sería la de diagnóstico. En ella se realiza la investigación de los factores de alteración, agentes causantes de los mecanismos que han provocado transformaciones en las propiedades de la piedra, lo que se manifiesta como indicadores de alteración. La segunda parte se centraría en la propuesta de medidas correctoras, estudiando el efecto inhibitorio que los posibles tratamientos puedan ejercer sobre las causas de deterioro. Hay que insistir que toda actuación que no haya sido investigada en su relación causa-efecto no debe llevarse a cabo en un monumento histórico.

El examen y descripción de las alteraciones debe de comprender una observación detallada del edificio, incluyendo un inventario de los tipos de piedra utilizados y la historia de los tratamientos a los que ha sido sometido. Para determinar

los factores de alteración es necesario conocer la naturaleza de la piedra y el medio en que ésta se encuentra.

Los mecanismos de alteración se investigan a través de ensayos en los que las piedras son sometidas, de forma controlada, a factores de alteración. Una vez determinados los mecanismos se estará en condiciones de realizar una propuesta de los tratamientos que se consideren adecuados que, en cualquier caso, deberán ser estudiados a su vez antes de su aplicación al monumento. Lo ideal sería poder actuar sobre los factores de deterioro, ya que eliminando la causa desaparece el efecto, pero normalmente esto no es posible (al menos completamente) por lo que los tratamientos se centran en proteger los materiales del efecto de dichos agentes de alteración.

El proyecto debe contemplar también un programa de seguimiento de la evolución de las intervenciones realizadas. Esto será útil para llevar a cabo el correcto mantenimiento del edificio, actuando de forma rápida cuando aparezcan alteraciones. Pero también es importantísimo conocer la evolución de las soluciones adoptadas porque estos datos pueden ser extrapolados a otras intervenciones, tanto si son positivos como negativos.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y FACTORES DE ALTERACIÓN

Las fuentes que pueden proporcionar información sobre las características de los materiales y del medio que rodea y afecta al edificio, es decir, los factores de alteración son:

3.1. Historia del monumento

Como fase previa, a través del estudio de los archivos del propio monumento, de los ayuntamientos, de arquitectos que han intervenido, fondos fotográficos, trabajos de investigación anteriores, obras literarias, hemerotecas, inscripciones en el edificio como marcas de canteros, fechas, símbolos, etc. se han de extraer todos los conocimientos posibles acerca de los materiales que se han empleado en la construcción, cante-

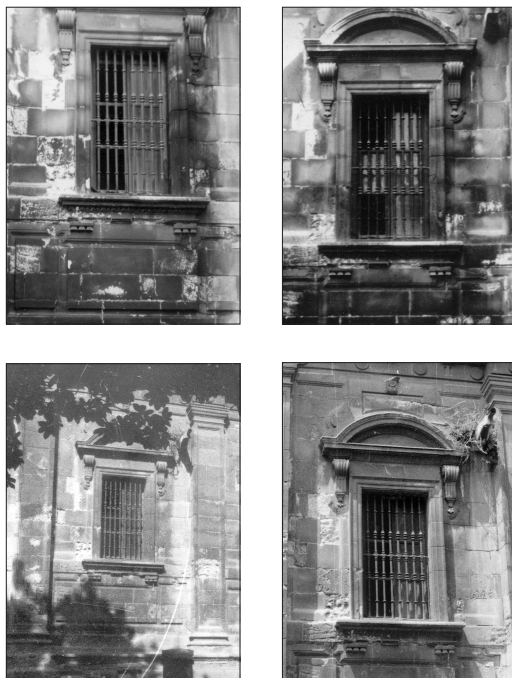


Figura 1. Historia material. Evolución de alteraciones de la Catedral de Sevilla

ras de origen, distribución de materiales en el edificio, sustituciones, reparaciones, restauraciones y tratamientos realizados, vicisitudes históricas como terremotos, incendios, guerras, etc.

3.2. Indicadores visuales de alteración

La morfología macroscópica de las alteraciones que la piedra presenta en el monumento dan información acerca de la naturaleza de la misma y de los factores y mecanismos que han intervenido. Esta fase, de difícil traducción a valores cuantitativos, es, sin embargo, de gran valor a la hora de orientar la selección de los tratamientos más adecuados y de definir los ensayos que deben realizarse para evaluar el comportamiento del material después de tratado. Por esta difícil cuantificación, una buena documentación fotográfica es imprescindible para dejar constancia objetiva de las observaciones realizadas.

También es importante que los indicadores sean designados mediante una nomenclatura precisa, evitando en lo posible los términos ambiguos y los genéricos. (En este mismo libro se recoge una propuesta de terminología de indicadores de alteración).

3.3. Naturaleza de los materiales: factores intrínsecos de alteración

Una vez realizado el examen visual sobre el monumento y conocidas las canteras de origen, es necesario caracterizar los materiales, tanto alterados como inalterados, por lo tanto, en el caso de la piedra deberá estudiarse tanto en el

monumento como en la cantera. En ambos casos se comienza con la toma de muestras que, en el caso del monumento estará limitada en cantidad y número por el criterio, lógico, de producir el menor daño posible al mismo, y en las canteras, donde esta limitación desaparece, buscando que sean, dentro de las heterogeneidades que se presentan en toda cantera, similares a las usadas en el monumento. Esta correspondencia monumento-cantera debe venir avalada posteriormente por los resultados de los análisis que se efectúen.

a) Composición química

La naturaleza química de la piedra está muy ligada a su alterabilidad. Así, por ejemplo, las piedras calizas, de carácter básico, son más reactivas frente al medio ambiente urbano, normalmente ácido, que las silíceas. Deben analizarse los componentes mayoritarios (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 y pérdida por calcinación), responsables principales del comportamiento químico, y, en aquellos casos en que es necesaria la identificación precisa de los litotipos, los elementos traza (Pb, Ti, Zn, Cu, Ni, Co, Mn...). También pueden establecerse correlaciones entre el grado de alteración y la composición química. Es importante determinar, si existen, el contenido y tipo de sales solubles en la piedra.

b) Composición mineralógica

La alterabilidad de la piedra no depende solo de su composición química, sino también de las formas cristalinas que los compuestos adoptan. Algunos mecanismos de alteración residen preci-

Tabla 1. Composición química mayoritaria de muestras de la Catedral de Sevilla

Muestra	Calcita (%)	Cuarzo (%)	Yeso (%)	Plomo (ppm)
S5O (exterior)	48,63	38,05	14,84	159
S5O (interior)	54,20	44,02	1,15	92
S2O (exterior)	47,27	19,88	39,95	313
S2O (interior)	80,57	18,29	0,12	148

samente en la conversión de unos minerales en otros, sin que por ello haya cambio en la composición química global. Es el caso, por ejemplo, del incremento de volumen asociado a la hidratación-deshidratación de sustancias higroscópicas, o a la hidrólisis de los feldespatos en que la ortoclasa se convierte en caolinita o en sericita. Distintas variedades alotrópicas pueden implicar alterabilidades diferentes. Incluso la anisotropía de los cristales origina alterabilidades diferentes según sea la orientación.

c) Características petrográficas

Además de la composición química y mineralógica es necesario conocer la textura y estructura de la piedra. Es conocido, por ejemplo, que una piedra caliza porosa es más alterable que un mármol. Así, el tamaño de grano, tipo y grado de cementación, estratificación, defectos cristalinos, etc., propiedades que están relacionadas con el origen de la roca, según sea éste sedimentario, metamórfico o ígneo, van a determinar en gran medida la alterabilidad del material.

d) Propiedades físicas, hídricas y mecánicas

La porosidad, que nos informa sobre la compacidad del material, la porometría y las características del sistema poroso, que nos dan la distribución de tamaños de poros y las conexiones entre ellos, tal vez sean las determinaciones más utilizadas, debido a la importancia que en la alteración tiene la presencia y circulación de agua. El estudio del movimiento de agua es importante tanto en forma de vapor, mediante medidas de humedad de equilibrio con el aire y curvas de evaporación, como en forma líquida, a través de la absorción del agua procedente de una superficie libre o de una película depositada sobre el material, o bien, mediante absorción por inmersión progresiva, completa, a ebullición, a presión elevada, reducida o por capilaridad. Los ensayos de absorción por inmersión y los de capilaridad pueden convertirse en ensayos cinéticos en los que se estudia la evolución del contenido de agua con el tiempo. El conocimiento del sistema

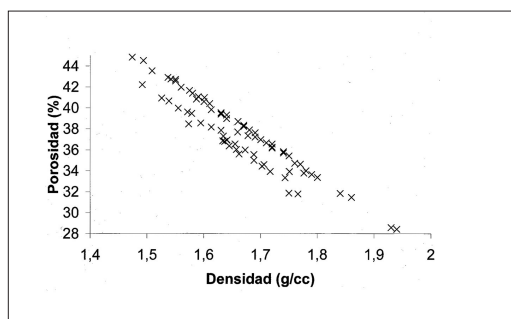
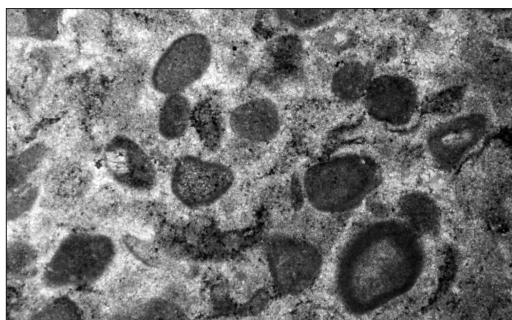


Figura 2. Indicadores visuales de alteración: alveolización, iglesia de Santiago de Guadix
Figura 3. Estudio mineralógico-petrográfico. Caliza de Puente Tablas (Jaén)
Figura 4: Propiedades físicas de probetas de Huelva

poroso se hace más necesario si han de aplicarse tratamientos que deben penetrar en la piedra. También es muy importante la permeabilidad del material al vapor de agua y, especialmente, las modificaciones que se producen al tratarlo.

Los métodos que determinan las propiedades mecánicas del conjunto de la piedra (resistencia a la flexión, compresión, tracción y adherencia) tienen el inconveniente de tratarse de ensayos destructivos que necesitan probetas relativamente grandes y en número elevado. No obstante, la determinación de las características de transmisión del sonido y de la frecuencia de resonancia son técnicas no destructivas que dan información indirecta sobre la calidad de la piedra, alteraciones no visibles y propiedades elásticas. Las propiedades mecánicas superficiales de la piedra están ligadas a la dureza superficial, que puede relacionarse con la dureza por penetración, rebote, rayado y desgaste.

3.4. Factores extrínsecos

Una vez conocida la naturaleza de la piedra, es necesario estudiar los factores externos que pueden originar cambios en sus propiedades. Éstos pueden ser naturales o antropogénicos, siendo la contaminación atmosférica la principal causante de la aceleración que han experimentado los procesos de degradación, sobre todo a partir de la revolución industrial.

Tabla 2. Contaminación en el centro urbano de Sevilla

Contaminante	Concentración
SO ₂	55 µg / m ³
Humos	55 µg / m ³
Materia sedimentable	260 µg/m ² día
Plomo	1,45 µg / m ³
Partículas en suspensión	250 µg / m ³

a) Climatología

El Instituto Nacional de Meteorología y los Ayuntamientos proporcionan datos climatológicos de la zona pero, en casos concretos, puede que sea necesario hacer un estudio del microclima en el propio monumento. De los datos térmicos lo que más interesa conocer son las oscilaciones entre máximos y mínimos, los máximos en verano, y si se alcanzan en invierno temperaturas inferiores a -4º C, que es cuando comienzan los fenómenos de heladicidad. Las oscilaciones de humedad son importantes cuando intervienen procesos de hidratación-deshidratación de sales. También hay que conocer las velocidades y orientaciones de los vientos, sobre todo de los dominantes, y la pluviometría.

b) Medio ambiente

También en este caso será necesario completar los datos de contaminación atmosférica suministrados por los Servicios de Medio Ambiente locales o regionales con medidas efectuadas en el ambiente próximo al monumento. De los gases interesa conocer, especialmente, el anhídrido sulfuroso, causante principal del ataque ácido, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos, que intervienen en la formación del smog fotoquímico y en la producción de contaminantes secundarios, es decir, originados por reacciones en la atmósfera; en zonas cercanas a plantas de tratamientos de residuos urbanos o de fabricación de fertilizantes, el amoníaco, de actividad catalítica y modificador del pH.

De las partículas sólidas, lo más importante es la cantidad de polvo sedimentable, que se deposita directamente sobre la piedra, pero también el polvo en suspensión participa catalizando reacciones atmosféricas. Las sustancias más activas de los depósitos son los ácidos, las sales solubles y los elementos catalizadores como hierro, vanadio y carbono.

De la humedad ascendente interesa, sobre todo, el contenido de sales, por lo que es deseable disponer de análisis de agua del subsuelo. Las fluctuaciones del nivel freático pueden afectar al estado de hidratación de las sales presen-

tes en las zonas bajas del edificio, por lo que debería medirse a lo largo de un ciclo climático completo.

c) Agentes biológicos

Se consideran aquí desde microorganismos, bacterias, algas, hongos... hasta plantas superiores y animales. Las bacterias más importantes son las autótrofas implicadas en los ciclos del azufre y del nitrógeno. La acumulación de agentes en lechos espesos provocan retenciones de humedad y favorecen las reacciones químicas. Las raíces de las plantas superiores ejercen una acción mecánica y sus exudados a veces son ácidos. El guano de palomino contiene ácidos fosfórico y nítrico, y acumula humedad, lo que, además, favorece la proliferación de otros organismos.

d) Otros factores

Por último, otros factores que pueden intervenir en la alteración son los de tensión, entre los que se incluye el labrado de la piedra, su forma de colocación en la obra, las cargas que recibe; los de incompatibilidad, como la unión de materiales de diferentes coeficientes de dilatación o el embutido en la piedra de elementos metálicos oxidables; y los de uso, cajón de sastre donde se incluyen el resto de los factores como la situación geográfica (por ejemplo, proximidad al mar), estructura urbana de la zona, vibraciones, y todos los relacionados con el uso y abuso del monumento (entre los que hoy día no es desdeñable el de las visitas masivas).

3.5. Determinación de los mecanismos de alteración

Se entiende por mecanismos de alteración los procesos que se originan en la piedra cuando sobre ella actúan los factores de alteración y que conducen a cambios en sus propiedades o indicadores de alteración. Por ejemplo, la acción conjunta de la presencia de sales y de las oscilaciones de humedad produce cambios de volumen en los capilares e intersticios que



Figura 5. Factores biológicos de deterioro. Puerta de Córdoba de Carmona antes de la restauración

Figura 6. Incompatibilidad de materiales: uso de plomo como aislante de elemento ferroso

pueden conducir a rupturas internas o a desagregaciones. Estos mecanismos pueden agruparse en

a) Abrasión externa

Aquí estarían los procesos de remoción y transporte de materia debidos a la acción erosiva de la lluvia, hielo superficial y viento con partículas en suspensión, y que implican siempre una reducción del relieve. Generalmente tienen poca importancia en piedras sanas y adquieren cierta magnitud en las alteradas mediante procesos de disolución o cambio químico, por el arrastre de los granos ya disgregados.

b) Cambio de volúmen de la piedra

La conductividad térmica de las piedras es muy baja por lo que diferencias de temperatura en su seno son causa de expansiones diferenciales que originan fuerzas disruptivas. Han de considerarse también las provocadas por diferencias en los coeficientes de conductividad térmica entre diversos minerales de un material y entre materiales diferentes unidos entre sí.

c) Cambios de volúmen en capilares y poros

La expansión térmica del agua contenida en los poros, el incremento de volumen producido al congelar ésta, el crecimiento de los cristales de sales y los procesos de hidratación y deshidratación son causa de tensiones internas que pueden superar la resistencia a la compresión del material adyacente. La microporosidad está relacionada con la alterabilidad por heladicidad y cristalización.

d) Disolución de la piedra o cambio de forma química

En estos mecanismos es primordial el papel desempeñado por el agua como disolvente, ya actuando directamente sobre los componentes de la piedra, ya formando soluciones que reaccionarán químicamente con la piedra, por ejemplo, disoluciones ácidas de los contaminantes atmosféricos. Los mecanismos de acceso del

agua más importantes son la lluvia, la humedad ascendente y la condensación.

Los mecanismos de cambio químico más importantes son los derivados de la acción del anhídrido carbónico y del anhídrido sulfuroso. El anhídrido carbónico disuelto en agua favorece la disolución de los materiales calizos a través de la formación de bicarbonato cálcico soluble. El anhídrido sulfuroso, bien por medio de la deposición seca del mismo o por la acción del ácido sulfúrico previamente formado en la atmósfera, conduce a la formación de sulfato cálcico en las piedras calizas.

e) Actividad biológica

Los mecanismos de actuación pueden clasificarse en dos, uno de naturaleza física consistente en la destrucción mecánica causada por el crecimiento de raíces de plantas, musgos, hongos, etc., y otro de tipo químico causado principalmente por ácidos, como los aportados por las bacterias nitrificantes o el fosfórico de los excrementos de palomas.

Aunque esta formulación parece sencilla, este tema, sin embargo, es el gran desconocido en el estudio de la alteración de la piedra. Se pueden conocer y cuantificar los factores, se pueden medir los cambios de propiedades, pero es difícil conocer con exactitud los mecanismos que han ocurrido. Por ello, en investigación se ha recurrido a la realización de ensayos de alteración en los que las piedras son sometidas de forma controlada a diversos factores de alteración y se estudian los cambios producidos. El objetivo ideal es reproducir los mismos mecanismos que tienen lugar en el monumento para, así, poder seleccionar los tratamientos adecuados para frenar su efecto. Las dos dificultades que impiden alcanzar este ideal son, por un lado, la complejidad de factores simultáneos que intervienen en la realidad y, por otro, la necesidad de obtener resultados en un tiempo razonable, lo que obliga a realizar los ensayos de forma acelerada, y esta intensificación en los agentes de alteración podría dar lugar a mecanismos diferentes.

4. PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS

La segunda etapa en el proyecto es la propuesta y evaluación de tratamientos. Aquí se van a considerar sólo los tratamientos que actúan directamente sobre los materiales, no los de tipo estructural o arquitectónico.

4.1. Tipos de tratamientos

La intervención sobre los materiales tiene como finalidad intentar devolverles sus características originales y protegerlos de la acción de las causas de deterioro. Para ello, se debe eliminar toda materia extraña a la piedra y reintegrarle sus propiedades; de esta forma, el tratamiento puede descomponerse en las siguientes etapas:

- Limpieza, con la que se pretende eliminar tanto el material que se haya depositado sobre la piedra (p.e. partículas carbonosas) como el que proceda de transformaciones químicas de los constituyentes de la misma (p.e. yeso). Cuando el estado de conservación del material así lo requiera puede ser necesario llevar a cabo una preconsolidación

antes de la limpieza, para evitar la pérdida de fragmentos.

- Eliminación de organismos; con el uso de productos biocidas se eliminarían los distintos tipos de organismo, micro y macroscópicos, que constituyen un importante factor de alteración.
- Consolidación, cuya finalidad es devolver la cohesión a la piedra que la ha perdido. Es muy importante tener en cuenta que esta fase del tratamiento sólo debe realizarse cuando sea necesario y no de forma sistemática.
- Hidrofugación, llamada también protección, ya que su objetivo es impedir (o al menos disminuir) la entrada de agua líquida en la piedra, con lo cual ésta queda protegida frente a la mayoría de los factores de alteración, que necesitan el concurso del agua para actuar.

4.2. Evaluación de tratamientos: ensayos de alteración

La evaluación de los tratamientos, previamente a su aplicación en el edificio, tiene como objetivo conocer el comportamiento del material

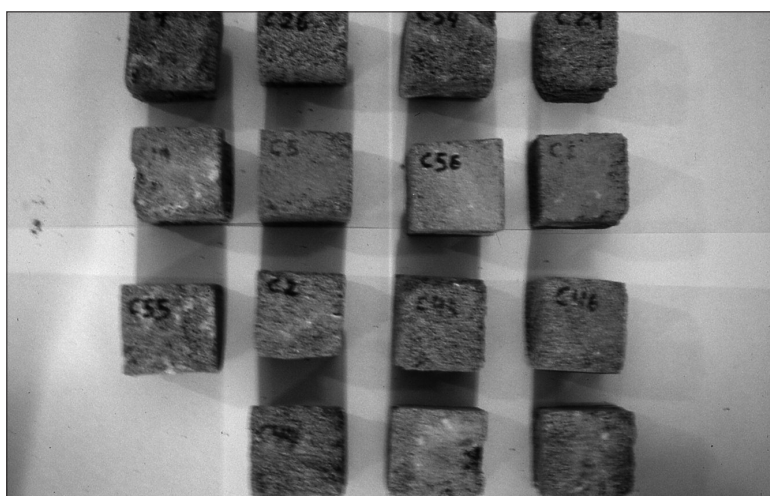


Figura 7. Probetas de Huelva tras ensayo de cristalización de sales

tratado bajo la acción de los factores de alteración. Puede realizarse de dos formas:

- efectuando aplicaciones controladas en pequeñas áreas del monumento y determinando los efectos que se producen (con ayuda de las distintas técnicas de análisis).
- aplicando los tratamientos a probetas de los materiales de los materiales pétreos existentes en el edificio y someténdolas a ensayos de alteración acelerada para determinar su eficacia y alterabilidad.

En algunos casos (tratamientos de limpieza o biocidas), la segunda opción no es posible, por lo que debe recurrirse a realizar pruebas in situ. Para los consolidantes e hidrófugos, es deseable siempre realizar ensayos previos en laboratorio, donde se reproduzcan los mecanismos de alteración observados en el edificio.

Los distintos ensayos de alteración acelerada se pueden agrupar en cinco tipos, que se describen en un capítulo posterior:

- Hielo/deshielo
- Cristalización de sales
- Ciclos termohigrométricos
- Ensayos con radiación UV
- Ataque químico con soluciones o atmósferas contaminadas

5. PROGRAMA DE SEGUIMIENTO

Como capítulo final del Proyecto de intervención, debería tenerse previsto un programa de seguimiento general del edificio y, específicamente, del comportamiento de los materiales tras la intervención, especialmente cuando se hayan aplicado productos de tratamiento, dado que la vida útil de cualquiera de ellos es limitada. Fundamentalmente se basará en inspecciones periódicas del edificio, realizando algunas determinaciones in situ que permitan cuantificar el estado de los materiales tratados, por ejemplo, medida de la velocidad de ultrasonidos en zonas consolidadas, para valorar la pérdida de propiedades mecánicas, determinación de la absorción de agua in situ en las zonas hidrofugadas, observación al microscopio electrónico de muestras tratadas para comprobar si la película de producto se altera.

Un programa de seguimiento de este tipo permitiría corregir las alteraciones que se vayan produciendo en sus etapas iniciales (por tanto de forma menos costosa) y, sobre todo, proporcionaría una información muy valiosa para futuras intervenciones en el mismo edificio o en otros que se encuentren sometidos a condiciones semejantes o que estén contruidos con materiales del mismo tipo.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDE, M.; VILLEGAS, R.; VALE, J.; MARTÍN, A.: Diagnóstico y tratamiento de la piedra. CSIC/ICCET, Monogr. n.º 400. Madrid, 1990.

ANGELIS D'OSSAT, G.: Guide to the methodical study of monuments and causes of their deterioration. ICCROM. Rome, 1982.

DOMASLOWSKI, W.: La conservation préventive de la pierre. UNESCO, 1982.

MARTÍN, A.: Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés

histórico artístico. Ceura. Madrid, 1990.

TOMBACH, I.: Measurement of local climatological and air pollution factors affecting stone decay. Conf. Nat. Ac. Sc. Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments. 2-4/II/1981.

VALE, J.; MARTÍN, A.: Ensayos de materiales en atmósferas controladas. Univ. Sevilla, 1985.

TORRACA, G.: Porous Buildings Materials Science for Architectural Conservation. ICCROM. Rome, 1982.