

Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico.

ANTONIO MARTIN PEREZ, DR. EN CIENCIAS QUIMICAS.

RESUMEN En las conclusiones del Encuentro Europeo sobre el Patrimonio Histórico Artístico y Contaminación (Madrid 19-21 Nov. de 1992) se señala que "la Restauración Patrimonio Histórico-Artístico debe estar precedida de un estudio diagnóstico apropiado", "cualquier, material, producto o método de mantenimiento deben ser ensayados con anterioridad".

En este artículo se resume la metodología general para caracterizar los materiales pétreos empleados en la construcción de obras monumentales, juzgar su grado de alteración, establecer los mecanismos de alteración y evaluar y controlar los posibles tratamientos de conservación de los mismos.

SUMMARY In the conclusions reached by the European Encounters on Artistic and Historical Heritage and Pollution (Madrid 19 th to the 21 st of November 1992) it is pointed out that "The Preservation of Historical and Artistic monuments must be preceded by an appropriate diagnostic Study", "Any material, product, or method of maintenance must be previously tested".

In this article the general methodology to characterize the stone material used in the building of monuments is summarized. The judgement of the degree of alteration, the establishment of the mechanisms of change and the control of the possible preservation treatment of the stone material are also aspects dealt with.

INDICE GENERAL

1. Generalidades 2. Medidas preventivas y tratamientos de conservación 3. Experiencias de alteración acelerada

1. GENERALIDADES

Los edificios históricos de piedra tienen valores emocionales (de admiración, espirituales, simbólicos,...) culturales (técnicos, históricos, documentales, arqueológicos, estéticos, urbanísticos, paisajísticos,...) y de uso (funcionales, económicos, sociales, políticos,...), que es necesario conservar como Patrimonio de la Humanidad.

La conservación de los edificios históricos comprende todas las actuaciones que prolongan la duración de dicha herencia cultural y que permiten, por ello, su utilización y disfrute ahora y en el futuro.

Sólo a través de la comprensión de los mecanismos de alteración de los materiales pétreos y de los procesos de deterioro de las estructuras de las que forman parte, podemos prolongar la vida de nues-

tros edificios históricos; partiendo siempre de la base de que su deterioro es una ley inexorable de la naturaleza y de que sólo podemos ralentizar dichos procesos degradativos.

Es indispensable, pues, no separar la investigación sobre las causas de la alteración de la piedra de un edificio de interés histórico artístico de aquella sobre los posibles trabajos de conservación a efectuar en él. La realización de una serie de ensayos y experiencias de alteración dirigidas a dilucidar las fuerzas destructivas que provocan la alteración de la piedra, permitirá elegir los mejores métodos para contrarrestar dichas fuerzas.

Es necesario, por ello, establecer métodos normalizados que permitan identificar los procesos de alteración de las piedras y examinar la efectividad de los productos usados en la conservación de las mismas.

Antes de hacer frente a los problemas relativos al deterioro de una obra de arte de piedra, es necesario buscar toda aquella información relativa a la misma que, conjuntamente con los resultados de ensayos y experiencias de laboratorio, permita conocer los factores y los posibles mecanismos de alteración. La información a recabar debe abarcar no solo a la obra monumental, sino también a su entorno, principalmente al más inmediato. Es importante también adquirir toda la información disponible sobre las condiciones ambientales a las que ha estado expuesta la piedra en el pasado, y en la actualidad.

Es de especial interés investigar lo que concierne a la edad del monumento y/o de partes individualizadas del mismo; los posibles trabajos de mantenimiento, sustitución y restauración; daños causados por accidentes naturales o aquellos provocados por el hombre: tipos de piedra usados en la construcción, formaciones geológicas a las que pertenecen y las canteras de las que fueron extraídas.

Se puede obtener dicha información sobre la obra monumental en la propia obra (inscripciones y grabados) y también en fuentes externas (documentación histórica escrita, documentación gráfica y fuentes literarias).

El segundo paso a dar en la investigación de un edificio histórico de piedra es el examen o inspección ocular del mismo que incluye, en primer lugar, una observación a fondo de la apariencia general de la piedra, es decir, de aquellas características generales visibles a simple vista, o identificables con la ayuda de medios sencillos, como: color, estructura y naturaleza mineralógica de la piedra, estado de alteración superficial de la misma; posible influencia de los factores ambientales actuales en ese estado de alteración; existencia y tipo de microorganismos en la superficie de la piedra; posibles efectos secundarios que sobre el aspecto del monumento y, de manera especial, sobre el cambio de coloración o lustre, tienen los tratamientos de conservación, etc.

El examen anterior debe ir seguido por un análisis detallado de los diferentes indicadores visuales o manifestaciones macroscópicas de degradación. La descripción de esta sistemología visible de la alteración debe ir acompañada de una amplia información gráfica y de una valoración de su intensidad que, obviamente, será subjetiva, pero puede servir para dar una idea del **grado** de deterioro del material.

Estas observaciones in situ deberán completarse después con un nuevo examen a fondo del propio monumento, una vez conocidos y analizados los resultados de los ensayos y experiencias de alteración, llevados a cabo. Puede considerarse, entonces, con más exactitud, si la piedra, en las distintas localizaciones, se ha alterado como consecuencia de la acción de factores atmosféricos naturales, de la hu-

medad del suelo, por acciones biológicas, antropogénicas o a consecuencia de varias fuerzas destructivas actuando conjuntamente.

La tercera fase en el estudio de un monumento consiste en una serie de **ensayos**, más o menos rutinarios, generalmente de laboratorio, para establecer la composición química, características mineralógico-petrográficas, químicas y físicas de la piedra, así como de los morteros empleados; conocer los agentes biológicos que actúan sobre la piedra y los morteros; determinar el contenido de agua de la piedra, y las características, esencialmente químicas, de las eflorescencias.

El primero y quizá más delicado problema que resolver es la toma de la muestra, tanto en el monumento como en las canteras de las que fueron extraídas las piedras. Al tomar la muestra, deben tenerse en cuenta varios aspectos, principalmente los diversos tipos de piedra posiblemente utilizados y las diferentes fases de alteración que puedan encontrarse en las distintas partes del edificio, en función de los diversos parámetros que hayan podido intervenir.

La toma de muestra en las canteras es necesaria, generalmente, para el estudio mineralógico-petrográfico de la piedra y para la determinación de aquellas características físicas y mecánicas que, requiriendo una cantidad importante del monumento sin que produzcan daños serios, son indispensables para el conocimiento de los mecanismos de alteración.

La investigación de la naturaleza química de la piedra, y de los productos de alteración, se basa en el análisis químico por vía húmeda y métodos instrumentales de análisis.

La investigación de la naturaleza mineralógica-petrográfica emplea técnicas clásicas del estudio petrográfico general de rocas, y se basa esencialmente en observaciones por microscopía óptica y electrónica y en el análisis mineralógico por fracción de rayos X.

Con respecto a las características físicas y mecánicas de la piedra, se deben estudiar todos los parámetros que permiten distinguir mejor el material sano del deteriorado y contribuir a caracterizar el tipo y grado de alteración que ha tenido lugar. Los principales ensayos para conocer estas características son:

• Ensayos para establecer la compacidad del material.

La determinación de la porosidad del material tal vez sea la más utilizada debido a la importancia de la presencia y circulación de agua. Se suele completar con ensayos de porometría, ya que la distribución de tamaños de los poros es incluso más importante que el volumen total de los mismos. La superficie específica se puede obtener a partir de los datos de la porometría, y es un índice del área expuesta a

la acción directa del medio. La permeabilidad del material alterado, en relación con aquella del de la cantera, da una idea de la medida en la que los poros han sido taponados como consecuencia del aporte de distintos materiales o tratamientos.

- **Ensayos para establecer la cohesión mecánica.**

Los ensayos para valorar las propiedades mecánicas de la piedra por medidas son aquellos que miden la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión y a la adherencia.

Las determinaciones de las características de transmisión del sonido y de la frecuencia de resonancia son ensayos indirectos y se usan para obtener información sobre la calidad de la piedra y alteraciones no visibles, la primera, y sobre propiedades elásticas, la última.

- **Características superficiales**

Las propiedades mecánicas de la superficie de los materiales están ligadas a la dureza superficial, que puede establecerse mediante los ensayos de dureza por penetración, dureza por rebote, rayado y desgaste. Dichas propiedades son de interés, tanto para evaluar la resistencia de los materiales, como verificar su estado de alteración.

- **Características térmicas**

Las propiedades térmicas pueden adquirir relevancia en algunos tipos de climas.

El análisis termohigrométrico de un monumento permite dilucidar determinados aspectos de alteración de materiales pétreos por medida de la temperatura y de la humedad relativa dentro y fuera del edificio.

La determinación de la expansión térmica es importante cuando la piedra está expuesta a cambios rápidos de temperatura durante ciclos de calor diversos y en los fuegos.

- **Características eléctricas**

La piedra es un material aislante en estado seco. La medida de la conductividad eléctrica de un material pétreo permite determinar su contenido de agua e indirectamente el de las sales móviles disueltas.

- **Ensayos para caracterizar el comportamiento del material frente al agua.**

La humedad es una de las principales causas de alteración de los materiales pétreos. Es necesario, por ello, determinar el contenido de humedad de las piedras utilizadas en la construcción de las obras monumentales (existen numerosos ensayos de determinación directa e indirecta de humedad).

Dicho contenido de agua es, por otra parte, función de la capacidad máxima de absorción por una piedra del agua líquida procedente de una superficie libre o de una película, continua o no, depositada sobre ella. Aquí se incluyen los métodos recomendados para determinar la absorción de agua por los materiales pétreos (entre ellos, los de inmer-

sión progresiva, completa o a ebullición, y los de absorción a presión elevada y reducida).

El contenido de humedad viene determinado no sólo por la cantidad de agua que es sorbida por el material, tanto en estado líquido como en estado de vapor (ensayo de absorción de agua higroscópica), sino también por la cantidad de agua que puede evaporarse (curva de secado), tanto en forma líquida (determinación del contenido crítico de agua), como de vapor (determinación de la conductividad del vapor de agua).

Esos tres exámenes, estudio histórico de la construcción y mantenimiento del edificio, análisis de la piedra y de los procesos de alteración y las observaciones en el propio edificio, permitirán identificar ya los factores primarios de alteración, y diagnosticar los posibles mecanismos a través de los cuales se han podido producir los tipos de alteración o indicadores de alteración presentes.

Los edificios históricos se van deteriorando con el paso de los años por la acción de factores naturales y antropogénicos que actúan, fundamentalmente, sobre las partes más débiles de las estructuras arquitectónicas. Solamente un número pequeño de las estructuras creadas en el pasado por el hombre sobreviven a los estragos del tiempo; son las que constituyen nuestro patrimonio cultural.

Entre las causas de deterioro de un monumento, la más uniforme y universal es la gravedad, seguida por los factores climáticos y ambientales. Las actuaciones antropogénicas están hoy día, probablemente, entre las que producen los mayores daños a nuestra herencia cultural.

Consecuencia, pues, de esencialmente la interacción material-medio ambiente son una serie de alteraciones, cuyo análisis deberá conducir, en último término, al establecimiento de los mecanismos que tienen lugar, principalmente: abrasión externa, cambio de volumen de la piedra, cambio de volumen del material en capilares e intersticios, disolución de la piedra o cambio de forma química, actividad biológica,...

2. MEDIDAS PREVENTIVAS Y TRATAMIENTOS DE CONSERVACION

Se debe destacar la importancia de las medidas preventivas conducentes a impedir que continúe una alteración más que a tratarla, una vez que ha tenido lugar.

Las medidas preventivas, encaminadas a la protección de los edificios históricos, tienen por objetivos básicos el control del medio ambiente y de los factores activos causantes de los daños.

La prevención incluye el control de la humedad, temperatura y grado de insolación, así como medidas de mantenimiento general de un edificio, tal como la limpieza. Es reconocido, cada vez más, el valor

de la limpieza de la piedra, en dicho sentido. La acumulación de la suciedad sobre la superficie de la piedra puede ser perjudicial por dos razones. En primer lugar, la naturaleza del depósito mismo, que puede ser fuente de sales solubles destructivas, y, en segundo lugar, la retención de la humedad sobre la superficie. Ambos hechos facilitarán las alteraciones causadas por la deposición de sales debajo de la superficie de la piedra. La limpieza, por otra parte, puede dejar al descubierto defectos ocultos en la estructura.

En ambientes industriales, y también urbanos las medidas preventivas incluyen, además, la vigilancia de la contaminación atmosférica.

Puede afirmarse, con bastante probabilidad de acertar, que la mayoría de los edificios históricos, y las piedras de que están hechos, se deterioran más por no tomarse simples precauciones de mantenimiento que por cualquier otra causa. De nada sirve todo el cúmulo de conocimientos aportados por químicos, ingenieros, geólogos y otros científicos para la prevención de la alteración, si luego nuestros edificios se deterioran por simple abandono. Un tejado en malas condiciones o un conducto de desagüe atascado puede causar más daño en una semana que muchos años de exposición de un edificio a la contaminación atmosférica.

En los tratamientos de conservación en un sentido amplio (arquitectónico), la conservación implica siempre hacer intervenciones a varias escalas y niveles de intensidad, determinadas por el estado de deterioro del edificio, las causas de degradación y el entorno que rodea al mismo. Puede procederse a uno de estos siete progresivos grados de intervención: prevención, preservación, consolidación, restauración, rehabilitación, reproducción, y reconstrucción.

En el sentido estricto, que aquí se considera, los tratamientos de conservación se refieren a la aplicación de productos protectores y consolidantes.

Los ensayos y experiencias de alteración aplicados en el estudio de los métodos de conservación persiguen dos objetivos principales:

- La investigación del producto conservante utilizado, a través de su caracterización química y física y del estudio de su comportamiento.
 - La investigación del sistema piedra-producto, estableciendo la eficacia protectora o consolidante del producto, la durabilidad del tratamiento y el estudio de los posibles efectos secundarios.
- Es aconsejable realizar, pues, una serie de análisis fisicoquímicos de los productos conservantes comerciales, para completar y confirmar los datos de los fabricantes. Estos análisis comprenden, generalmente, las siguientes determinaciones:
- naturaleza química de los solventes.
 - extracto seco de 40% y 60% de humedad relativa.
 - naturaleza química y concentración de los productos.
 - dimensiones moleculares medias.
 - durabilidad

La composición química y la concentración de los solventes y productos activos puede conocerse mediante el empleo de métodos instrumentales fisicoquímicos de separación, diversas espectrofotometrías, espectrometrías de masas y resonancia magnética nuclear. Es conocida una metodología desarrollada por los laboratorios del Real Instituto del Patrimonio Artístico (Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium) de Bruselas.

Aparte de un gran número de ensayos utilizados en la caracterización de la piedra, otros diversos, más específicos, permiten valorar y controlar los tratamientos de conservación. Así, para la caracterización del tratamiento, se recurre a observaciones estructurales y morfológicas y a determinar la profundidad de penetración, el llenado de los poros o el grado de polimerización; para establecer la eficacia de un tratamiento hidrófugo, a la determinación del ángulo de contacto agua-piedra, y para valorar determinados efectos secundarios, a la determinación del cambio de color.

3. EXPERIENCIAS DE ALTERACION ACELERADA

Las experiencias de alteración acelerada, basadas en una acción violenta y concentrada en el tiempo de factores de alteración, son pruebas de laboratorio útiles para evaluar la durabilidad de los materiales pétreos tratados y sin tratar, permitiendo valorar la resistencia a determinados agentes de alteración. Mediante las mismas se intentan reproducir fenómenos de alteración similares a aquellos que resultan de la alteración atmosférica. Así, en las experiencias de helicidad es posible conocer el comportamiento del material pétreo cuando se somete a la humedad natural y a variaciones climáticas de temperatura, haciendo posible, así, evaluar por simulación su durabilidad.

Se pueden establecer experiencias de alteración acelerada en el estudio de la conservación de materiales pétreos, con los siguientes objetivos: estudiar la resistencia de la piedra a los agentes de alteración e investigar los mecanismos de alteración; conocer el comportamiento de productos de conservación frente a esos mismos factores de alteración; y evaluar la eficacia de un determinado tratamiento.

Los resultados cuantitativos de estas experiencias dependen de numerosos parámetros, que deberán controlarse estrictamente durante la realización de las mismas, con las grandes dificultades que ello conlleva.

Las experiencias de alteración acelerada permiten, como se ha señalado antes, comparar las durabilidades relativas de los materiales pétreos tratados y sin tratar para predecir sus vidas en el monumento. Es más difícil, sin embargo, desarrollar

experiencias de este tipo para predecir el comportamiento a largo plazo, por las siguientes razones:

- 1) Los mecanismos de alteración de la piedra son complejos y rara vez bien comprendidos.
- 2) Los factores externos que afectan a su comportamiento son numerosos y difíciles de cuantificar, de manera que muchas experiencias no incluyen todos los factores de importancia, y los incluidos rara vez están relacionados cuantitativamente con la exposición en las condiciones del monumento.
- 3) Los materiales pétreos se ensayan frecuentemente en configuraciones diferentes de aquellas usadas en el edificio.

Una vez definida la experiencia que se va a desarrollar en función del objetivo deseado, el punto de partida es una adecuada preparación de las muestras y el establecimiento de ciertas condiciones iniciales de las probetas (limpieza, contenido de agua, etc.) ya que éstas pueden mediatizar en gran medida los resultados.

La fase siguiente es el desarrollo de la experiencia en sí, con el debido control sobre las variables elegidas. El número de ciclos a realizar es función, en cada caso particular, tanto del tipo de muestra y/o tratamiento, como de que se adopte el criterio de lograr determinadas alteraciones macroscópicas visibles o de seguir la evolución de ciertas propiedades que se controlan periódicamente, después de cada cierto número de ciclos y al final de la experiencia.

Y por último, se procede a la valoración de los resultados de la experiencia eligiendo los ensayos más apropiados.

El efecto de los ciclos de las diversas experiencias sobre las probetas puede evaluarse siguiendo diversos criterios:

- examen visual y registro fotográfico
- pérdida de peso o reducción de volumen aparente
- número de ciclos para alcanzar un determinado estado de alteración
- ensayos mecánicos

Para investigar la piedra sin tratar, se analiza su comportamiento frente a diversos factores de

alteración, sometiendo probetas de piedra a las experiencias de alteración acelerada que se consideren oportunas. Los resultados de las mismas se valoran a través de los ensayos antes indicados, especialmente examen visual y pérdida de peso.

Para investigar el producto conservante, se establece su comportamiento, en determinadas condiciones, frente a diversos factores ambientales a través de las correspondientes experiencias. Los resultados de alteración superficial se evalúan mediante la medida de algunas características físicas y también de la investigación de los posibles compuestos formados por reacción con los contaminantes. Para valorar el comportamiento de los productos conservantes de la piedra, se han aplicado una serie de ensayos y experiencias que se usan frecuentemente para evaluar la durabilidad de materiales orgánicos de construcción, tales como pinturas y ciertos polímeros.

Para investigar el sistema piedra-producto conservante, se examina el comportamiento de la piedra tratada y sin tratar frente a experiencias de alteración acelerada. Los resultados se valoran mediante ensayos que evidencien las características morfológicas y estructurales visibles microscópicas, ciertas características físicas de la piedra tratada y sin tratar, la porosidad y la permeabilidad, sus características mecánicas y ciertos comportamientos frente al agua, además de medidas de variación de peso y análisis por rayos X (este último para identificar posibles compuestos resultantes de la reacción entre la piedra y los contaminantes).

Las experiencias de alteración acelerada más utilizadas, son las de helacidad, cristalización de sales, resistencia al agua (humidificación/secado), irradiación ultravioleta y experiencias con soluciones ácidas y en atmósferas contaminadas.

A pesar de la aparente simplicidad de estas experiencias, excepto aquellas en atmósferas contaminadas, son numerosas las versiones existentes de cada una de ellas; aunque se han propuesto experiencias normalizadas, casi cada laboratorio ha establecido una variante distinta.

