



II. Materiales y alteraciones

1. Caracterización petrográfica de rocas ornamentales y de construcción de uso en los edificios históricos
2. Morteros de restauración y morteros antiguos. Técnicas de estudio
3. Los materiales cerámicos en el patrimonio arquitectónico
4. Indicadores de alteración de los materiales pétreos
5. Factores biológicos de alteración

Caracterización petrográfica de rocas ornamentales y de construcción de uso en los edificios históricos

Nicolás Velilla Sánchez

Dpto. de Mineralogía y Petrología Universidad de Granada

INTRODUCCIÓN

El uso de las rocas como material de construcción se aleja tanto en el tiempo y en el espacio como los primeros asentamientos permanentes construidos por el hombre en todos los continentes. El papel preponderante de las rocas, en ese sentido, se fundamenta en circunstancias y propiedades muy diversas tales como su abundancia, resistencia, durabilidad, belleza y prestigio.

Dadas sus características, en la construcción de edificios históricos las rocas pueden cumplir una función estructural (rocas de construcción) o desempeñar funciones de revestimiento o decorativo (rocas ornamentales), si bien, es común que muchas rocas se utilicen con ambos fines, por lo que no parece conveniente establecer esta división de modo estricto.

El mantenimiento, la preservación y la restauración de los materiales pétreos que constituyen el patrimonio histórico y artístico son una preocupación y responsabilidad crecientes. Sin duda, la caracterización exacta de los materiales es el punto de partida y una de las partes esenciales en los estudios y en las propuestas de conservación y restauración.

La caracterización petrográfica debe de incluir una descripción macroscópica detallada (aspecto general, minerales observables a simple vista, color, estructura, fracturación, alteración, etc.), y microscópica de la roca, así como su clasificación, haciendo referencia a la metodología y al esquema de clasificación utilizados. A continuación se describen las principales técnicas utilizadas con este fin.

MICROSCOPIA ÓPTICA

La microscopía óptica es, sin duda, la técnica fundamental para el reconocimiento de los minerales y la caracterización de las rocas. Además, en el ámbito que aquí nos ocupa, constituye una de las más importantes técnicas para la detección del grado de deterioro de las rocas y para controlar la ejecución y los resultados de las operaciones que se realizan durante los procesos de conservación y restauración.

Diversas razones justifican el uso preferente de esta técnica, tales como: a) rapidez y seguridad en la identificación de fases minerales; b) posibilidad de identificar sustancias en mínimas proporciones; c) realización de estudios texturales; d) el precio de un microscopio petrográfico es modesto en comparación con otros instrumentos, y su coste operacional y de mantenimiento son mínimos.

Identificación mineral y propiedades ópticas

La identificación de los minerales se realiza mediante el estudio de características tales como el hábito, exfoliación y maclas, y a través de sus propiedades ópticas. Estas propiedades son las relativas a la interacción de la luz visible con las sustancias y están determinadas, principalmente, por la composición química y por la estructura cristalina.

Como consecuencia de la anisotropía estructural que poseen gran parte de los minerales, la propagación de la luz en el interior de los cristales puede variar fuertemente según las direcciones en que tiene lugar. Si a ello unimos el hecho

de que la luz normal, como otras radiaciones electromagnéticas, presenta un movimiento ondulatorio en el que las ondas vibran perpendicular a la dirección de propagación pero en diferentes planos, se comprende que en la interpretación de la interacción de los cristales con la luz la consideración de la dirección o de la orientación es absolutamente determinante. Esto implica la necesidad de dotar al microscopio óptico de una fuente de luz polarizada (ondas de luz que vibran en un plano único), que se consigue mediante un filtro polarizador, y de una platina giratoria que permita orientar los minerales. Estas son las dos peculiaridades básicas del microscopio polarizante. Otros de sus elementos a destacar son la existencia de un segundo polarizador colocado por encima de la platina (denominado analizador) y de una lente auxiliar (lente de Bertrand), ambos retraíbles. Estos dispositivos permiten analizar los efectos de interferencia de los dos trenes de ondas luminosas de diferente velocidad, y que vibran perpendicularmente entre sí, que se generan en el interior de los cristales anisótropos a partir de las ondas polarizadas incidentes.

La combinación de la lente ocular (con un aumento de 8 a 10X) y de los objetivos (generalmente de 2,5 a 4X, 10X y 40 ó 50X) permite cubrir un campo de aumentos comprendido entre 20X y 500X que es el adecuado para las determinaciones ópticas en cristales.

Para la observación de las rocas al microscopio de luz transmitida se requieren preparaciones de muestras que sean lo suficientemente delgadas para permitir el paso de la luz con un grado de absorción pequeño. Para ello, se cortan las rocas utilizando un disco con diamantes y se preparan, mediante procedimientos de abrasión, las conocidas como "láminas delgadas" sobre portamuestras de vidrio de dimensiones aproximadas 2,5 cm x 4,5 cm. El espesor estándar de la lámina de roca es de 0,030 mm para el cual casi todos los minerales son transparentes.

Comentar, aunque sea muy brevemente, el origen y el modo de determinar cada una de las propiedades ópticas que permiten la identificación de un mineral es imposible en sólo unas líneas. A continuación, únicamente se enumeran

y definen, de modo conciso, las propiedades que suelen utilizarse, agrupadas según los modos de observación en microscopía de luz transmitida.

1. Observaciones con un sólo polarizador.

- a) Índice de refracción. Es la propiedad que relaciona la velocidad de propagación de la luz en una dirección determinada del cristal respecto a la del vacío. Las diferencias entre los valores de los índices de refracción de un mineral respecto al medio u otros minerales que lo rodean se traduce en la percepción de un mayor o menor grado de relieve, estableciéndose una escala del relieve, con varios términos que van desde muy bajo a extremo.
- b) Color. La aparición de color es debida a la absorción selectiva por el cristal de determinadas longitudes de onda del espectro de que se compone la luz blanca; un cristal incoloro al microscopio transmite esencialmente todo el espectro visible, un cristal negro absorbe todas las longitudes de onda.
- c) Pleocroísmo. Es la variación de color o de intensidad de color que puede presentar un cristal al girar la platina del microscopio; se debe a la absorción diferencial de la luz blanca polarizada según diferentes direcciones cristalográficas.

2. Visión ortoscópica. Se obtiene con el polarizador y el analizador cruzados a 90° y con iluminación paralela.

- a) Birrefringencia. Es la diferencia entre los valores de los índices de refracción mayor y menor que presenta un cristal anisótropo
- b) Color de interferencia. El color que muestra un cristal anisótropo, entre polarizadores cruzados, como consecuencia de la interferencia y transmisión por el analizador de las dos ondas luminosas perpendiculares entre sí en que divide el cristal a la onda polarizada incidente.
- c) Ángulo de extinción. El ángulo que forman en un mineral determinadas direcciones cristalográficas de referencia (caras cristalinas, exfoliación, maclas) con sus direcciones ópticas de vibración.

d) Signo de elongación. Relaciona la situación de las direcciones correspondientes a los diferentes índices de refracción de un mineral con su alargamiento morfológico.

3. Visión conoscópica. Se consigue con el polarizador y analizador cruzados a 90° y la intercalación de un condensador de luz, para obtener iluminación convergente, y de la lente de Bertrand.

a) Figuras de interferencia. Se forma por procesos complejos de interferencia de ondas en el cristal y permite distinguir el tipo óptico de un mineral (clasificado como uniaxial o biaxial) y determinar su signo óptico, este último definido según las diferencias relativas entre los valores de los índices de refracción principales del cristal.

b) Ángulo 2V. Es el ángulo que forman los dos ejes ópticos en minerales biaxiales. En algunas sustancias varía de modo significativo con la longitud de onda de la luz incidente (dispersión).

Algunos minerales resultan opacos aún en secciones muy delgadas (sulfuros y óxidos principalmente) y para su identificación microscópica es necesario utilizar la técnica de microscopía de luz reflejada. En esta técnica se utiliza un microscopio que ilumina la muestra desde la parte superior y permite estudiar el comportamiento de la luz polarizada al incidir perpendicularmente y reflejarse sobre la superficie de los minerales. Las preparaciones de las muestras son extremadamente pulidas y pueden ser láminas delgadas o fragmentos pulidos embutidos en resina sintética. En este tipo de microscopía, las principales propiedades que se determinan son las siguientes: reflectancia (porcentaje de luz incidente que es reflejada por la superficie pulida del mineral), color de reflexión, pleocroísmo de reflexión (variación del color al girar la platina sin el analizador insertado), anisotropía (existencia y variación de color con el polarizador y analizador cruzados), dureza al pulido (se traduce en la existencia de relieve) y presencia de reflexiones internas en el cristal (manchas difusas que se

producen en minerales que no son completamente opacos y en los que la luz penetra por debajo de la superficie y luego es reflejada).

Otras técnicas complementarias de aplicación en la caracterización petrográfica y en el estudio de las alteraciones que experimentan las rocas son la difracción de rayos X y el microanálisis mediante microsonda de electrones o mediante microscopía electrónica de barrido.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La utilización de los rayos X se fundamenta en que parte del espectro de longitudes de onda que comprenden los rayos X corresponde a valores de longitud de onda que son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de los retículos cristalinos, de modo que la materia cristalina puede actuar como red de difracción de estos rayos. La geometría del fenómeno de difracción de rayos X se rige por la ley de Bragg, que establece la dirección en que se produce la difracción del haz en función de la orientación del cristal (θ), de los espaciados interplanares existentes en su estructura (d) y de la longitud de onda de la radiación utilizada (λ), de acuerdo con la siguiente expresión: $\lambda = 2d \sin \theta$.

Cada sustancia cristalina tiene un conjunto de espaciados interplanares ($d_1 \dots d_n$) que es característico, conocido y se encuentra recogido en bases de datos. Si en una experiencia de difracción se opera, como es habitual, con un valor de longitud de onda único (radiación monocromática, por ejemplo, $1,5405 \text{ \AA}$ en el caso de un difractómetro dotado de un tubo emisor de rayos X de Cu), y se determinan los valores angulares ($\theta_1 \dots \theta_n$) a los que se han registrado los haces de rayos X difractados (conocidos como reflexiones), se pueden calcular fácilmente los valores correspondientes de los espaciados ($d_1 \dots d_n$). Los espaciados y las intensidades correspondientes a las diferentes reflexiones registradas se comparan, manualmente o mediante programas informáticos, hasta coincidencia con los patrones existentes en las bases de datos (por ejemplo, Powder Diffraction Data editado por JCPDS) y se identifica la composición mineral de la muestra analizada.

La técnica de difracción más común para este tipo de análisis es el difractómetro de polvo, para el que se muele una pequeña cantidad de muestra (del orden de 0.3 g) hasta obtener un finísimo polvo cristalino, con cristales orientados al azar en todas las direcciones, que se somete a la radiación X. Es, pues, una técnica destructiva y de aplicación a sustancias cristalinas (la gran mayoría), pero tiene la ventaja de no tener una limitación práctica en el tamaño de los cristales, por lo que su empleo es especialmente útil para la identificación cualitativa y semicuantitativa de minerales de tamaño de grano muy fino, inferior a unos pocos micrómetros, que no son abordables mediante técnicas ópticas. Este es el caso del grupo de los minerales de la arcilla, de gran importancia en los procesos de alteración.

TÉCNICAS ELECTRÓNICAS MICROANALÍTICAS

Desde los años setenta las técnicas de microanálisis químico que se realizan con microsonda de electrones o microscopio electrónico se han mostrado de gran utilidad en la identificación y en otros estudios sobre minerales o cualquier otro material. Muy esquemáticamente, consisten en hacer incidir sobre el material a estudiar un fino haz de electrones, fuertemente acelerados y con una energía cinética suficientemente alta para provocar la emisión de radiación X en los elementos químicos que constituyen dicho material. Así, cada uno de los tipos de átomos presentes emite un conjunto de radiaciones con energías y longitudes de onda que son características de ese átomo (espectro característico). El análisis del espectro total que produce la muestra se puede realizar de dos modos: espectrometría de longitud de onda y espectrometría de energía. En ambos casos, se separan y registran cada una de las líneas espectrales que lo componen y se identifican los diferentes elementos presentes en la sustancia (análisis cualitativo). La medida de las intensidades relativas de ciertas líneas espectrales seleccionadas para cada elemento (generalmente las más intensas registradas) y su comparación con las intensidades emitidas por sustancias de composición perfectamente determinada, que se utilizan como

patrón, permite calcular la composición química cuantitativa del mineral o sustancia problema.

Estas técnicas tienen la enorme ventaja de producir análisis de gran calidad sobre volúmenes extraordinariamente pequeños que llegan a ser de tan sólo unas decenas de micrómetros cúbicos y de detectar concentraciones del orden del 0.01 % en peso de elemento. Son técnicas no destructivas, que permiten realizar los análisis sobre granos individuales de muestras con una preparación similar, o incluso común, a la utilizada en la microscopía óptica. Sin embargo, requieren un equipo instrumental sofisticado, de alta tecnología y, en consecuencia, caro y de costoso mantenimiento. Como aplicaciones más interesantes, en nuestro caso, se encuentran la identificación mineral a través de su composición química, la posibilidad de identificar minerales o sustancias con tamaños por debajo del límite de resolución del microscopio óptico, aún en cantidades mínimas o incluidos en otros minerales, el estudio de la zonación química de los minerales, el análisis por separado de los procesos de alteración en granos minerales de distinta naturaleza, etc.

PRINCIPALES TIPOS DE ROCAS ORNAMENTALES Y DE CONSTRUCCIÓN

Las rocas son agregados naturales de minerales. Generalmente contienen varios tipos de minerales, pero algunas rocas están constituidas casi exclusivamente por un sólo tipo de mineral. La composición mineralógica es el principal carácter que define a un tipo de roca. Sin embargo, otros criterios tales como el origen, la composición química y la textura son también utilizados para el establecimiento de las clasificaciones petrográficas.

En petrografía, el término textura incluye el conjunto de rasgos geométricos y estructurales de una roca, así como las interrelaciones de los componentes de la misma, a escala microscópica. El término estructura se aplica, generalmente, para los rasgos de la roca a mayor escala. Dentro de la textura se incluyen diversos aspectos relativos a los minerales o partículas constituyentes: cristalinidad, tamaño, forma, relaciones mutuas y modo de distribuirse. Además, es de

gran interés la porosidad de la roca en sus diferentes aspectos: tamaño y forma de los poros, intercomunicación, relleno de los poros, presencia de microfisuras, etc. Para describir la textura de las rocas se procura emplear términos en sí mismos significativos (ej. masiva, granular, radial, foliada), pero en muchos casos no ocurre así (ej. poikilitica, ofítica, micrográfica). La terminología es muy extensa, de modo que, en adelante, sólo se comentarán algunos imprescindibles o muy característicos.

Las clasificaciones petrológicas de las rocas obedecen a criterios científicamente precisos y rigurosos. Frente a esto, se encuentran las clasificaciones de rocas ornamentales utilizadas en el ámbito comercial que son imprecisas, caóticas y absolutamente inadecuadas. Como muestra, basta citar que una normativa como la UNE, de uso común en España, establece la existencia de grupos tales como: a) granitos, b) mármoles y calizas marmóreas, c) pizarras y d) otras piedras. En la nomenclatura comercial, en muchos casos se recurre a criterios banales tales como el color o la localidad de procedencia, por no citar el uso de términos de índole sentimental. Se plantea la necesidad de un acercamiento de la nomenclatura comercial a la científica, aunque no sea indispensable llegar al máximo nivel de concreción de esta última.

El origen y las condiciones de formación de las rocas determinan su composición química y mineral, su textura y estructura, de las que derivan las características mecánicas y ornamentales. Para facilitar el estudio sistemático de las rocas es común dividir las en tres grandes grupos de acuerdo con su génesis: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Rocas ígneas

Las rocas ígneas proceden de la solidificación de un fundido silicatado (magma) que se ha enfriado y cristalizado en zonas profundas originando las rocas plutónicas o en la superficie terrestre dando lugar a las rocas volcánicas o efusivas, si bien existen situaciones intermedias.

Las condiciones de formación de las rocas ígneas plutónicas (elevada presión, enfriamiento

lento y uniforme, presencia de fluidos) determinan una serie de características que les son comunes, tales como: aspecto masivo, compacto, elevada resistencia mecánica y dureza, baja porosidad y escasa absorción de agua. La textura es cristalina y granular, con cristales de tamaño relativamente grande que son distinguibles, generalmente, a simple vista.

Las rocas plutónicas se clasifican de acuerdo con las proporciones relativas de los principales minerales constituyentes: cuarzo, feldespatos, feldespatoideos, micas, anfíboles, piroxenos, olivino, óxidos, etc. De entre los diversos tipos cabe destacar, desde la perspectiva que nos ocupa, los siguientes: granitos, sienita, diorita y gabro.

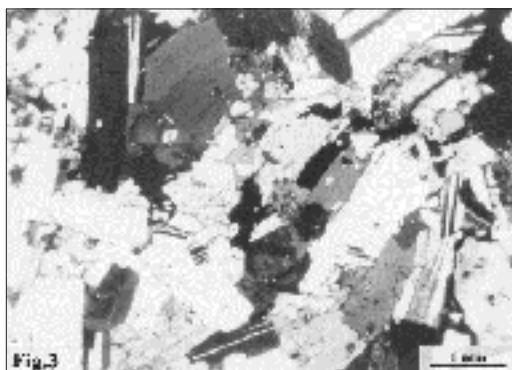
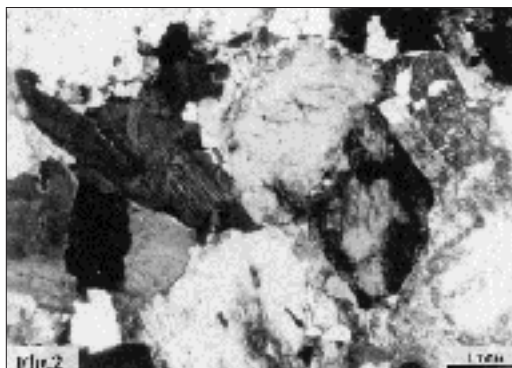
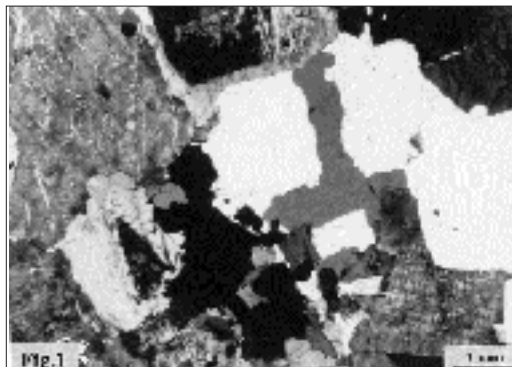
Utilizado en sentido general, el término granito puede incluir a varios tipos de rocas de grano medio a grueso (granodiorita y tonalita entre ellas) que están constituidas mayoritariamente por minerales de tonos claros (denominados leucocráticos) tales como cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa sódica (Fig. 1). La presencia de cuarzo como componente esencial, en proporciones modales superiores al 10%, es característica. Como minerales melanocráticos (oscuros), generalmente en proporción inferior al 20%, destaca la presencia común de mica ferromagnesiánica (biotita), en algunos casos de anfíbol cálcico o sódico y, más raramente, de piroxeno. Algunos granitos contienen mica blanca (moscovita) de apariencia plateada. Entre los minerales accesorios, en muy pequeñas proporciones, se encuentran magnetita, zircón, apatito, titanita, etc. La mayor parte de los granitos son de grano medio a grueso, con un tamaño de los cristales entre 1 y 10 mm y con textura granular (de ahí su nombre) ya que sus minerales principales tienden a formar cristales con mal desarrollo de caras. Algunos granitos muestran textura porfídica. Los granitos, en sus diversas variedades en función de las proporciones de los minerales constituyentes, presentan una diversidad cromática desde colores rojizos cuando predomina el feldespato potásico a tonos entre blanco y gris cuando abundan las plagioclasas y los silicatos oscuros. Son rocas muy abundantes y con buenas condiciones de afloramiento. Tienen densidad media (2.6-2.8), buenas características mecánicas y son

resistentes a la alteración, sobre todo después de pulidos. La facilidad para obtener buenos pulidos y la posibilidad de obtener grandes bloques lo hacen muy útil tanto como material de construcción como para fines ornamentales, siendo especialmente aceptado en sus variedades homogéneas, equigranulares y de grano medio a grueso.

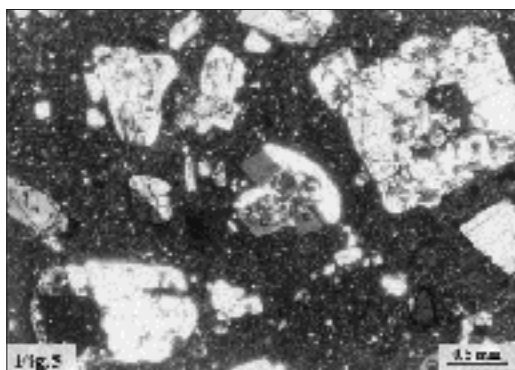
La sienita es una roca de grano medio a grueso que consiste, principalmente, en feldespato potásico, proporciones menores de plagioclasa sódica y algunos minerales melanocráticos (usualmente hornblenda y biotita) (Fig. 2). El cuarzo es accesorio y su proporción modal no suele superar el 5%, incluso, puede estar ausente y en su lugar se encuentran feldespatoides. Los minerales accesorios comunes son los mismos que en los granitos. Existen rocas transicionales entre la sienita y el granito. Los tonos rosados o rojizos son los más comunes en las sienitas y son debidos a la presencia del feldespato potásico. La textura de las sienitas y sus propiedades mecánicas son similares a las del granito, aunque es algo menos dura y se pule más fácilmente. Se emplea para los mismos fines que el granito pero con la diferencia de que se trata de una roca mucho más escasa en la naturaleza.

Las dioritas son rocas con textura granular que muestran un característico moteado blanco y negro (o verde muy oscuro) ya que los minerales melanocráticos llegan a alcanzar proporciones casi similares a los leucocráticos. Están constituidas, esencialmente, por plagioclasa Na-Ca y hornblenda o biotita y, en menor proporción, por piroxeno y cuarzo (Fig. 3). Este último, al igual que el feldespato potásico, no supera el 10% en volumen. Las dioritas son rocas de densidad bastante elevada (2.8-3), duras de trabajar, resistentes a la abrasión y a la alteración, que se utilizan, principalmente, como material de revestimiento.

El gabro es una roca generalmente de grano grueso, de color verde-gris oscuro a negro, que está compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica y por silicatos ferromagnesianos tales como piroxenos y, con menor frecuencia, olivino y anfíboles (Fig. 4). Los óxidos de hierro y titanio son accesorios comunes. Es una roca de



Figs. 1,2 y 3



elevada densidad (2.8-3.1) y mecánicamente resistente y dura. No es abundante y se utiliza, exclusivamente, para revestimientos y con fines decorativos, destacando las variedades de color extremadamente negro que gozan de gran apreciación.

Desde el punto de vista composicional, químico y mineralógico, pueden establecerse unos tipos de rocas volcánicas equivalentes a los de las rocas plutónicas. Así, los equivalentes volcánicos de las rocas plutónicas descritas en los apartados anteriores serían: riolita (equivalente del granito), dacita (granodiorita), traquita (sienita), andesita (diorita) y basalto (gabro). Las diferencias más notables entre ambos grandes grupos de rocas ígneas radican en las características estructurales y texturales. Las rocas volcánicas suelen estar constituidas por minerales de tamaño muy pequeño y pueden contener vidrio amorfo en proporciones variables. Muestran una notable diversidad de texturas (fluidal, perlítica, vesicular, esferulítica, etc.) entre las que destaca la textura porfídica, definida por encontrarse cristales de mayor tamaño (fenocristales) inmersos en una matriz que puede ser de grano fino, muy fino o vítrea.

En general, las características de buena parte de las rocas volcánicas no las hacen apropiadas como materiales de construcción, a lo que hay que añadir que es un hecho bastante común que afloren ya alteradas por la acción de fluidos hidrotermales. Sin embargo, algunas rocas tales como los basaltos y las andesitas han sido utilizadas en regiones volcánicas donde otros tipos de materiales no son fácilmente asequibles (ej. Islas Canarias y Madeira). El basalto es la roca volcánica más común. Es de grano muy fino, de color verde oscuro a negro y sus minerales característicos son plagioclasa cálcica, piroxeno y óxidos de hierro; el olivino y los anfíboles también son componentes comunes, pero pueden estar ausentes. Aunque pueden presentar diversas texturas desde vítreas a totalmente cristalinas, la más común es la porfídica. La andesita es una roca de grano fino y color gris que está compuesta por fenocristales de plagioclasa sódico-cálcica y de minerales máficos como hornblenda, biotita o piroxeno inmersos en una matriz

Figs. 4 y 5

generalmente cristalina de grano muy fino (Fig. 5).

Localmente, también tienen interés las tobas volcánicas (Fig. 6). Estas últimas son rocas piroclásticas consolidadas compuestas por fragmentos muy pequeños (cenizas) de material expulsado durante erupciones volcánicas. Son muy porosas, poco densas y fácilmente labrables, por lo que, a pesar de su escasa resistencia, se han empleado tanto como material de construcción como ornamental (ej. en Nápoles y en Arequipa, Perú).

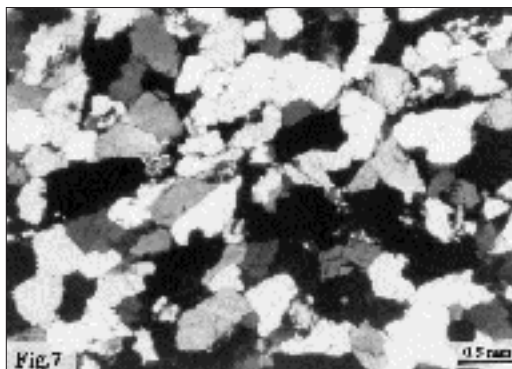
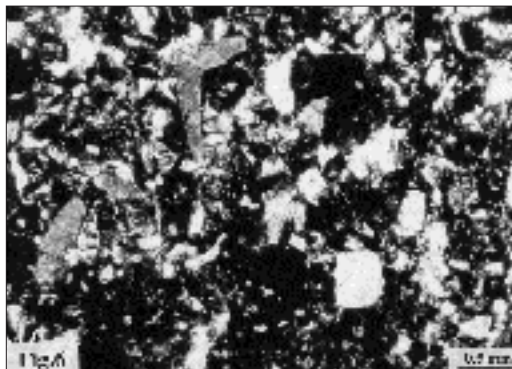
De notable importancia ha sido en la antigüedad un tipo de rocas ígneas denominado pórfido, consolidado en filones o pequeñas intrusiones y que posee características intermedias entre plutónicas y volcánicas. Los tipos más conocidos son el "pórfido verde antiguo", griego, y el "pórfido rojo antiguo", egipcio, y en ellos destaca la presencia de fenocristales blancos o rosados de feldespatos sobre la matriz coloreada verde o rojo púrpura, constituyendo rocas de alto valor ornamental.

Rocas sedimentarias

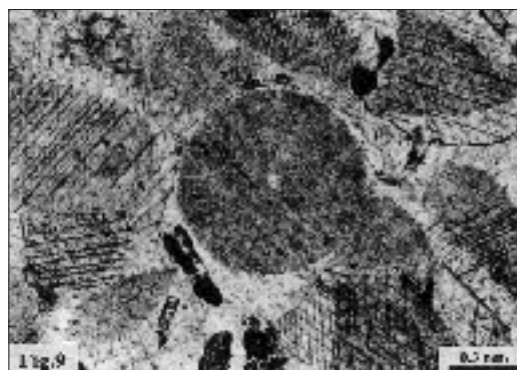
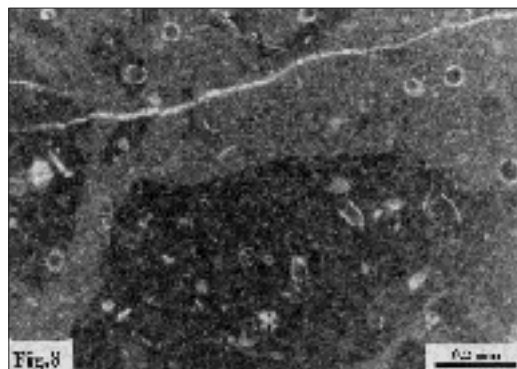
Las rocas sedimentarias se originan mediante la litificación de sedimentos que pueden ser de carácter detrítico (formados por fragmentos de rocas o minerales), químico (formados por precipitación a partir de soluciones acuosas) u orgánico (formados por restos o acumulaciones de organismos).

Por su interés como roca de construcción dentro de los diversos tipos de rocas sedimentarias pueden destacarse las areniscas y las rocas carbonatadas.

Las areniscas, por definición, son rocas detríticas consolidadas constituidas por granos de tamaño comprendido entre 0.07 y 2 mm que corresponden, principalmente, a cuarzo, feldespatos y pequeños fragmentos de rocas (Fig. 7). Durante su depósito la porosidad intergranular de las areniscas es elevada, pero los procesos de cementación diagenética reducen fuertemente la porosidad e incrementan la cohesión de la roca. La naturaleza del material cementante puede ser diversa aunque predominan el cuarzo, los carbonatos (calcita fundamentalmente) o el material



Figs. 6 y 7



arcilloso. La resistencia mecánica de las areniscas y su alterabilidad dependen de la naturaleza, tamaño y forma de los granos, y del tipo de cemento. De los diferentes tipos de areniscas, las más resistentes son las areniscas cuarzosas (usualmente con más del 90% de cuarzo) que han sido ampliamente utilizadas como roca de construcción y pavimento, aunque, ciertamente, su aspecto es muy poco vistoso. Otros tipos de areniscas como son las arcosas (con contenidos en feldespatos superiores al 25%) y las grauvacas, que incluyen más de un 15% de matriz arcillosa, son de menor importancia.

Los conglomerados son también rocas detríticas pero, en este caso, constituidas por fragmentos redondeados de tamaño superior a 2 mm (granos, cantos o, incluso, bloques) incluidos en una matriz de tipo arenoso-arcilloso. En el caso de encontrarse como material bien consolidado pueden resultar atractivos como roca ornamental, aunque son pocos los ejemplos dignos de mención (ej. el Patio del Palacio de Carlos V en la Alhambra).

Las rocas carbonatadas pueden tener un origen diverso: clástico, químico u orgánico, o bien mixto, pero gran parte del material que las constituye procede de procesos bioquímicos. Las calizas son las rocas más comunes dentro de este grupo. La calcita (carbonato cálcico) es su principal mineral y representa normalmente más del 90% de la roca. Cuando las calizas son muy puras, su color es casi blanco, pero es más frecuente que contengan cantidades minoritarias de minerales de la arcilla, cuarzo, feldespatos, pirita, oxi/hidróxidos de hierro, etc., que le confieren colores variados, pero predominantemente grises o crema. La clasificación precisa de las calizas es compleja y requiere la identificación de los agregados componentes de la roca denominados aloquímicos (bioclastos, oolitos, intraclastos, etc.), así como el tipo de material intergranular: calcita microcristalina (micrita) o calcita en cristales de más de 5 micrómetros (esparita). Sin entrar en detalle, cabe considerar dos grupos básicos, calizas micríticas (Fig. 8) y calizas esparíticas (Fig. 9), a los que para su subsiguiente clasificación se añade el término calificativo correspondiente a los componentes aloquímicos que contenga. Las

Figs. 8 y 9

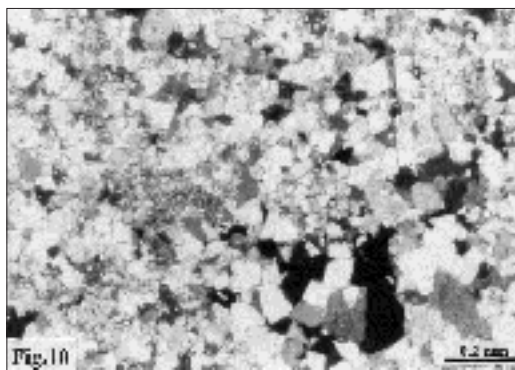
calizas están ampliamente distribuidas geográficamente, lo que unido a su facilidad de labrado y sus buenas propiedades mecánicas ha posibilitado su uso universal como material de construcción. Tienen densidad media (2.5-2.7), su dureza es aceptable y toman el pulimento con facilidad. La vistosidad de las calizas depende del color -las más apreciadas son las de tonos negros y rojos-, aunque también influyen la estructura y el grado de recristalización; destacan, en este sentido, las calizas de estructura brechoide, nodulosa o las que son ricas en fósiles con relación a las de estructura uniforme. Las calizas, sin embargo, se alteran con cierta facilidad debido a procesos de disolución, cristalización de sales, actividad biológica, etc. y son especialmente sensibles a los efectos de la polución atmosférica.

Las dolomías generalmente son similares a las calizas en cuanto a características macroscópicas, pero en detalle muestran notables diferencias. Están constituidas mayoritariamente por el mineral dolomita (carbonato de calcio y magnesio), aunque existe toda una serie de transición entre calizas y dolomías. Su formación es, normalmente, a través de procesos de reemplazamiento diagénético de rocas calizas previas. La dolomitización, que así se denomina al proceso, implica una recristalización generalizada que da lugar a una roca con mayor tamaño de grano, al desarrollo de cristales idiomorfos y a una eliminación

parcial o total de los rasgos texturales y de las estructuras orgánicas preexistentes (Fig. 10). Además, como consecuencia del reemplazamiento de calcita por dolomita tiene lugar un notable incremento de la porosidad intercrystalina, del orden del 10%, que afecta a su comportamiento frente a la meteorización. Como material de construcción la dolomía se emplea lo mismo que la caliza.

Un tipo particular de roca carbonatada lo constituye la calcarenita bioclástica que es uno de los materiales que con mayor frecuencia se observan en las obras monumentales andaluzas. Esta roca tiene unas características intermedias entre las calizas y las areniscas. Es de coloración en tonos blancos, crema o amarillentos. Está constituida por fragmentos de rocas calizas y de abundantes bioclastos, a los que acompañan granos de cuarzo y fragmentos de otras rocas dispersos (Fig. 11). La matriz es escasa, así como el cemento, por lo que su porosidad es muy elevada. Es un material fácil de labrar, pero también muy fácilmente alterable y deleznable por la deficiente adherencia del cemento. En estas rocas son comunes los procesos de arenización y pérdida de material.

Los travertinos se forman en las proximidades de grandes manantiales y ríos o lagos por precipitación directa de calcita sobre restos de plantas de los que aún conservan evidentes vestigios. Estas rocas son de tonos claros, cremas,



Figs. 10 y 11

marrones o amarillentos y muestran un marcado desarrollo de estructuras concéntricas o bandeadas. Son extraordinariamente porosas y presentan, incluso, cavidades irregulares de gran tamaño (Fig. 12). A pesar de su aspecto, son rocas con buenas características mecánicas y fuerte resistencia a la abrasión y a los agentes atmosféricos, que han sido muy empleadas para la construcción de muros, especialmente, en su parte basal.

El alabastro es una variedad de yeso (sulfato cálcico hidratado) de grano muy fino y compacto que ha sido utilizado con fines ornamentales, gemológicos y artísticos debido a su baja dureza (2), a ser translúcido en delgadas láminas y su blancura o tonalidades suaves.

Rocas metamórficas

Son rocas derivadas de cualquier tipo de roca preexistente que han sufrido una serie de cambios mineralógicos y/o texturales (esencialmente en estado sólido) en el interior de la corteza terrestre en respuesta a nuevas condiciones de temperatura, presión o esfuerzos de deformación.

La nomenclatura y clasificación de las rocas metamórficas atiende, fundamentalmente, a la composición mineral y la textura, pero a veces se considera también el origen de la roca preexistente e, incluso, el tipo de metamorfismo (regional, de contacto o dinámico).

Entre los diversos tipos de rocas metamórficas cabe destacar por su uso como material de construcción/ornamental a los mármoles y a las serpentinitas y, en un segundo plano, algunos tipos de rocas foliadas, especialmente las pizarras.

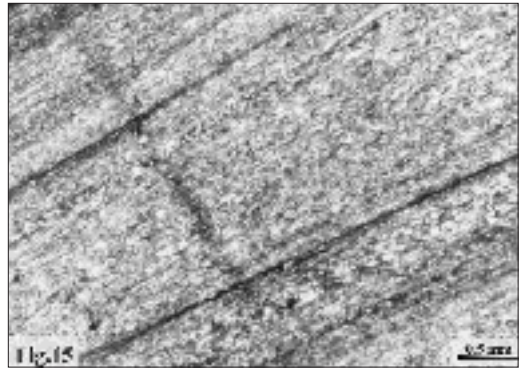
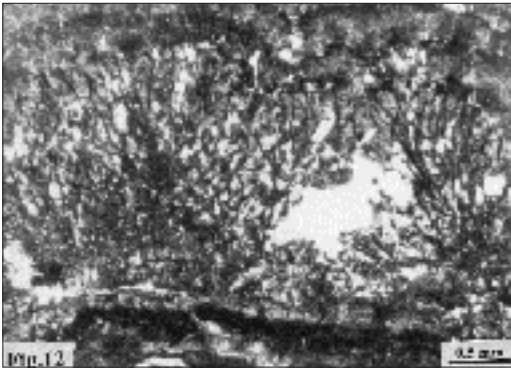
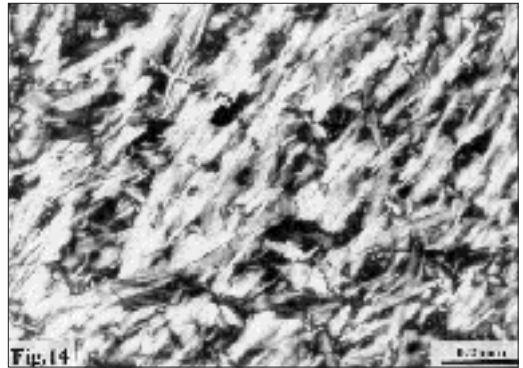
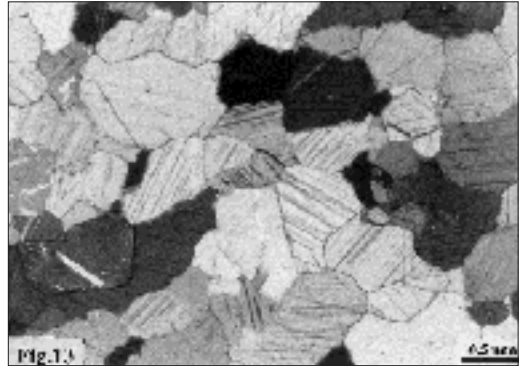
Los mármoles ocupan el lugar de privilegio en esta categoría de rocas. Se originan mediante metamorfismo de calizas o dolomías y están compuestos casi en su totalidad por carbonatos (calcita y/o dolomita), de modo que se distinguen dos tipos fundamentales: mármoles calcíticos y mármoles dolomíticos. La recrystalización metamórfica de la calcita y dolomita origina un entramado mosaico granular de cristales (textura granoblástica) que elimina cualquier estructura sedimentaria u orgánica de la roca carbonatada original (Fig. 13). El tamaño de grano es variable de fino a grueso, y el alargamiento y la orienta-

ción preferente de los cristales de carbonato desarrolla una foliación difusa. Los mármoles puros son de color blanco, pero los hay de colores muy diversos (rosados, grises, verdosos, negros) debido a la presencia óxidos de hierro, grafito, menas metálicas, micas, etc. Además de los citados, otros minerales pueden ser accesorios en los mármoles, tales como: granate, diópsido, tremolita, talco, forsterita, etc. La estructura varía de masiva a bandeada. En mármoles bandeados que han sido intensamente deformados es común la existencia de espectaculares pliegues que dan un atractivo adicional a la roca. Como consecuencia de la recrystalización metamórfica, los cristales se presentan íntimamente trabados y, en consecuencia, la porosidad es muy baja. Es una roca mecánicamente resistente y compacta, con densidad 2.7, de baja dureza (3 a 4) y fácilmente labrable. Su resistencia química frente a los agentes atmosféricos y polución es débil, especialmente en ambiente húmedo y con lluvia ácida, así como frente a las oscilaciones térmicas debido al especial comportamiento frente a la dilatación térmica de los cristales de calcita.

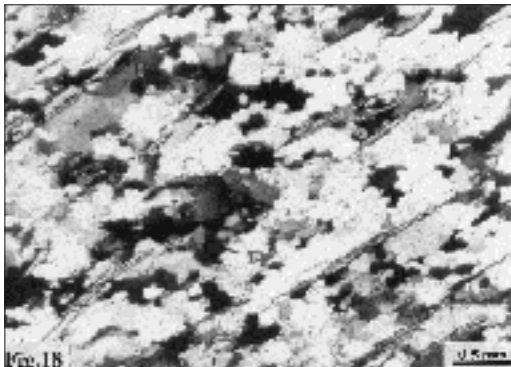
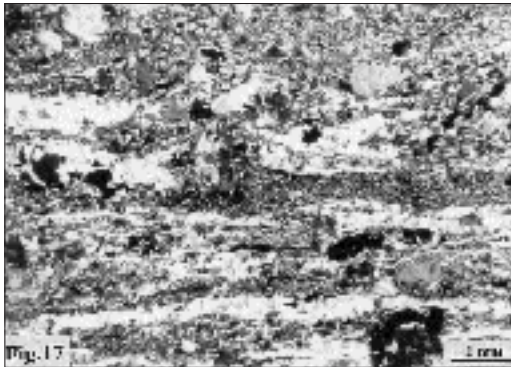
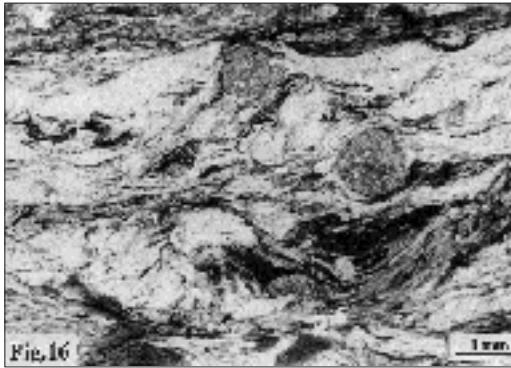
La serpentinita es una roca formada casi exclusivamente por minerales del grupo de la serpentina (silicato de magnesio hidratado) (Fig. 14). Como minerales accesorios suele contener clorita, talco y magnetita. Deriva de la transformación de rocas peridotíticas compuestas por olivino y piroxeno. Es una roca blanda (dureza entre 2.5 y 4) y moderadamente densa (2.6-2.8) que posee unas deficientes propiedades mecánicas. Se caracteriza por un predominante color verde que alterna con tonalidades grisáceas o amarillentas. El hábito de los cristales de serpentina puede ser laminar o fibroso y la roca presenta estructuras diversas: masiva, veteada, brechoide, etc. La roca adquiere un buen pulido pero se altera con cierta facilidad a un deslustrado color grisáceo. Sus características hacen que sea considerada como una de las rocas ornamentales más nobles y que haya sido ampliamente utilizada, especialmente en interiores, para la realización de columnas, escaleras, etc., y de diversos motivos decorativos.

Uno de los efectos más perceptibles del metamorfismo es el de dar lugar a rocas con

desarrollo de foliación (Fig. 15), debido a la disposición de los minerales orientados preferentemente en planos paralelos como respuesta a la existencia de un régimen de presiones dirigidas. Dentro de las rocas foliadas que se han formado por metamorfismo de sedimentos arcillosos preexistentes se distinguen tres tipos en función del tamaño de grano, que es correlacionable con la intensidad del proceso metamórfico que han soportado (grado metamórfico). Ordenadas de menor a mayor tamaño de grano, estas rocas se denominan pizarras, filitas y esquistos, existiendo una gradación continua entre ellas. Su aplicación como materiales de construcción es menor debido a su fácil tendencia a romperse según los planos de foliación. Sin embargo, en el caso de algunas pizarras, esta característica es muy útil, pues permite obtener fácilmente placas de espesor hasta milimétrico que constituyen un material ideal para las cubiertas de edificios y losas delgadas para solados y revestimientos. Las pizarras son rocas de bajo grado metamórfico, con tamaño de grano muy fino, compuestas fundamentalmente por filosilicatos (clorita, micas) y cuarzo, y que pueden contener cantidades menores de feldespatos, materia orgánica, calcita, óxidos de hierro, etc. El color de las pizarras depende de su composición mineral y varía desde negro (las ricas en materia orgánica carbonosa), a verde (ricas en clorita) o rojizas (con abundancia de óxidos de hierro). Otras características tales como su inalterabili-



Figs. 12, 13, 14 y 15



Figs. 16,17 y 18

dad, impermeabilidad, superficie lisa, color oscuro y capacidad aislante contribuyen a las aplicaciones antes citadas.

La filita tiene tamaño de grano fino y sus cristales no son identificables a simple vista. Presenta normalmente un característico brillo satinado y coloraciones variadas. Su composición es similar a la de la pizarra. En varias partes de Andalucía se utiliza mezclada con agua para formar una pasta homogénea e impermeable (lauta) que se emplea para cubrir techos y azoteas. Los esquistos se forman por metamorfismo más intenso, son de tamaño de grano medio a grueso y exhiben una patente esquistosidad con superficies menos planas que en las pizarras o filitas (Fig. 16). Tienen una composición mineral más variada que depende del grado metamórfico y puede incluir, además de cuarzo y filosilicatos (micas, clorita, talco), a minerales tales como cloritoide, granate, anfíboles, estauroilita, cianita, sillimanita, etc. que se utilizan como criterio de clasificación. Su utilidad es menor, aunque en algunos lugares se utilizan en la construcción de muros.

Los gneises presentan como característica más típica una estructura foliada en la que alternan finas bandas, o lantejones, de espesor milimétrico a centimétrico que tienen composición y coloración diferentes. Las bandas claras están constituidas por cuarzo y feldespatos (feldespato potásico y plagioclasa), estos últimos en una proporción superior al 20% del total de la roca (Fig. 17). En las bandas oscuras predominan micas (biotita o moscovita) y, ocasionalmente, hornblenda. El tamaño de grano es de medio a grueso. La composición de muchos gneises y, en algunos casos, su apariencia es similar a la de los granitos por lo que han sido usados con los mismos fines que éstos. Su interés como material de construcción disminuye a medida que aumenta su contenido en mica.

Las cuarcitas son rocas metamórficas procedentes de areniscas que están compuestas muy mayoritariamente por cuarzo (Fig. 18). Formalmente, se requiere una proporción de cuarzo superior al 80%, aunque en ocasiones se clasifican dentro de este tipo a rocas con contenidos en cuarzo algo inferiores a este valor. Otros minerales presentes en cantidades destacables son los feldespatos y las micas. Los minerales minoritarios que pueden contener son muy numerosos. Sus colores típicos son blancos o

grises, aunque la presencia de óxidos de hierro les confiere tonos rojizos. La estructura que presentan es masiva o bandeada y la textura es granoblástica, más o menos esquistosa. Son rocas de grano fino a medio, muy resistentes a la alteración, con gran resistencia mecánica y gran dureza (7) que, a veces, presentan dificultades de extracción. Han sido utilizadas como material de construcción de muros.

BIBLIOGRAFÍA

- ABALLE, M.; LOPEZ RUIZ, J.; BADÍA, J.M. Y ADEVA, P. (eds.) (1996). Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X. C.S.I.C. y Ed. Rueda, Madrid.
- BLATT, H. Y TRACY, R.J. (1995). Petrology. Igneous, sedimentary and metamorphic. Freeman & Co., New York.
- CASTRO DORADO, A. (1989). Petrografía básica. Paraninfo, Madrid.
- GREENSMITH, J.T. (1989). Petrology of the sedimentary rocks. Unwin Hyman, London.
- LÓPEZ JIMENO, C. (ed.) (1996). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Entorno Gráfico, Madrid.
- MACKENZIE, W.S. Y ADAMS, A.E. (1997). Atlas en color de rocas y minerales en lámina delgada. Masson, Barcelona.
- NESSE, W.D. (1991). Introduction to optical mineralogy. Oxford Univ. Press, Oxford.
- POWDER DIFFRACTION FILE. Joint Committee on Powder Diffraction Data; American Society for Testing and Materials. Swarthmore, PA: JCPDS, 1974-84.
- RAYMOND, L.A. (1996). Petrology. The study of igneous, sedimentary and metamorphic rocks. WCB/McGraw Hill, Boston.
- RODRÍGUEZ GALLEGO, M. (1982). La difracción de los rayos X. Alambra, Madrid.
- SHELLEY, D. (1993). Igneous and metamorphic rocks under the microscope. Chapman & Hall, London.

Morteros de restauración y morteros antiguos. Técnicas de estudio

Olga Cazalla Vázquez

Centro de Instrumentación Científica, Universidad de Granada

María José de la Torre López

Departamento de Geología, Universidad de Jaén

1. INTRODUCCIÓN

Según la norma UNE 83-800-94, un mortero se define como la mezcla de aglomerante inorgánico (cal, cemento, yeso, arcillas, ...), árido y agua, a veces puede contener ciertas sustancias orgánicas y/o inorgánicas, que mejoran sus propiedades. Todos estos componentes que constituyen un mortero deben estar en tales proporciones que permitan que la mezcla sea trabajable cuando está fresca y con propiedades físico-mecánicas aceptables, (tales como resistencia, deformabilidad, adherencia, porosidad y permeabilidad al agua entre otras), además de tener cierta durabilidad al endurecerse. También se puede incluir en este tipo de material los hormigones y los llamados tapiales. Los hormigones se diferencian de los morteros en el tamaño de grano del árido: en los morteros está comprendido entre 0.0075 y 5 mm y en los hormigones es superior a 5 mm. El tapial puede ser considerado un caso particular del hormigón; se trata de una forma de edificación que utiliza como materiales tierra mezclada o no con un aglomerante (normalmente cal) junto con árido de diverso tamaño y agua. La particularidad de esta técnica es el modo de puesta en obra, se utiliza un molde formado por dos tableros planos y paralelos unidos por costales o agujas. En esta estructura se van echando tongadas que se apisonan, quedando compactado todo el material.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS

Generalmente, estos materiales artificiales se van a clasificar según distintos criterios.

2.1. Según su función:

- Morteros de fábrica: los que unen los diferentes elementos de fábrica (piedra, ladrillo, etc.). Tienen buenas características resistentes, adherentes e impermeables.
- Morteros de revestimiento: dan acabado y protección a la fábrica. En este grupo se incluyen:
 - Enfoscado: es la primera aplicación del mortero sobre el soporte, es decir, directamente encima del material del muro. Protege a éste de las agresiones, proporciona una superficie plana y sirve de base al revoco.
 - Revoco: es de acabado. Se elabora a base de cal y arena fina y puede estar constituido por varias capas.
 - Estuco: de acabado. Formado por cal en pasta (o yeso) y mármol pulverizado.
 - Enlucido: es un revestimiento que proporcionar superficie fina de acabado.
- Morteros de decoración: son empleados como acabado de los paramentos con fines ornamentales.

2.2. Según la naturaleza del aglomerante:

Los aglomerantes son los componentes principales en los morteros. Son los responsables de unir adecuadamente los elementos estructurales ya que permiten el fraguado y endurecimiento del mortero, deben estar formados por partículas muy finas y ser más reactivos químicamente que el resto de los componentes. Según este criterio los morteros se dividen en:

· Mortero de barro: es el elaborado con tierras arcillosas y agua, endurece por evaporación del agua. Se emplea para juntas y revestimientos de fábricas de adobe, aunque actualmente se encuentra es desuso.

· Mortero de yeso: es el formado por yeso cocido a alta temperatura (110 y 160 °C), que una vez molido se mezcla con agua y en ocasiones con arena para formar de nuevo yeso al fraguar o endurecer. Sus principales propiedades son su mediana dureza, fraguado muy rápido, resistencia al fuego, gran adherencia y alta conductividad térmica. Su principal inconveniente es su escasa resistencia a los agentes atmosféricos, lo que unido a su alta solubilidad, hace que no se utilicen en exteriores. Se pueden clasificar según su temperatura de cocción en hemihidrato o basanita (110 y 160 °C) y en yeso anhidro o anhidrita (más de 160 °C).

· Mortero de cemento: se fabrica a partir del producto obtenido al calcinar entre 1400 °C y 1500 °C, una mezcla de un componente calcáreo o principal (75-90% del crudo son margas calcáreas, calizas, etc.) y un corrector o componente secundario (10 al 25% del crudo, son arcilla, pizarras, etc.), que aporta los componentes químicos adicionales. Se obtiene el clinker de cemento con fases minerales como: C_2S (silicato tricálcico), C_2S (silicato bicálcico), C_3A (aluminato tricálcico) y C_4AF (ferritoaluminato tetracálcico). Este clinker se muele y se le agrega un regulador del fraguado (yeso o anhidrita). Las principales características de los morteros de cemento son: fraguado o endurecimiento muy rápido tanto al aire como en agua por ser los productos de su hidratación estables en tales condiciones, elevada dureza, alta resistencia mecánica, baja porosidad y módulo elástico alto. Su principal inconveniente es que contiene o puede dar origen a sales solubles.

· Mortero de cal: la cal es el aglomerante tradicional por excelencia. Desde que la materia prima se extrae de la cantera hasta su puesta en obra, la cal sufre una serie de procesos que son conocidos como “ciclo de la cal”. Consiste en una primera fase en someter a calcinación (800-1200 °C) la piedra caliza (o dolomía) para obte-

ner cal viva (cal viva: CaO o/y periclase: MgO); su posterior apagado con agua permite obtener cal apagada (portlandita: $Ca(OH)_2$ o brucita: $Mg(OH)_2$), componente que cuando se pone en contacto con el CO_2 atmosférico se transforma de nuevo en el correspondiente carbonato (calcita o dolomita). Las propiedades que caracterizan a estos morteros son: endurecimiento lento (años a siglos), la resistencia se obtiene a muy largo plazo, escasa a media durabilidad frente a los agentes atmosféricos y gran retracción de volumen. Las cales se pueden clasificar:

- Según su forma de endurecer:
 - Cales aéreas (UNE 41067): cuya principal característica es la de endurecer al aire. Se obtiene a partir de calizas muy puras.
 - Cal hidráulica (UNE 41068): por endurecer en contacto con agua. Se produce por calcinación de calizas impuras que contienen hasta un 20% de impurezas. También se puede obtener mezclando caliza pura molida y arcillas. Para clasificarlas, se atiende al índice de hidráulicidad ($i = SiO_2 + Al_2O_3 / CaO$)
- Según su composición química (UNE 80-501-93):
 - Cal dolomítica o magra (cal gris): Es la cal aérea que contiene más del 5% de óxido magnésico sobre muestra calcinada. Se suele utilizar en trabajos toscos y en morteros para asentar fábricas.
 - Cal grasa: Es la cal aérea que contiene, como máximo el 5% de óxido magnésico, la caliza de procedencia es muy pura (90% CaO). Se emplea en revocos, blanqueos, acabados y morteros de albañilería.
- Según su contenido en agua:
 - Cal en polvo: Es la cal apagada en la que el agua añadida durante su hidratación es la necesaria para que se complete la reacción. Ofrece un aspecto exterior pulverulento.
 - Cal en pasta: Es la cal apagada a la que se ha añadido agua en exceso durante su hidratación. Ofrece un aspecto exterior pastoso. Se le puede añadir agua hasta obtener la consistencia deseada. Se obtiene de dos formas, la primera mediante apagado de cal viva con un exceso de agua y también mezclando cal

apagada en polvo y agua, si bien la cal en pasta obtenida de este modo resulta de menor calidad que la obtenida con el primer procedimiento.

- Morteros con ligantes orgánicos: Recientemente se han incorporado a los materiales disponibles para la edificación y restauración este tipo de morteros, normalmente a base de resinas o siliconas. Su empleo suele ser limitado y con fines específicos, adhesivo o de impermeabilización. Sus principales inconvenientes son sus grandes diferencias de comportamiento con los materiales inorgánicos y su rápida degradación frente a ciertos agentes como la luz solar y otros.

- Mortero bastardo: en este tipo de material el aglomerante es una mezcla de cal y yeso o bien de cal y cemento.

3. EL ÁRIDO

Otro de los constituyentes de los morteros son los áridos, que es el material pétreo natural o artificial cuyo tamaño está comprendido entre 0.075 y 5 mm. Como ya se ha señalado, esta característica permite diferenciar a los morteros de los hormigones, ya que en éstos se supera un tamaño de árido de 5 mm. Su principal misión es la de estabilizar el volumen, hacer de relleno y disminuir la retracción durante el secado del mortero. Además de proporcionar color y textura, deben ser químicamente inertes con el resto de componentes. En caso contrario se pueden producir reacciones de tipo álcali-árido (en los morteros de cemento, ya que éste contiene álcalis); esta reacción puede ser muy destructiva, ya que en presencia de humedad se generan fases minerales que producen degradación. La reacción hidróxido cálcico-árido se da sobre todo en los áridos que contienen feldespatos. De manera general, se aconseja evitar los áridos contaminados, deben utilizarse áridos limpios, perdurables, duros y que no contengan impurezas perjudiciales (materia orgánica, minerales de la arcilla, óxidos de hierro, sulfuros, sulfatos, cloruros, compuestos de magnesio y zeolitas).

Existen otras características del árido que van a condicionar el comportamiento final de un mortero:

- La morfología de los áridos: lisa, vítrea, granulada, cristalina, cavernosa, porosa, redondeada y angulosa o rugosa. Han de evitarse las formas planares (plaquetas y agujas) porque influyen en la docilidad de un mortero y las superficies lisas y redondeadas porque influyen en la adherencia entre el aglomerante y el árido. Las superficies rugosas o angulosas permiten mejor adherencia.

- Su granulometría: tiene que ser variada, por distribución de tamaños, de forma que favorezca el empaquetamiento entre partículas. Por su parte, el contenido en finos reduce la resistencia y la porosidad.

- La porosidad del árido, es un factor determinante. Cuando se requieran morteros especiales, como por ejemplo morteros ligeros, su porosidad debe ser alta.

Los áridos se van a clasificar en función de:

a) Procedencia: se distinguen los áridos naturales en sentido estricto (arenas y gravas procedentes de ríos, playas, etc.), áridos de trituración o de machaqueo (preparados a partir de rocas naturales) y artificiales (casi siempre desechos industriales).

b) Naturaleza: se pueden dividir en agregados silíceos (arenas graníticas, de cuarzo, tanto de ríos como de aluviones, arena marina, también puzolanas, o tobas volcánicas), agregados calcáreos (calizas, dolomías y materiales fosilíferos), agregados mixtos y otros agregados como arcillas, fragmentos de cerámica y piezas de morteros reutilizadas.

4. ADITIVOS

Los aditivos o adiciones (UNE-83-200-84), son aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón, mortero o pasta antes o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario, en una proporción no superior al 5% del peso del cemento (salvo casos especiales), producen la modificación deseada en dicho hormigón, mortero o pasta -en estado fresco y/o

endurecido- de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento; no deben actuar desfavorablemente en la calidad de ejecución de la obra, la durabilidad y/o la resistencia a los agentes atmosféricos.

Se suelen clasificar en:

a) Activas, son ciertos materiales naturales o artificiales, que poseen :

- propiedades hidráulicas: aquellas que tienen los materiales que son capaces de endurecer en presencia de agua o de humedad (por ejemplo las escorias siderúrgicas).

- características puzolánicas: es la capacidad de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria y en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica. Participan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla. Pueden clasificarse en puzolanas naturales (rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza traquítica o pumítica) y en puzolanas artificiales (subproductos silíceos vítreos como las cenizas volantes, humo de sílice, ciertas escorias siderúrgicas y arcillas activadas térmicamente).

b) Inertes o no activas, confieren propiedades especiales, como plasticidad, color y adherencia entre otras, pero sin alterar el fraguado. Dentro de este grupo se encuentra, por ejemplo, el filler calizo.

5. DOSIFICACIÓN

La dosificación (UNE 83-800-94) es la proporción en volumen o en peso de los distintos materiales integrantes del mortero (aglomerante/árido); va a depender de la finalidad del mortero, de su composición y la resistencia mínima deseada (Renison, 2000). Normalmente se expresa como la razón entre aglomerante y árido. Se tiende a que esta relación sea baja, usando sólo la cantidad mínima necesaria de aglomerante (Ashurt, 1990). Generalmente, en morteros tradicionales, la más frecuente es la (1:3) (Malinosw-

ki, 1981; Sbordon-Mora, 1981; Carrington y Sawlow, 1995), aunque también se ha utilizado desde la (1:2) hasta la (1:10).

6. EL AGUA

El agua empleada en la fabricación de un mortero, debe ser limpia y sin partículas contaminantes (disueltas o en suspensión). Si se emplean aguas marinas, de río, o procedentes de embalses, deben ser previamente analizadas para determinar sus contenidos en impurezas y sales.

7. MORTERO DE RESTAURACIÓN

Una vez descrito lo que es un mortero en términos generales (sus constituyentes, su clasificación y sus funciones) se abordará el estudio de los morteros de restauración (incluyendo en este término, hormigón, tapial, estuco, revoco, etc.). Para elaborar un buen mortero de restauración es esencial conocer primero el material al cual va a sustituir. Resulta necesaria una caracterización exhaustiva del mortero original (tipo de aglomerante, de árido, dosificación de la mezcla y relación agua/cal). A partir de estos datos se puede formular un mortero de restauración lo más similar posible al mortero que va a sustituir y adecuado a su función en el edificio. En la antigüedad los morteros tradicionales eran generalmente de cal (Figura 1), en la mayor parte de las ocasiones fueron fabricados tras una selección especialmente cuidada de sus materias primas (Vitruvio en sus Diez Libros de Arquitectura), eran compatibles con los demás elementos de fábrica y tenían un comportamiento activo, por absorber la agresividad del medio y el estrés interno de la fábrica.

En numerosas restauraciones recientes se han reemplazado por morteros de cemento, lo que ha producido lamentables consecuencias en la conservación de muchos edificios históricos. Los morteros de cemento, aunque tienen muy buenas propiedades físico-mecánicas, son incompatibles con el resto de elementos de fábrica tradicionales, dado que son bastante menos porosos y elásticos, y tienen diferente comportamiento

térmico y mecánico. Además generan un importante impacto visual por su diferente cromatismo, lo que unido a su contenido en sales solubles, generan consecuencias desastrosas e irreparables en el Patrimonio Arquitectónico.

Antes de elaborar un mortero de restauración, se debe desarrollar una investigación paralela entre morteros antiguos y actuales (Figura 2), y definir claramente aspectos como:

- función clara del mortero en el monumento, es decir, cuál es el papel que desempeña (si es de rejuntado, de revestimiento, etc).
- reconstrucción del proceso de deterioro, el motivo por el cual hay que elaborar un nuevo mortero de restauración.
- identificación de los parámetros fundamentales y los métodos de medición estandarizados, lo que conlleva a la necesidad de preparar un plan de intervención interdisciplinar basado en la colaboración de distintos exper-

tos: químicos, físicos, geólogos, ingenieros, arquitectos, historiadores, arqueólogos, etc.

· controles de calidad en los nuevos morteros.

Una vez conocido en detalle el mortero antiguo, se elabora el nuevo mortero de acuerdo con las características mínimas exigibles a este material de construcción (Rota Rossi-Doria, 1986). Éstas son:

- Reproducción lo más similar posible a los morteros que va a sustituir en lo que se refiere a aspectos de color, textura, etc.
- Compatibilidad con los demás elementos de fábrica (piedra, ladrillo, etc). La porosidad debe ser como mínimo igual, y a ser posible mayor que la del mortero original. La resistencia a compresión debe ser menor o como máximo igual a la del mortero original.
- Fácil trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación, facilidad para su puesta en obra en cada caso particular.

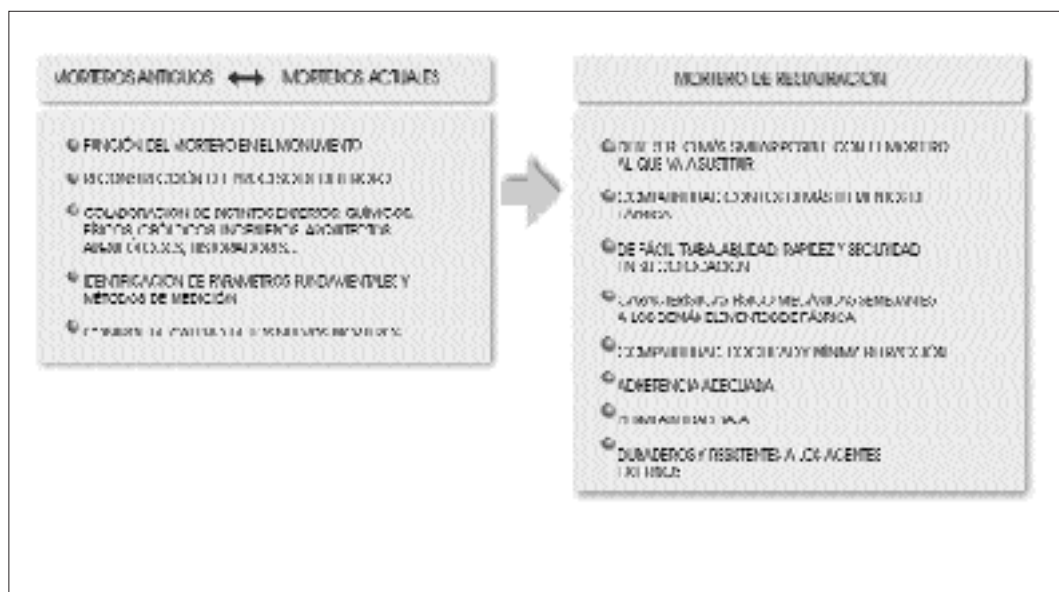


Figura 1. Características de los morteros antiguos y los actuales

- Que sea de elevada compacidad, docilidad y mínima retracción. Con una aplicación adecuada, de modo que sea capaz de amortiguar cualquier movimiento de la fábrica.
- Mínimo contenido posible en sales solubles e iones libres.
- Adherencia adecuada en función de la resistencia de los materiales entre los que se disponga.
- Impermeabilidad a los fluidos y permeabilidad al vapor de agua.
- Durabilidad y resistencia a la acción de agentes externos.

8. TÉCNICAS DE ESTUDIO

De lo anteriormente expuesto se deduce que los estudios acerca de los morteros son imprescindibles para abordar con ciertas garantías cualquier intervención en el Patrimonio Arquitectónico. Sin embargo, no siempre este tipo de inves-

tigación lleva a obtener los resultados deseados. Quizá el primer error que se comete es intentar aplicar la misma metodología de estudio para los morteros modernos de restauración y para los morteros antiguos. Este punto de partida puede conducir al fracaso ya que los objetivos de ambos tipos de estudios son diferentes, así como las condiciones es las que se realizan. El principal objetivo de los estudios de morteros de restauración es conocer su comportamiento en obra, tanto en su estado actual como en el futuro (durabilidad). También se controla el modo en que cada variable del proceso de elaboración influye en las características finales. Una de las ventajas de trabajar con morteros modernos de restauración frente a morteros antiguos es la disponibilidad de muestra. En efecto, en este tipo de estudios podemos proyectar cualquier tipo de experimento que deseemos sin limitaciones referentes a tamaño, morfología o número de muestras, lo que sería impensable en un estudio acer-



Figura 2. Morteros antiguos y de restauración

ca de morteros antiguos. Otro aspecto que conviene señalar es que nosotros “conocemos” perfectamente el mortero que hemos fabricado, de modo que los estudios composicionales de los morteros preparados en laboratorio permiten poner a punto la metodología adecuada para calcular la dosificación en morteros antiguos (Alesandrini et al., 1992)

Para la elaboración en laboratorio de morteros destinados a la investigación, al igual que para los destinados a un trabajo de restauración hay que utilizar materias primas de calidad garantizada en cuanto a los aglomerantes, áridos, agua e incluso aditivos. La dosificación de la mezcla debe ser correcta para cada caso particular. Se deben conseguir mezclas estadísticamente homogéneas mediante un correcto amasado. Por último, debe haber un control por parte del fabricante del mortero no sólo de las materias primas, sino también de los diversos procesos de fabricación.

Una vez elaborado el nuevo mortero de restauración, se le debe hacer un completo seguimiento. Para ello, se efectúan ensayos (todos ellos recogidos en las normas UNE) en las distintas etapas del endurecimiento del mortero: en estado fresco (trabajabilidad, retención de agua, volumen aparente, etc), en proceso de endurecimiento (pérdida de agua, retracción plástica, desarrollo del módulo de esfuerzo, etc.) y una vez ha endurecido. El estudio del mortero endurecido y las técnicas empleadas se detallan a continuación:

- Análisis químico y granulométrico. Existen numerosas técnicas todas ellas encaminadas a calcular el contenido en: CO_2 , CaO , sílice (total, insoluble y soluble), sales solubles, elementos químicos mayoritarios y minoritarios, conglomerante, carbonato cálcico, fracción arena y fracción de residuo fino. Se clasifican en métodos químicos clásicos (Método de Jedrezewska, Frizot, método general, etc.) (Martín Pérez, 1990) y métodos actuales (espectroscopía de plasma, fluorescencia de rayos X, termogravimetría, infrarrojos y cromatografía iónica entre otras).
- Análisis petrográfico-mineralógico. El empleo de cada técnica va a depender de lo que se

requiera en cada caso, aunque normalmente se trata de conocer en detalle la textura, el sistema poroso y la composición mineralógica. Las técnicas empleadas son: difracción de rayos-X, microscopía óptica de luz polarizada, microscopía electrónica de barrido, análisis térmico diferencial, microscopía electrónica de transmisión, microsonda, etc.

- Ensayos físico-mecánicos. Se emplean para caracterizar propiedades como inhomogeneidad y anisotropía de los morteros y caracterizar su comportamiento en obra. Se efectúan sobre un gran número de probetas y se debe garantizar la repetitividad de la medida. Los parámetros a determinar son:

- Propiedades hídricas de los morteros, como la absorción y desorción de agua o secado (RILEM/25 PEM). Se utilizan para la evaluación de la eficacia de tratamientos de consolidación y protección (Cazalla et al., 2000), caracterización del material sano y, por comparación, evaluación de efectos de envejecimiento natural o artificial.

- Color, por ser una característica física muy importante en restauración, ya que implica al aspecto estético. En el caso de los morteros, el color va a depender de las características petrográficas, es decir, de su composición, textura y estructura (Cazalla, 2002). Influye esencialmente el árido y los aditivos presentes aunque sea en muy baja proporción. Las formas de medida son: cualitativa (por simple observación visual); semicuantitativa (por comparación con patrones, p.e con cartas de colores del sistema Munsell) y cualitativa (con colorímetros y espectrofotómetros, en los cuales se obtienen parámetros numéricos). Es una técnica no destructiva.

- Distribución del sistema poroso. De ella dependen parámetros tan importantes como la permeabilidad (al agua o a los gases), la absorción y muchos otros que determinan en definitiva la durabilidad del mortero (Cazalla, 2002). El método más utilizado es la porosimetría de inyección de mercurio.

- Propiedades dinámicas. Se basan en el análisis de las deformaciones que se producen

en un material al aplicarle un esfuerzo mecánico. Las técnicas se engloban generalmente en procedimientos ultrasónicos, que además de servir para medir otros parámetros como por ejemplo el coeficiente de anisotropía (Cazalla et al., 1999), tiene la enorme ventaja de tratarse de una técnica no destructiva.

- Propiedades mecánicas: encaminadas a determinar la dureza de un material, propiedad en la que influyen sus componentes y del grado de cohesión entre ellos. Suele determinarse la dureza superficial y las resistencias a compresión, flexión y tracción. Estas determinaciones permiten medir el grado de deterioro, evaluar el éxito de ciertos tratamientos de consolidación y protección y predecir la durabilidad de una muestra no tratada.

9. MORTEROS ANTIGUOS. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

De modo paralelo al estudio de los morteros de reposición, el estudio de los morteros presentes en los edificios históricos puede proporcionar información relevante en la conservación del patrimonio histórico. Por una parte, la caracterización de los morteros es ya un dato muy importante, permite conocer sus propiedades y su comportamiento en obra. También es interesante esta caracterización para reproducirlo en las intervenciones a ejecutar sobre el monumento o al menos, hacer compatible el nuevo mortero de restauración con el resto de materiales originales. El estudio de los morteros antiguos, asimismo nos puede dar las claves de las causas y procesos de alteración sufridos en el edificio, si bien esto es más difícil de establecer que en la piedra natural. La razón es que en la piedra podemos obtener muestras no alteradas de cantera y comparar con las del edificio. De este modo podemos observar diferencias químicas, diferencias mineralógicas y variaciones en las propiedades físico-mecánicas. Sin embargo, en los morteros antiguos debemos “suponer” el estado original no alterado, estudiando las muestras que aparezcan más intactas y comparándolas con las alteradas.

Por último, el objetivo arqueométrico es muy prometedor. Con frecuencia en un mismo edificio o conjunto monumental coexisten diferentes periodos de construcción y distintas restauraciones. A veces la diferenciación cronológica de las diversas etapas resulta complicada, ya que raramente disponemos de fuentes escritas y no siempre se puede establecer una distinción estilística clara entre los distintos periodos de construcción (además, hay que tener en cuenta las restauraciones fieles al modelo antiguo). En estos casos, el estudio de los morteros antiguos puede ser de gran ayuda, permitiendo datar las distintas zonas y diferenciando desde las zonas “originales” del edificio hasta las restauraciones más recientes.

10. REVISIÓN CRÍTICA DE LOS MÉTODOS DE ESTUDIO DE MORTEROS ANTIGUOS

Desde diversos foros se ha propuesto (Rota Rossi-Doria, 1990, por citar uno de los ejemplos más conocidos) la elaboración de una metodología uniforme para el estudio de los morteros antiguos. La idea es correcta, pero se enfrenta a dificultades reales. Sobre todo, no se puede uniformizar la metodología ya que en cada caso, en cada edificio histórico son diferentes las incógnitas a las que nos enfrentamos. Alessandrini et al. (1989) en un trabajo cuyo objetivo era realmente un caso de estudio concreto, proponen quizá la metodología más completa y rigurosa que encontramos en la bibliografía. De cualquier modo, en un tema con tantos matices como el estudio de morteros antiguos quizá es más operativo dar respuesta a las preguntas planteadas en cada situación, que prescribir una metodología rígida que deba ser empleada en todos y cada uno de los casos.

Con el objetivo puesto en conocer la cronología de las edificaciones mediante los morteros quizá los primeros métodos en los que pensamos sean los métodos radiométricos. Los métodos de datación absoluta, que para las edades que nos interesan son en concreto los métodos basados en el ^{14}C , parecían realmente prometedores. Este método se aplica normalmente a la materia orgánica. Su aplicación a los morteros se basa en que la reacción de carbonatación es similar a la for-

mación de una sustancia orgánica en tanto que incorpora al material el carbono del CO_2 del aire. Sin embargo, a pesar de lo prometedora que parece en teoría, no se conoce en la literatura (Zouridakis et al., 1987; Baxter & Walton, 1970; de la Torre, 1995) ningún éxito completo de esta técnica. Normalmente se obtienen resultados más antiguos de lo esperado, que pueden ser interpretados como que los gránulos mal calcinados de la cal no se han “puesto a cero” y conservan parte del carbono de origen de la calcita de la roca utilizada como materia prima. Por tanto y hasta que no se ponga a punto alguna otra metodología de datación absoluta, debemos seguir confiando en la datación basada en el estudio de morteros por comparación entre muestras (datación relativa). Para ello siempre es imprescindible disponer de morteros bien datados, que se utilizan como patrón de comparación para las muestras dudosas.

De este modo, tanto para lograr conocer la cronología como para alcanzar el resto de los objetivos (caracterización, elaboración de morteros de restauración similares, conocimiento del grado y causas del deterioro) debemos caracterizar lo más fielmente posible el material.

La primera de las metodologías propuestas para la caracterización de morteros fue la química (Jedrzejewska, 1960). En su momento contó con muchos defensores que pusieron a punto diversos métodos, pero hoy está prácticamente en desuso. Furlan y Bissegger (1975), demuestran cómo no es ni mucho menos una técnica infalible. Ponen como ejemplo tres morteros con una composición química casi idéntica y sin embargo, muy diferentes tanto en cronología como en procedencia, incluso en comportamiento frente a la alteración. Los análisis químicos, por tanto, pueden tener utilidad en determinados problemas pero no se recomiendan como metodología de rutina.

Reflexionando acerca de este ejemplo, llegamos a la principal dificultad en el estudio de los morteros. Sea cual sea la técnica de estudio siempre encontraremos el obstáculo de que estudiamos una mezcla de dos componentes diferentes (árido y ligante) de los que desconocemos la proporción relativa de uno y otro. Por tanto,

siempre se debe recurrir a las técnicas visuales o microscópicas, que nos permiten identificar componentes, sin desdeñar las técnicas analíticas de conjunto, que proporcionan información interesante pero que debe ser interpretada con la ayuda de las técnicas visuales.

Cuando se aborda el estudio de un mortero habitualmente lo primero que conviene identificar es el tipo de ligante. Normalmente se hace a través de DRX y microscopía óptica de polarización (microscopía petrográfica). Los ligantes más utilizados hasta la segunda mitad del siglo XIX son la cal y el yeso. También se utilizó la arcilla, si bien es muy fácilmente identificable, incluso por simple inspección visual. A partir de la segunda mitad del siglo XIX y sobre todo, del XX son comunes los ligantes hidráulicos (cemento). Cuando tenemos los resultados del análisis semicuantitativo por DRX, lo primero que se debe mirar es la cantidad de calcita y/o dolomita presentes. Normalmente la presencia de estos minerales se corresponde con un mortero con ligante de cal, pero no se puede asignar directamente todos los carbonatos a este origen. A través del estudio microscópico se puede detectar si una parte o todos esos carbonatos forman parte del árido. Entre los componentes del mortero también puede aparecer yeso, el cual puede ser interpretado como ligante, como árido o, muy frecuentemente, como mineral de alteración (de la Torre et al, 1991). La principal herramienta para interpretar la función del yeso en un mortero es también la microscopía petrográfica. Los componentes hidráulicos del cemento se detectan también mediante DRX, si bien sus poderes reflectantes son bajos, lo que puede llevar a que en la práctica pasen desapercibidos si están en baja proporción. Se pueden estudiar también por métodos petrográficos (Furlan y Pancella, 1982).

El árido es otro de los parámetros fundamentales a la hora de caracterizar un mortero. Importa tanto su composición, como su proporción, forma y tamaño. Además de las ya citadas técnicas de DRX y microscopía petrográfica, se puede proceder a la disolución del ligante y al estudio granulométrico del residuo (Papayianni y Karavezoglou, 1993). Este tipo de métodos sólo son realmente aplicables a los morteros de cal con

árido silíceo. Los datos procedentes del análisis digital de imágenes microscópicas y macroscópicas pueden dar bastante información en este aspecto (de la Torre et al., 1996), en especial cuando se trabaja con hormigones antiguos.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) complementa la información básica que se obtiene con las técnicas anteriores. Proporciona excelentes imágenes de la morfología de los áridos, así como de los cristales de ligante. Con el SEM se puede observar la red de poros, obteniéndose datos de forma, tamaño y conexiones entre distintos tipos de poros. La cuantificación de estos parámetros se hace mediante la porosimetría de inyección de mercurio. También ayudan al conocimiento de los poros y sus relaciones los ensayos hídricos. Sin embargo, muy raramente se pueden aplicar este tipo de ensayos a los morteros antiguos. La razón está en la escasa cantidad de muestra de la que se suele disponer para el estudio de morteros antiguos, incompatible con las normas que rigen este tipo de ensayos (en

cuanto a número de probetas y dimensiones de las mismas).

En este sentido, se tiende a utilizar cada vez más las técnicas no destructivas, particularmente los ultrasonidos y los métodos colorimétricos, que permiten obtener un gran número de datos objetivos sin causar daño alguno a los edificios.

No se pretende aquí hacer una relación exhaustiva de métodos de estudio de morteros, sino dar una visión de los más comunes, sin descartar ningún otro método que puede dar respuesta a alguna cuestión más específica. A modo de conclusión podemos decir que se dispone actualmente de los medios para caracterizar de modo bastante preciso los morteros presentes en los edificios históricos, lo que a su vez nos permite obtener conclusiones de tipo cronológico y disponer de los datos precisos para formular morteros de restauración correctos.

BIBLIOGRAFÍA

- LESSANDRINI, G.; BONECCHI, R.; BUGINI, R.; FEDELI, E.; PONTICELLI, S.; ROSSI, G.; TONIOLO, L. (1989) Bramante in Milan: The Cascina Pozzobonelli. Technical Examination and Restoration. *Studies in Conservation*, 34, pp: 53-66.
- ALESSANDRINI, G.; BUGINI, R.; FOLLI, L.; REALINI, M.; TONIOLO, L. (1992) The compositional ratios of mortars. Comparison between chemical and petrographical methods. *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, vol 2, pp: 667-675.
- ASHURT, J. (1990). Mortars for stone building. *Conservation of Building and Decorative Stone*. Vol. 2, pp: 78-96.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 83-800-94. Morteros de albañilería. Definiciones y especificaciones.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 41067. Cal aérea para construcción. Clasificación. Características.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 41068. Cal hidráulica para construcción. Clasificación. Características.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 80-501-93. Cales para construcción. Parte 1: definiciones y especificaciones.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 83-200-84. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Clasificación y definiciones.
- BAXTER, M.S.; WALTON, A. (1970) Radiocarbon Dating of Mortars. *Nature*, vol 225, pp: 937-938.
- CARRINGTON, D. and SWALLOW, P. (1995). "Lime and lime mortars"- Part two. *Journal of Architectural Conservation*, No 1, March, pp: 7-22.
- CAZALLA, O.; SEBASTIÁN, E.; CULTRONE, G.; NECHAR, M. AND BAGUR, M.G. (1999). Three-way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testint to evaluate air lime mortars in cultural heritage conservation projects. *Cement and Concrete Research* 29, pp: 1749-1752.
- CAZALLA, O.; SEBASTIÁN, E.; RODRÍGUEZ, C.; CULTRONE, G. AND DE LA TORRE, M. J. (2000). Behaviour of aged hydrated lime mortars used in cultural heritage conservation against aggressive environments. *Quarry-laboratory-monument. International Congress- Pavia (Italia)*, Vol. 1, pp: 225-231. Zezza U. Ed.
- CAZALLA, O. (2002). Morteros de cal. Aplicación en el Patrimonio Histórico. Tesis Doctoral de la Universidad de Granada. 242 pp.
- DE LA TORRE LÓPEZ, M.J.; RODRÍGUEZ GORDILLO, J.; SEBASTIÁN PARDO, E. (1991) Presencia de yeso en morteros y hormigones nazaríes en la Alhambra. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 14-1, pp: 3-4.

- DE LA TORRE LÓPEZ, M.J. (1995) Estudio de los materiales de construcción en la Alhambra. Monografía de Arte y Arqueología, Universidad de Granada, 213 p.
- DE LA TORRE LÓPEZ, M.J.; SEBASTIÁN PARDO, E.; RODRÍGUEZ GORDILLO, J. (1996) A study of the wall material in the Alhambra (Granada, Spain). *Cement and Concrete Research*, vol. 26, 6, pp: 825-839.
- FURLAN, V.; BISSEGGER, P. (1975) Les mortiers anciens. *Historie et essais d'analyse scientifique. Revue suisse d'Art et d'Archéologie*, vol. 2, pp: 2-14.
- FURLAN, V.; PANCELLA, R. (1982) Examen microscopique en lumière réfléchie de ciments, bétons et mortiers. *Chantiers/Suisse*, vol 13, 11, pp: 25-30.
- JEDRZEJEWSKA, H. (1960) Old Mortars in Poland. *Studies in Conservation*, 5, pp: 132-138.
- MALINOWSKI, R. (1981). Ancient mortars and concretes, durability aspects. *Mortars, Cements and Grout used in Conservation of Historic Buildings. Proceeding of the Symposium, ICCROM, Rome*, pp: 341-350.
- MARTÍN PÉREZ, A. (1990) Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico artístico. *Fundación Ramón Areces*, pp.: 531-562.
- PAPAYIANNI, I.; KARAVEZIROGLOU, M. (1993) Aggregate gradation of ancient mortars. Relationship to strength and porosity. *Proc. of the International Congress Conservation of Stone and other Materials*, Paris, vol 2, pp: 493-501.
- RENISON, G. C. (2000). Consideraciones y criterios que determinan el tipo de mezclas a utilizar en trabajos de albañilería. (Internet: <http://www.construir.com/C/consulta/Renison/document/mezcla.htm>).
- RILEM. (1980). Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *RILEM Commission 25-PEM: Protection et Erosion des Monuments*, pp: 175-253.
- ROTA ROSSI-DORIA, P. (1986). Mortars for restoration: basic requirements and quality control. *Materiaux et Construction*. Vol 19, no 114, pp: 445-448.
- ROTA ROSSI-DORIA, P. (1990). Report on the RILEM Workshop Ancient Mortars and Mortars for Restoration. *Materiaux et Construction*. Vol 23, pp: 235-238.
- SBORDONI-MORA, L. (1981). Les matériaux des enduits traditionnels. *Mortars, Cements and Grouts used in Conservation of Historic Buildings. Proceeding of the Symposium, ICCROM, Rome*, pp: 375-383.
- VITRUVIO POLION, M. (1787). *Los diez libros de Arquitectura*. Traducido y comentado por D. José Ortiz y Sanz. Presbítero. Madrid, Imprenta Real.
- ZOURIDAKIS, N.; SALIEGE, J.F.; PERSON, A.; FILIPPAKIS, S.E. (1987) Radiocarbon dating of mortars from ancient greek palaces. *Archaeometry*, 29, 1, pp: 60-68

Los materiales cerámicos en el patrimonio arquitectónico

Giuseppe Cultrone & Eduardo Sebastián

Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada

INTRODUCCIÓN

La cerámica puede considerarse como uno de los productos artificiales más antiguos creado por el hombre. Sin embargo, el interés por su estudio ha sido bastante limitado, quizás porque la piedra natural u ornamental tiene unas connotaciones y valores de orden estético, ideológico e incluso religioso, que han inducido a su elección como objeto preferente de investigación. Por otra parte, el estudio de esta clase de materiales artificiales permite obtener conclusiones de tipo arqueométrico (de la Torre, 1994). Dicho de otro modo, en los materiales fabricados por el hombre queda la huella de la civilización que los produjo, lo que facilita información tanto puramente tecnológica, como de tipo histórico, siempre que sea factible una correlación época versus tipo de material.

Todos los materiales cerámicos tradicionales presentan como denominador común que están fabricados a partir de una materia prima rica en arcilla y que han sido sometidos a un proceso más o menos intenso de cocción. Los ladrillos son los productos cerámicos más comunes y tienen una gran importancia en las fábricas de numerosos edificios históricos. Se caracterizan por tener unos costes bajos, resistir bastante bien la humedad y el calor, y ser bastante duraderos.

Además del ladrillo existe toda una serie de productos cerámicos utilizados en edificios como materiales de acabado (terracota, baldosa, azulejo) o de cubrición (teja, bovedilla, vigueta).

Por lo que atañe al origen de la cerámica, prevalece la idea que la producción cerámica se generó en distintos puntos independientes entre

si, y no en un lugar único desde el que más adelante se difundió a los demás. Las diferencias entre la cerámica de una cultura y de otra se deben sobre todo al tipo de materia prima empleada y a la técnica de cocción (Mari, 1998).

TIPOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN

Los materiales cerámicos presentan tal variedad que es difícil realizar una clasificación única, ya que se pueden adoptar distintos criterios que conducen a distintas clasificaciones. Fabbri (1988), sintetizando las ideas de otros autores, agrupa los productos cerámicos en tres categorías en función de la composición química y mineralógica:

- 1) materiales cerámicos silicatados, fabricados a partir de arcillas u otros silicatos;
- 2) materiales cerámicos con óxidos, de tipo simple y complejo;
- 3) materiales cerámicos con elementos y compuestos sin oxígeno.

A su vez, cada uno de estos grupos se puede dividir ulteriormente sobre la base de la granulometría de los componentes. Es factible, también, utilizar algún otro criterio alternativo de clasificación; así, considerando las propiedades y sus aplicaciones se pueden distinguir:

- a) productos cerámicos tradicionales (con funciones estéticas, estructurales, ornamentales y domésticas);
- b) productos cerámicos especiales (con funciones mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas, biológicas y nucleares).

Finalmente, se pueden dividir los productos cerámicos tradicionales en 4 grandes grupos (cerámica de mesa, sanitaria, de revestimiento, ladrillos) en función del tipo de arcilla utilizada (Fabbri, 1998). En la tabla 1 se recoge la clasificación de éstas cerámicas.

CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS Y PETROGRÁFICAS

La determinación de la composición mineralógica de un producto cerámico puede llevarse a cabo a través de técnicas de identificación como la difracción de rayos X, la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido. Estas últimas dos permiten, además, caracterizar la textura de las muestras.

El desarrollo de una pieza cerámica depende principalmente de las fases minerales presentes en el material de partida y de la temperatura de cocción. Desde un punto de vista cristalográfico, la reacción irreversible de endurecimiento que tiene lugar cuando una arcilla se calienta fuertemente, es una característica fundamental para la industria cerámica, constituye en definitiva, la formación de un material duro aunque poroso (Croatto, 1979).

Por lo que atañe a los componentes minerales, ilita caolinita y clorita (tabla 1) son las fases

arcillosas más comunes presentes en los productos cerámicos. Junto a las arcillas se encuentran, además, otros constituyentes como óxidos o hidróxidos de Fe-Al, sulfuros, sulfatos, carbonatos, otros silicatos e incluso materia orgánica.

La cocción es un proceso fundamental que imparte las propiedades finales a las piezas cerámicas fabricadas (Barahona, 1974; Buys y Oakley, 1996), mediante ella la arcilla se transforma en un nuevo material. En las industrias modernas el primer incremento de temperatura se verifica por debajo de 60 °C, durante una hora, para eliminar gradualmente el agua atrapada en los poros del material arcilloso, de manera que, una vez alcanzada la temperatura de ebullición del agua, ya se ha evaporado la mayor parte de ella. Cuando se alcanzan los 200 °C comienza a descomponerse la materia orgánica. Entre 450 y 550 °C se observa la deshidratación de los filosilicatos hasta su completa desaparición por encima de los 900 °C. A esta temperatura los productos cerámicos comienzan a vitrificarse y se forman nuevas fases minerales: es el caso de la mullita y de la sanidina. En presencia de carbonatos se verifica la descomposición de dolomita y calcita (según Boynton, 1980, alrededor de los 700 °C para la dolomita y entre 830 y 870 °C para la calcita) y la formación de silicatos de calcio y/o magnesio como la gehlenita a los

Tabla 1. Tipos de arcillas utilizadas en materiales cerámicos (Fabbri, 1998).

Cerámica de mesa	Porcelana	Caolín y arcillas caoliníticas
	Lozas	
	Azulejos	Arcillas ílítico-cloríticas
	Cerámica de cocina	
Cerámica sanitaria	Cerámica sanitaria	Caolín y arcillas caoliníticas
Revestimientos	De pasta blanca	Caolín y arcillas caoliníticas
	De pasta roja	Arcillas ílítico-cloríticas
	Cocidos una vez	
	Cocidos dos veces	
Ladrillos	Terracota	Arcillas ílítico-cloríticas

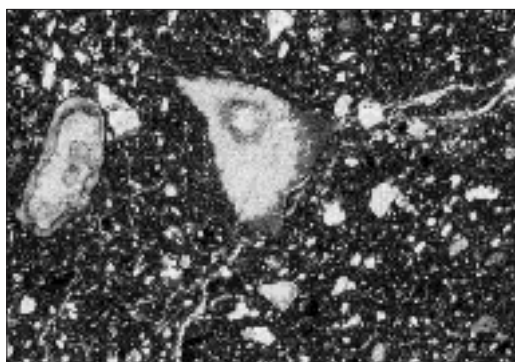
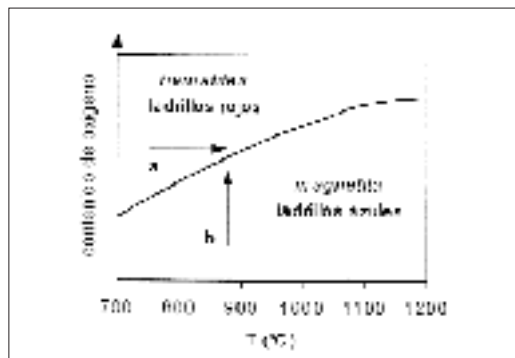


Figura 1. Campo de estabilidad de la hematita y de la magnetita en función de la temperatura y del contenido en oxígeno (de Manning, 1995, modificado). El tamaño de cada uno de estos campos puede incrementarse (flechas a y b) en el caso en que aumente o disminuya la cantidad de oxígeno en el interior del horno.

Figura 2. Superficie lisa y poros redondeados ("estructura celular") en un ladrillo cocido a 1000 °C.

800 °C, y la wollastonita y el diópsido alrededor de los 1000 °C.

Otro factor importante durante la cocción son las condiciones oxidantes o reductoras en el interior del horno. Si las cerámicas están cocidas en condiciones oxidantes, los óxidos de hierro presentes en las tierras arcillosas darán lugar a pequeñísimos cristales de hematitas finamente dispersos en la matriz que pigmentarán de rojo las piezas. Si las condiciones de cocción son reductoras, cristalizarán fases en las que el hierro se encuentra en estado divalente, como la magnetita, la ilmenita u otros silicatos ferrosos y el resultado será un color azulado (fig. 1). La posibilidad de fabricar cerámicas azules aumenta conforme crece la temperatura de cocción. Sin embargo, el color de las piezas puede modificarse aumentando o sustrayendo oxígeno del horno. El fenómeno de oxidación o reducción permite también explicar porque a veces las cerámicas presentan una diferencia de color entre núcleo y superficie de las piezas. En efecto, si las arcillas presentan un elevado contenido de materia orgánica se crearán condiciones reductoras en el interior de las piezas, dando lugar a un color azul en el núcleo y rojo en la superficie, característica conocida como "corazón negro".

El color de las cerámicas puede modificarse, también, si en la tierra arcillosa se encuentran carbonatos (Kreimeyer, 1997). En este caso, tras la cocción el hierro presente queda "atrapado" en la red de los silicatos y aluminosilicatos de calcio y, por tanto, inhiben la formación de hematitas (Maniatis et al., 1981). Las variaciones de color, incluso entre cerámicas de un mismo taller, pueden ser mínimas y no fácilmente percibidas por el ojo humano. En este caso, existen técnicas capaces de registrar y cuantificar objetivamente las variaciones de color, como la colorimetría y la espectrofotometría, que además de su precisión en las medidas son técnicas no destructivas.

Con relación al aspecto textural, se puede señalar que el calentamiento progresivo de la arcilla causa la vitrificación de los productos cerámicos que conduce a piezas muy densas, fenómeno que eventualmente va seguido por

reblandecimiento y fusión. La temperatura de vitrificación de las piezas cerámicas es muy variable, depende de la composición de la materia prima arcillosa y de la presencia de compuestos que puedan actuar como fundentes. La wollastonita, los feldespatos, la calcita, la dolomita y la magnesita (estos últimos tres en presencia de cuarzo) facilitan la fusión de las pastas cerámicas a temperaturas más bajas (Singer, 1963).

Sin llegar a alcanzar estas condiciones, la vitrificación progresa dando lugar a que los poros adquieran morfologías coalescentes (fig. 2), lo que Tite y Maniatis (1975) definieron como “estructura celular”. A veces, la salida de gases contenidos en las piezas cerámicas en el horno puede dar lugar a una apariencia esponjosa (Freestone y Middleton, 1987). Durante estas reacciones puede producirse una cierta expansión, pero casi siempre se registra al final del proceso una contracción global (Velde, 1992).

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS

En función del tipo de producto cerámico, la porosidad (P) es un parámetro extremadamente variable, siendo los más porosos los ladrillos ($P \geq 40\%$) y los menos porosos las porcelanas ($P \approx 0\%$; tabla 2). Una técnica muy común que permite obtener información acerca del volumen poroso

y el tamaño de los poros, es la porosimetría de inyección de mercurio. Por otra parte, las propiedades hídricas son las que establecen las relaciones entre el material cerámico y el agua. Las más significativas son: absorción, desorción y capilaridad (RILEM, 1980), es decir las mismas que se aplican a la piedra de construcción.

La porosidad está influenciada por la granulometría de la tierra arcillosa de partida, la temperatura de cocción y la presencia de fases minerales o materia orgánica. Una granulometría heterogénea da lugar a piezas más porosas, así como una elevada temperatura de cocción da paso, generalmente, a un desarrollo significativo de la macroporosidad y una disminución notable de la microporosidad (Warren, 1999). Entre las fases minerales que modifican la porosidad pueden citarse los carbonatos que al calentarse se disocian en CO_2 y CaO (y MgO) y dejan espacios vacíos (fig. 3), y la materia orgánica que favorece, también, un aumento de la porosidad por su combustión debido a la cocción.

La presencia de carbonatos influye no solo en la porosidad como antes se ha mencionado, sino también en el comportamiento hídrico de las muestras, en el caso que estén presentes en granos. En efecto, mientras en cerámicas sin carbonatos se observa una progresiva disminución de la porosidad conforme aumenta la temperatu-

Tabla 2. Resultados correspondientes a medidas de absorción de agua para diferente tipos de productos cerámicos. (bT = baja temperatura; aT = alta temperatura).

Tipo de material	A (%)	Tipo de material	A (%)
Ladrillo macizo manual bT (1)	24,3 – 24,8	Loza fina (3)	10,0 – 15,0
Ladrillo macizo manual aT (1)	9,9 – 14,9	Loza semivítrea (3)	4,0 – 10,0
Ladrillo extrusión aT (2)	8,9 – 14,7	Porcelana semivítrea (3)	0,3 – 4,0na
Ladrillo prensado aT (2)	6,9 – 11,1	Porcelana de huesos (3)	0,3 – 2,0
Teja (3)	5,2 – 9,9	Porcelana dura (3)	0
Mayólica (3)	> 15	Gres (3)	0

(1) Cultrone, 2001.

(2) Carretero et al, 2002.

(3) Singer y Singer, 1963.

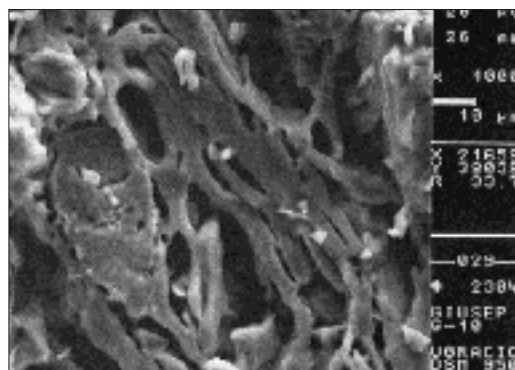
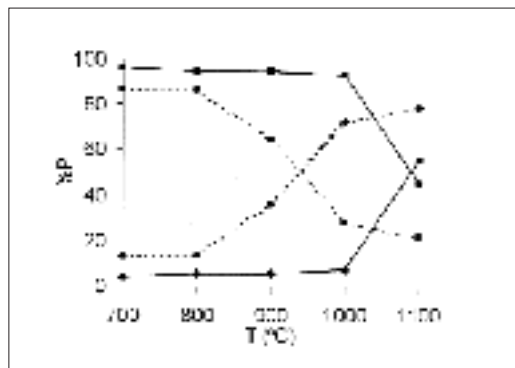


Figura 3. Diagrama representativo de la distribución porométrica (en %) de ladrillos con carbonatos (—) y sin carbonatos (-----) con respecto a la temperatura de cocción (en °C). Leyenda: α = poros < 1 μm ; ϕ = poros > 1 mm.
Figura 4. Grano de portlandita. Desde este cristal parten fisuras que penetran en la matriz del ladrillo.

ra de cocción, en muestras con carbonatos en granos de tamaño de al menos 1 mm esto no ocurre porque el CaCO_3 se transforma en CaO y, en presencia de humedad, evoluciona a Ca(OH)_2 . Esta fase hidratada (portlandita) ejerce una notable presión de cristalización en espacios confinados (en los poros de la cerámica antes ocupados por CaO), desarrollando fracturas radiales (fig. 4), fenómeno este conocido como “ruptura por caliche” (Laird y Worchester, 1956). Únicamente, por debajo de la temperatura de disociación de los carbonatos o a elevadas temperaturas, cuando el elevado grado de vitrificación contrarresta la fuerza de expansión ejercida por la portlandita, se obtienen piezas de mayor calidad con este tipo de materia prima (Cultrone et al., 2000).

Los esfuerzos mecánicos que pueden soportar los ladrillos son una de las propiedades físicas más controladas, ya que este material de construcción se suele utilizar como material estructural, por lo que en numerosos puntos del edificio va a tener que soportar cargas importantes. En general, resisten mejor los esfuerzos a compresión que a tracción. Sus valores están condicionados por la granulometría de la materia prima, cuanto menor es el tamaño de grano, mayor es la resistencia mecánica (Stepkowska y Jeffris, 1991), mientras que, lo mismo que sucede con los materiales pétreos, disminuyen con la porosidad y el valor de absorción de agua.

Los ladrillos no son materiales diseñados para soportar elevados esfuerzos de tracción. Su cálculo, lo mismo que los datos de compresión y de otros parámetros mecánicos, se tienen que ajustar al Pliego RL88 (1988), normativa específicamente elaborada para materiales cerámicos.

Algunos de los parámetros de resistencia mecánica se pueden obtener, al menos de forma bastante aproximada, mediante la evaluación de su comportamiento elástico. Para ello se suele emplear la medida de propagación de ondas ultrasónicas, procedimiento que, además, presenta la ventaja de ser no destructivo. Esta técnica permite, también, detectar y valorar posibles anisotropías y defectos internos, no visibles en un simple reconocimiento de rutina (Guydader y Denis, 1986; Zezza, 1996).

CAUSAS Y MECANISMOS DE DETERIORO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

La durabilidad de los productos cerámicos está condicionada especialmente por el grado de vitrificación, la porometría y las propiedades mecánicas, todas ellas comentadas anteriormente. De manera más o menos aproximada es factible disponer de una estimación de dicho parámetro mediante ensayos de envejecimiento artificial acelerado realizados en laboratorio, que reproducen durante un tiempo mucho más corto los mismos fenómenos de alteración que se verifican en una obra. Estos ensayos son básicamente los mismos que se emplean para valorar la alterabilidad de las piedras de construcción: ciclos de cristalización de sales, ciclos de hielo-deshielo, ciclos de humedad-sequedad y ensayos reproduciendo distintos tipos de atmósferas (contaminadas, lluvia ácida o niebla salina).

Los ensayos de envejecimiento acelerado se llevan a cabo respetando las pautas y procedimientos recogidos en determinadas recomendaciones y normas que, excepto en el caso del ensayo de hielo-deshielo que se ha publicado específicamente para ladrillos (UNE 67-031-85), son las que se aplican para los mismos efectos en la piedra de construcción.

La cerámica, además de sufrir deterioros ocasionados por los mismos agentes que actúan en los materiales pétreos, presentan algunas causas específicas de degradación. Así, se debe tener especial precaución en controlar las diferentes etapas de fabricación, ya que es posible que se produzcan deficiencias significativas durante la preparación y moldeado de las piezas cerámicas, también en la fase de secado e, incluso durante la cocción. En estos procesos los principales daños que se suelen producir son: deformaciones (ocasionadas por desequilibrios en la maquinaria, o debidas a un déficit de arena en la mezcla), exfoliaciones y laminaciones (ocasionadas por la excesiva plasticidad de la fracción arcillosa), fisuras y desconchados por “caliche” (ya explicadas anteriormente). Un método muy común para solucionar el inconveniente del deterioro por “caliche” es el de sumergir en agua las muestras después de sacarlas del horno. Esta

precaución da lugar a piezas de mejor calidad, porque los granos de cal se ven atacados por cantidades considerablemente mayor de agua que en condiciones atmosféricas normales, y, en parte, se apagan rápidamente y, en parte, se disuelven en el agua (Singer, 1963).

En el proceso de cocción los defectos que se pueden generar son distintos. Si no se desarrolla una vitrificación adecuada (por no llegar a la temperatura de sinterización de las fases minerales de la materia prima), la resistencia mecánica que alcanzan los ladrillos puede ser insuficiente y, adicionalmente, la porosidad que se crea favorece la penetración y desplazamientos del agua en su interior dando lugar a una aceleración de los procesos de degradación. Otros procesos que se pueden generar son microfisuraciones (por ejemplo, en las modificaciones de las fases polimorfos del cuarzo, de fase a a b, con el incremento de la temperatura del horno) y lo que se denomina “corazón negro”, anteriormente explicado, lo cual penaliza notablemente su comercialización. Para prevenir este último inconveniente es importante conocer la materia prima que se va a emplear, evitando el uso de aquellas que contengan materia orgánica en exceso. También, se pueden dejar las muestras en el horno a una temperatura comprendida entre 600 y 800 °C durante un tiempo suficientemente largo, para favorecer tanto la descomposición de la materia orgánica como la oxidación del hierro en el interior de las piezas cerámicas, antes de que se reduzca la permeabilidad de las mismas y se impida el movimiento del oxígeno entre los poros (Cerdeño del Castillo et al., 2000).

TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN

Las soluciones a los daños que, eventualmente, puede presentar un edificio histórico construido en parte o totalmente con ladrillos son similares a las que se plantean para el caso de las construcciones en piedra. La intervención se puede programar sobre la base de varias etapas: limpieza, consolidación, protección y sustitución. Estas fases de restauración y conservación de materiales cerámicos se ejecutan según metodologías y técnicas similares a las usuales para la piedra.

Los métodos de limpieza más empleados son: mecánicos (con agua, con determinados productos químicos o aplicando distintos tipos de pastas absorbentes de arcillas o de composición específica como las formuladas con EDTA). En cualquiera de los sistemas que se decida (sobre la base del conocimiento detallado del ladrillo y del grado de deterioro que presenta) es conveniente realizar controles de seguimiento.

Los procesos de consolidación y protección en ladrillos no están aún suficientemente contrastados; la investigación que se ha realizado hasta la fecha en estos aspectos es bastante escasa. En la bibliografía se encuentran trabajos que evalúan la idoneidad y eficacia de productos de consolidación y/o hidrofugación de carácter orgánico o inorgánico, y también organosilícicos (Cultrone, 2001). Los inorgánicos, en general, presentan la ventaja de su semejanza composicional con los componentes de los materiales cerámicos. En cualquier caso la eficiencia vendrá condicionada, como sucede en la piedra ornamental, por su distribución porométrica. Hasta la fecha, los silicatos de etilo son los productos químicos que han proporcionado los resultados más satisfactorios sobre los ladrillos (Warren, 1999).

Por lo que atañe a la sustitución, se efectúa solo en los casos más graves, cuando los otros tipos de intervenciones no solucionan el problema del deterioro. Los nuevos ladrillos deberán poseer características físicas (porosidad, resistencia mecánica y color) parecidas al conjunto de piezas que los rodean para evitar fenómenos de deterioro debido a incompatibilidad entre los materiales.

CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Merece atención el problema de contaminación ambiental que conlleva el desarrollo de la industria cerámica, especialmente en el caso en que estas instalaciones se encuentren concentradas en un área muy restringida, o bien la producción sea elevada, o estén cerca de centros urbanos.

Si la existencia de la industria cerámica es, por un lado, imprescindible en el desarrollo de la sociedad moderna, visto el volumen de produc-

tos que se fabrican diariamente, especialmente en el caso de los ladrillos, por otro lado presenta el problema de que crea un cierto impacto ambiental. En el caso específico de la producción ladrillera, se verifican fenómenos de contaminación atmosférica debidos a la liberación de partículas sólidas y, sobre todo, gaseosas.

Durante las fases de extracción de la materia prima de las canteras y su molienda, la contaminación ambiental se debe a la suspensión en el aire de polvo, cuya cantidad se puede evaluar en cifras del orden de 1 g por 1 kg de arcilla trabajada (Fabbri, 1990).

El proceso de cocción de materias primas cerámicas lleva implícito la destrucción de un gran número de fases minerales y la formación de nuevos compuestos. Es en esta etapa cuando se produce la liberación y emisión a la atmósfera de contaminantes como flúor, azufre y cloro (Fabbri et al., 1998). De ellos, el flúor es el más abundante. Se ha estimado que por cada kilogramo de material arcilloso se produce la emisión de 0,12 g de flúor a la atmósfera (Fabbri, 1990). Está presente en la materia prima como fluoruro de calcio o en sustitución parcial de los hidroxilos (OH) en la capa octaédrica de los minerales arcillosos. Entre estos, la illita es el mineral potencialmente más contaminante en cuanto es el que mayores cantidades de flúor puede contener. La emisión del flúor comienza alrededor de 800 °C. En la atmósfera reacciona con el hidrógeno dando lugar al ácido fluorhídrico (HF).

El azufre se encuentra en las materias primas en baja proporción, generalmente unos centenares de ppm, como componente de sulfuros (pirita y marcasita) y sulfatos (yeso), aunque no hay que descartar que, a veces, el azufre no procede del material arcilloso sino del combustible utilizado para la cocción de los ladrillos. El azufre reacciona con el oxígeno y, en presencia de humedad, da lugar al ácido sulfúrico (H₂SO₄) que es un componente esencial de las "lluvias ácidas".

Los cloruros aparecen en arcillas marinas, costeras o asociadas a evaporitas. Los minerales más frecuentes son halita (NaCl) y silvina (KCl). Alrededor de los 700 °C el cloro se libera como

gas y puede reaccionar con el hidrógeno (HCl).

Aparte de la contaminación de la atmósfera, flúor, azufre y cloro pueden también ejercer una acción corrosiva sobre las mismas instalaciones industriales.

Las intervenciones que se sugieren para solucionar el problema de las emisiones gaseosas

podrían ser: cocción de los ladrillos a temperaturas inferiores a las del escape de los gases, utilización de aditivos como CaCO_3 o BaCO_3 , que reducen o evitan las emisiones de flúor y azufre con los que reaccionan produciendo anhidrita y fluorita, o bien, la instalación de chimeneas con filtros que controlen la salida de los gases (Galán et al., 1998).

BIBLIOGRAFÍA

- BARAHONA, E. (1974) Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada: evaluación de algunos ensayos de materias primas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 398 pp.
- BOYNTON, R. S. (1980) Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 2nd Ed., Wiley, New York BÇ
- UYS, S.; OAKLEY, V. (1996) Conservation and Restoration of Ceramics. Butterworth-Heinemann, Oxford, 243 pp.
- CARRETERO, M. I.; DONDI, M.; FABBRI, B.; RAIMONDO, M. (2002) The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic-chloritic clays. Applied Clay Science, 20, 301-306
- CERDEÑO DEL CASTILLO, J.; DÍAZ RUBIO, R.; OBIS SÁNCHEZ, J.; PÉREZ LORENZO, A.; VELASCO VÉLEZ, J. (2000) Manual de patologías de las piezas cerámicas para la construcción. AITEMIN, Toledo, 118 pp.
- CROATTO, U. (1979) Il mattone da costruzione. Aspetti chimico-fisici. Atti del Convegno: "Il mattone di Venecia. Stato delle conoscenze tecnico-scientifiche", Venecia 1979, 145-152
- CULTRONE, G. (2001) Estudio mineralógico-petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del Patrimonio Histórico. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 267 pp.
- CULTRONE G., SEBASTIÁN PARDO E., CAZALLA VÁZQUEZ O., DE LA TORRE M. J., RODRÍGUEZ NAVARRO C. (2000) Porosity changes of bricks during firing. 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, Firenze 2000, 573-581
- DE LA TORRE, M. J. (1994) Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 213 pp.
- FABBRI, B. (1988) I metodi della mineralogia nella ricerca sui materiali ceramici, con particolare riferimento a quelli avanzati. Mineralogica Petrographica Acta, 31, 179-188
- FABBRI, B. (1990) Produzione ceramica e impatto ambientale. Mineralogica Petrographica Acta, 33, 117-131
- FABBRI, B. (1998) Characteristics, uses and behaviour of the illitic-chloritic clays for the ceramics production. Proceedings of the 2nd Mediterranean Clay Meeting, Aveiro 1998, 34-46
- FREESTONE, I. C.; MIDDLETON, A. P. (1987) Mineralogical application of the analytical SEM in archaeology. Mineralogical Magazine, 51, 21-31
- GALÁN, E.; FABBRI, B.; GONZÁLEZ, I.; FORTEZA, M.; MIRAS, A.; CARRETERO, M. I. (1998) Emisiones producidas por la cocción de arcillas en la industria ladrillera de Bailén. II Jornadas sobre Alfarería y Cerámica. Cámara oficial de Comercio e Industria de la provincia de Jaén, 103-120

- GUYDADER, J.; DENIS, A. (1986) Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. Bulletin Engineering Geology, 33, 49-55
- KREIMEYER, R. (1987) Some notes on the firing colour of clay bricks. Applied Clay Science, 2, 175-183
- LAIRD, R. T.; WORCERSTER, M. (1956) The inhibiting of lime blowing. Transaction British Ceramic Society, 55, 545-563
- MANIATIS, Y.; SIMOPOULOS, A.; KOSTIKAS, A. (1981) Moessbauer study of the effect of calcium content in iron oxide transformations in fired clays. Journal of American Ceramic Society, 64-5, 263-269
- MANNING, D. A. C. (1995) Introduction to industrial minerals. Chapman & Hall Ed., 276 pp.
- MARI, E. A. (1998) Los materiales cerámicos. Un enfoque unificador sobre las cerámicas tradicionales y avanzadas, los vidrios, los cementos, los refractarios y otros materiales inorgánicos no metálicos. Alsina Ed.
- PLIEGO RL-88 (1988) Pliego General de condiciones para la recepción de ladrillos cerámicos en las obras de construcción. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente
- RILEM (1980) Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Commission 25-PEM: Protection et Erosion des Monuments, 175-253
- SINGER, F.; SINGER, S. S. (1963) Industrial Ceramics. Chapman & Hall Ltd. London
- STEPKOWSKA, E. T.; JEFFERIS, S. A. (1991) Influence of microstructure on firing colour of clays. Applied Clay Science, 6, 319-342
- TITE, M. S.; MANIATIS, Y. (1975) Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. Nature, 257, 122-123
- UNE 67-031-85 (1985) Ladrillos de arcilla cocida. Ensayo de succión. A.E.N.O.R.
- VELDE, B. (1992) Introduction to clay minerals. Chemistry, origins, uses and environmental significance. Chapman & Hall, London, 198 pp.
- WARREN, J. (1999) Conservation of brick. Butterworth-Heinemann, Oxford, 294 pp.
- ZEZZA, U. (1996) Las rocas en el Patrimonio Arquitectónico: normas y referencias para la investigación con técnicas no destructivas sobre el comportamiento físico-mecánico. En: Cuadernos Técnicos "Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos", Consejería de Cultura, Junta de Andalucía, 110-122

Indicadores de alteración de los materiales pétreos

Manuel Alcalde Moreno

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

Rosario Villegas Sánchez

Dpto. Análisis. IAPH

INTRODUCCIÓN

La alteración de la piedra de los monumentos concierne a muchos especialistas: petrógrafo-mineralogistas, químicos, físicos, biólogos, arquitectos, ingenieros, restauradores, etc. Todos ellos tienen sus propias ideas acerca de la alteración de la piedra y su preservación, e incluso cada científico ha desarrollado su propia terminología. En la bibliografía de hace unos años aparecían muchos términos con gran cantidad de ambigüedades, confusiones y generalizaciones, lo que hacía necesaria una sistematización y definición de los mismos que permitiese el uso de un mismo lenguaje. La terminología aquí propuesta, basada en un amplio estudio bibliográfico y aceptada por diferentes expertos interesados en la conservación de monumentos, ordena los términos de acuerdo con su morfología. Además de los términos en castellano, se incluyen las traducciones al inglés, italiano y francés.

INDICADORES VISUALES DE ALTERACIÓN

Cambios en las propiedades del material, apreciables a simple vista, que permiten evaluar cualitativa o semicuantitativamente la alteración sufrida.

Se clasifican en cinco grandes apartados:

1. TÉRMINOS GENÉRICOS.
2. MODIFICACIONES SUPERFICIALES.
3. ELIMINACIÓN DE MATERIA.
4. DEFORMACIONES.
5. RUPTURAS Y DISYUNCIONES.

1. TÉRMINOS GENÉRICOS

El término más general para designar modificaciones o cambios en el estado de la piedra es alteración, deterioro o deterioración. En función del grado progresivo de inhabilitación, se dan las denominaciones degradación y ruina. De acuerdo con los agentes implicados en los mecanismos de alteración, alteración atmosférica y meteorización, si son atmosféricos; alteración antropogénica, si son causados por el hombre; bioalteración, si el origen es biológico.

La alteración, por otra parte, puede afectar a toda una pared o a un elemento arquitectónico completo, alteración de conjuntos. Otros términos menos genéricos propuestos en la bibliografía son corrosión, descomposición y decohesión, que atienden específicamente a las consecuencias que se producen por la actuación de ciertos tipos de mecanismos más determinados.

Alteración (alteration; alterazione; altération)

Indica una modificación o cambio en el estado normal de la piedra, que no implica necesariamente una reducción, debilitación o empeoramiento de aquellas propiedades relacionadas con las funciones encomendadas a la misma. Es el término que suele utilizarse de modo más general.

Alteración diferencial (differential alteration; alterazione differenziale; altération différentiel).

Se produce como consecuencia de heterogeneidad en la composición o en la estructura de la piedra.

INDICADORES VISUALES DE ALTERACIÓN

TÉRMINOS GENÉRICOS		
Alteración	Alteración atmosférica	Corrosión
Alteración diferencial	Alteración antropogénica	Descomposición
Degradación	Alteración de conjuntos	Decohesión
Ruina		Bioalteración
MODIFICACIONES SUPERFICIALES		
ALTERACIÓN CROMÁTICA	COSTRAS	DEPÓSITOS
Cromatización	Costra	Depósito superficial
Limonitización	Calcín	Concreción
Tinción	Sulfin	Incrustación
Moteado	Biocostra	Eflorescencia
Pátina		Subflorescencia
Patinatura		Criptoflorescencia
ELIMINACIÓN DE MATERIA CON FORMACIÓN DE HUECOS		
ACCIONES MECÁNICAS EXTERNAS	ACCIONES FÍSICOQUÍMICAS	VARIAS ACCIONES SIMULTÁNEAS
Excoriación	Cavernas	Cancerización
Estriado	Alveolización	
Azanelación	Picado	
Vermiculación	Excavación	
ELIMINACIÓN DE MATERIA SIN FORMACIÓN DE HUECOS		
ACCIONES MECÁNICAS	DECOHESIONES	
Erosión	Desagregación	
Corrasión	Disgregación	
	Arenización	
	Pulverización	
DEFORMACIONES	RUPTURAS	DISYUNCIONES
Hinchamiento	Fracturación	Separación de placas
Combamiento	Fisuración	Exfoliación
Ampollas	Fragmentación	Descamación
		Separación de películas

Degradación (degradation; degradazione; dégradation).

Modificación o cambio en el estado normal de la piedra, que implica siempre una reducción, debilitación o empeoramiento de aquellas propiedades relacionadas con las funciones encomendadas a la misma. Se trata, pues, de una alteración grave.

Ruina (ruin; ruinna, sfacimento; ruine, délabrement),

Degradación muy grave que supone la inutilización del elemento para las funciones encomendadas al mismo.

Alteración antropogénica (antropogenic alteration; alterazione antropogenica; alteration anthropogénique).

Alteración debida a procesos de diversa naturaleza que implican necesariamente la intervención del hombre. Las modificaciones de las características de la piedra pueden ser importantes, pudiendo requerirse, por ello, el empleo de los términos degradación y ruina antropogénica.

Alteración atmosférica (weathering; alterazione atmosférica, altération atmosphérique).

Alteración natural de la piedra debida a procesos químicos o mecánicos en los que intervienen los agentes de la atmósfera. A través de la alteración atmosférica se modifican más o menos profundamente las características de las rocas, pudiendo llegar éstas a degradarse y finalmente a desmoronarse. Incluye, pues, los conceptos de degradación y ruina atmosférica.

Meteorización (meteorisation; meteorizzazione; météorisation).

Es un término que normalmente se utiliza como sinónimo de alteración atmosférica, aunque para otros autores sólo corresponde "en cierta medida" a dicho término y debe utilizarse en los casos en que no se produce un desplazamiento notable de materia.

Alteración de conjuntos de piedra (alteration of stone assemblages; alteraciones da congluanti-

mentos di pietra; altération des assemblages de pierre).

La alteración se presenta a una escala que excede a la piedra misma, sobre paredes o elementos arquitectónicos. Así, la decohesión de conjuntos de piedra es una manifestación habitual de este tipo de alteración que se observa con frecuencia sobre paredes no protegidas por un techo, por ejemplo, en torres.

Corrosión (corrosión; corrosione; corrosión).

Alteración química que implica un cambio o modificación sustancial en la naturaleza química de la piedra, como consecuencia de un proceso químico.

Descomposición (decomposition; descomposizione; décomposition).

Alteración fisicoquímica superficial en la que los constituyentes originarios se han transformado en nuevos componentes mejor adaptados a las condiciones de superficie.

Decoherión (decohesion; decoesione; décohesion).

Alteración que se manifiesta en una disminución de la unión y de la adhesión entre los componente estructurales de la piedra, con un debilitamiento de sus características mecánicas originales. Generalmente se produce un agrandamiento de los poros y microfisuración, sin que la piedra cambie de forma.

2. MODIFICACIONES SUPERFICIALES

Se trata de una serie de manifestaciones superficiales de alteración que afectan, esencialmente, al aspecto exterior de la piedra, sin provocar generalmente modificaciones importantes del material subyacente. Son esencialmente de tres tipos: variaciones cromáticas (cromatización, moteado y pátina), costras y depósitos (depósitos superficiales, concreciones y depósitos de sales).

Cromatización (Chromatic alteration alterazione cromatica; altération chromatique).

Alteración que se manifiesta a través de una variación de color o del lustre de la piedra.

Moteado (spotting; spotting, macchie; moucheté).

Alteración consistente en la presencia de pequeñas áreas, fundamentalmente de origen biológico, pigmentadas de manera diferente.

Limonitización (limonitisation; limonitizzazione; limonitisation)

Amarilleamiento por transformación de óxidos de hierro en limonita.

Tinción (stain; tingitura; teinture)

Alteración cromática por desplazamiento sobre la superficie de sustancias de elementos adyacentes, generalmente óxidos de hierro y de cobre de rejás, clavos, etc.

Pátina (patina; patina; patine).

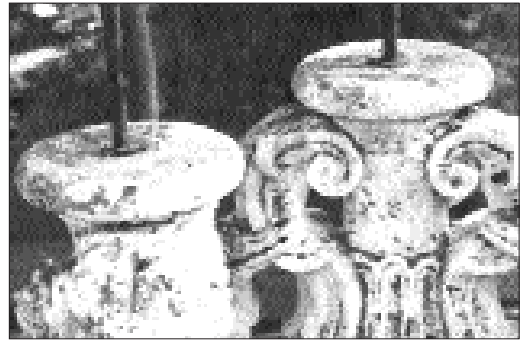
La pátina representa el estado envejecido de un material y participa a la vez de la alteración cromática y de una modificación superficial más significativa. En el caso de que esta misma alteración se produzca por medios artificiales se llama patinatura.

Costra (crust; costra; croute)

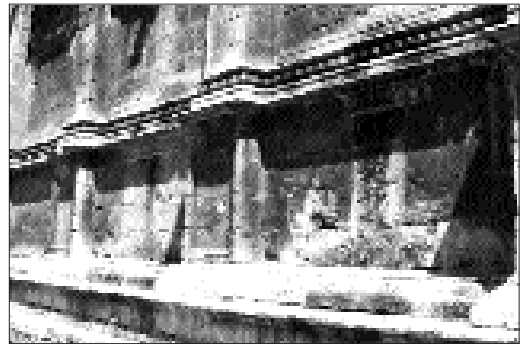
Esta alteración se manifiesta por la formación en la piedra de una cubierta o corteza exterior endurecida, fruto de la transformación superficial del propio material, visiblemente distinguible de la parte que está debajo por sus características morfológicas y, especialmente, por su color. También la naturaleza química y mineralógica, así como sus características físicas, pueden ser total o parcialmente diferentes.

Depósito superficial (surface deposit; deposito superficiale; dépôt superficiel).

Alteración que se manifiesta en forma de una acumulación de material extraño de diversa naturaleza (polvo, mantillo, guano de palomino, etc). Tiene espesor variable, generalmente con escasa coherencia y adherencia al material que está debajo.



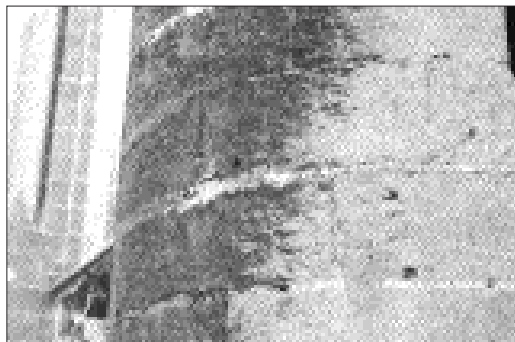
Moteado



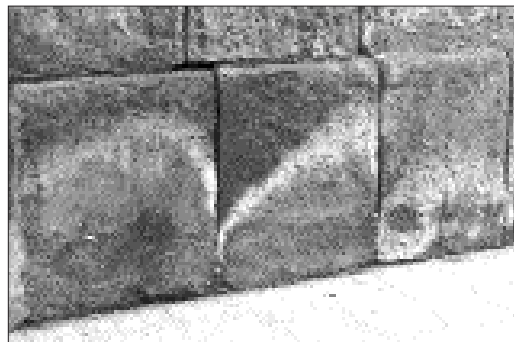
Tinción



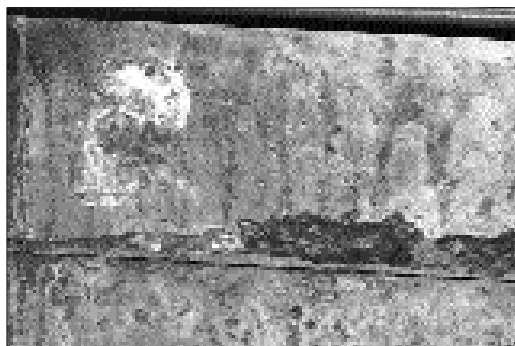
Costra



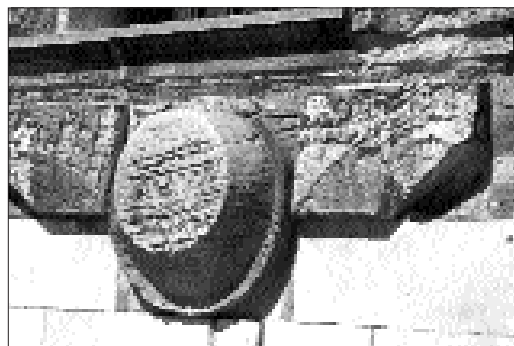
Depósito



Eflorescencias



Subflorescencias



Estriado



Vermiculación



Sulfín

Concreción (concretion; concrezione; concrétion)

Alteración que implica la presencia en la superficie de la piedra de una masa más o menos compacta, dura y adherente, formada por depósito o desecación. Cuando dicho depósito aparece como embutido en la superficie recibe el nombre de incrustación (incrustation; incrostazione; incrustation).

Eflorescencias (efflorescence; efflorescenza, efflorescence).

Alteración en forma de depósito cristalino, blanco, poco coherente, de sales solubles, originado por migración y evaporación de soluciones.

Subflorescencias (subflorescence; subflorescenza; subflorescence).

Las sales que se mueven hacia la superficie de la piedra cristalizan inmediatamente debajo de la superficie original de la misma, la cual queda como una delgada y endurecida costra de material alterado.

Criptoflorescencias (criptoflorescence; criptoflorescenza; criptoflorescence)

Es el resultado de la cristalización de sales en el interior de la piedra, en materiales pétreos con grandes poros.

3. ELIMINACIÓN O PÉRDIDA DE MATERIA

Bajo este epígrafe se incluyen todos aquellos indicadores de alteración que suponen eliminación de materia por parte de la piedra, estructurados en dos apartados, según ésta se dé con formación o no de huecos.

La pérdida de materia, tanto con formación de huecos como sin formación de los mismos, puede ser consecuencia de acciones mecánicas o de acciones fisicoquímicas; éstas, en el segundo de los casos, sin formación de huecos, se manifiestan en forma de una pérdida de cohesión intergranular. En casos extremos de formación de huecos (cancerización) pueden actuar simultáneamente factores de diversa naturaleza.

CON FORMACIÓN DE HUECOS

(a) Acciones mecánicas externas

La separación o eliminación de materia de la superficie de la piedra por una acción mecánica externa puede manifestarse mediante la formación de rayas, rozaduras, acanaladuras, estrías, etc.

Las manifestaciones más importantes de estas acciones mecánicas externas son:

Excoriación (excoriation; scoriation; écorchure)

Alteración que implica una eliminación de materia de la capa más superficial o piel de la piedra por acción mecánica externa, generalmente por frotamiento (violento) y que se manifiesta en forma de desolladuras o rasguños.

Estriado (striction; striato; striure, pelade)

Alteración con eliminación de materia que se manifiesta por la formación de surcos horizontales o inclinados (estrías) en las zonas de menor adherencia del cemento natural. Las estrías pueden ser ligeras y superficiales o profundas, y más o menos paralelas.

Esta forma de alteración se observa en paramentos sometidos a una fuerte acción eólica o a fuerte humedad interna. Pueden utilizarse dos acepciones:

Acanalación, para surcos grandes y estrías vermiculares

Vermiculación, para surcos contorneados y sinuosos, similares a las trazas que dejan los gusanos.

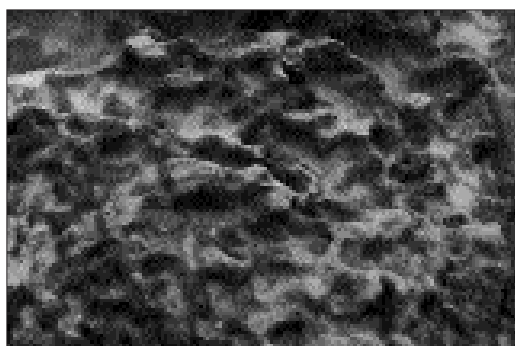
(b) Acciones fisicoquímicas

Los huecos resultantes de acciones fisicoquímicas pueden ser de tamaño más o menos grande (cavernas) o de dimensiones más modestas (alveolos, vacuolas, picaduras).

Entre estos indicadores de alteración los más característicos son:



Cavernas



Alveolización



Picado

Formación de cavernas (crater formations; crateri di corrosioni; cratère formation)

Alteración que se manifiesta por la formación de concavidades profundas, como resultados de eliminación de materia.

Alveolización (alveolar erosion; alveolizzazione; alvéolisation)

Alteración con eliminación de materia que suele manifestarse en materiales de alta porosidad con la formación de pequeñas cavidades o depresiones, semejante a las celdillas de las abejas, generalmente profundas e interconectadas, cuyas paredes están cubiertas del mismo material, de eflorescencias y/o de colonias de microorganismos.

Picado (pitting; pizzicato; piqûres)

Alteración puntiforme con eliminación de materia que se manifiesta a través de la formación de pequeñas cavidades o picaduras, más localizadas que en la alveolización y no interconectadas.

Excavación (excavation; scavazione: excavation)

Alteración con eliminación de materia que da lugar a la formación de grandes depresiones, como resultado de una remoción localizada de materia por acción de chorreo de agua.

(c) Varias actuaciones simultáneas

La actuación de varios factores de alteración simultáneamente sobre la piedra pueden dar lugar a un estado muy generalizado de degradación, que ha sido llamado chancre por Henau.

Cancerización (chancre; chancro; chancre)

Estado muy generalizado de degradación con eliminación de materia de la superficie de la piedra.

El cáncer de sulfatación, por ejemplo, que se produce en la superficie de las piedras calizas por acción del SO_2 en atmósferas contaminadas es, en efecto, una forma global de manifestación grave de su proceso de sulfatación.

SIN FORMACIÓN DE HUECOS

Eliminación de materia sin que tenga lugar, al menos de forma significativa, la formación de huecos; puede tener su origen en acciones mecánicas, generalmente promovidas por agentes atmosféricos, y en acciones fisicoquímicas, que normalmente se traducen en una pérdida de cohesión intergranular.

a) Acciones mecánicas

La remoción gradual de materia por un proceso esencialmente de tipo mecánico, aunque no puede descartarse la acción química, puede dar lugar a una reducción del relieve o redondeamiento de formas en las manifestaciones denominadas erosión y corrosión.

Erosión (erosion; erosione; érosion)

Alteración atmosférica que produce remoción y transporte de materiales, debida a procesos tanto físicos como químicos, con la consiguiente reducción del relieve.

Corrosión (corrasion; corrasione; corrasion)

Erosión que implica eliminación de materia como resultado de la acción mecánica de partículas sólidas transportadas por el viento y que se manifiesta en un redondeamiento de las formas.

b) Pérdida de cohesión intergranular (Ver decohesión)

Cuando la eliminación de materia en la piedra es consecuencia de una pérdida de cohesión intergranular, por microfisuración del constituyente o por pérdida de adhesión, se produce un ablandamiento de formas, relieves y aristas. La piedra se vuelve friable, granulosa, arenizada o pulverulenta. Las partículas pueden soltarse fácilmente al tocar el material, por la acción de la lluvia, el viento o simplemente por acción de la gravedad.

Las principales manifestaciones de la decohesión, en fases sucesivas del proceso degradativo, son:

Desagregación (disaggregation; desaggregazione; désagregation)

Decohesión superficial que se manifiesta por la caída o no de fragmentos con la misma composición de la roca madre.

Disgregación (disgregation; disgregazione; disgrégation)

Estado avanzado de decohesión interna que se manifiesta por la caída o desprendimiento de gránulos o cristales por acción de los más mínimos estímulos mecánicos: supone un sensible debilitamiento de las características mecánicas originales y un notable aumento de la porosidad.

La disgregación puede dar lugar a la formación y separación de fragmentos (ver ALTERACIÓN por RUPTURA).

Arenización (grain disgregation; arenazione; désagregation sableause)

Estado muy avanzado de decohesión interna caracterizado por la caída, generalmente inducida, de materia de la piedra en forma de granos de tamaño de arena.

Pulverización (pulverization; pulverizzazione; poudroiement)

Estado último de decohesión interna que se manifiesta en la caída de material de la piedra en forma de polvo, simplemente al tocarla e incluso de manera espontánea.

4. DEFORMACIONES

La deformación de la capa externa de la piedra puede manifestarse en la formación de una zona convexa como consecuencia de una separación interna, de un hinchamiento, cuando la curvatura es continua, o de un combamiento, si hay cambio de curvatura.

Cuando la deformación afecta a todo el espesor de la piedra, se habla de deformación plástica o deformación penetrativa de la piedra.

Por otra parte, la deformación puede manifestarse como un hecho aislado o, por el contrario, puede aparecer en la superficie de la piedra un conjunto más o menos numeroso de deformaciones.



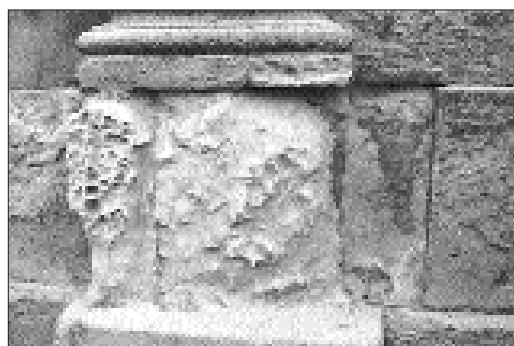
Excavación



Desagregación



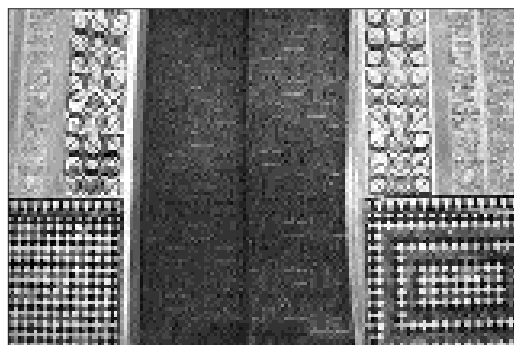
Fisuración



Arenización



Fragmentación



Combamamiento

(a) La deformación es un hecho aislado

Hinchamiento (swelling; rigongiamiento; bouffé, boursoufflement)

Alteración por deformación mecánica que se manifiesta como un levantamiento de la superficie de la piedra en forma de curva continua, de color y consistencia variable, que puede llevar consigo el desprendimiento de partes.

Combamiento o alabeamiento (warping; piegamento; goudolement)

Deformación permanente que se manifiesta en forma de pandeo de losas, generalmente, de mármol.

(b) Formación conjunta de varias deformaciones

En ocasiones, la deformación de la superficie de la piedra no se traduce en una manifestación más o menos aislada sino en una serie de abolladuras o hinchazones; la superficie puede tomar así un aspecto ondulante más o menos exagerado (mamelonado, noduloso, granuloso) en función de las dimensiones de esas hinchazones.

En general, pueden denominarse a estos abultamientos ampollas.

Ampollas (blistering; ampollas; ampoules)

Alteración por deformación de la superficie de la piedra que se caracteriza por la formación de numerosos abultamientos.

5. RUPTURAS Y DISYUNCIONES

Las alteraciones de la piedra que implican separación de partes pueden producirse perpendicularmente (rupturas) o paralelamente (disyunciones) a la superficie de la piedra.

RUPTURAS

Las rupturas pueden considerarse como accidentes mecánicos en la piedra que crean discontinuidades en la misma y no entrañan pérdidas de material; son más o menos perpendiculares

a la superficie. Estas discontinuidades en la piedra pueden producir una mayor o menor separación de partes; mientras que la fractura no implica separación de las partes, en la fisura ésta es ya más o menos completa.

Algunas de estas rupturas son inherentes a la propia estructura del material, como exfoliaciones, diaclasas y esquistosidades, que permiten caracterizar diferentes tipos de rupturas.

Cuando la ruptura se produce a lo largo de una arista o de una esquina con pérdida de materia, según el caso y tipo de piedra, se origina un fragmento. En ocasiones, la formación y separación de fragmentos es el resultado de la decohesión interna (ver alteraciones por eliminación de materia).

Fracturación (cracking; fratturazione; fracture)

Alteración por ruptura que se manifiesta en la formación de soluciones de continuidad en la piedra, generalmente sin desplazamiento relativo de las dos partes; es el accidente de RUPTURA de mayor extensión aunque, por otra parte, es aquél que crea soluciones de continuidad menos evidentes.

Fisuración (fissuring; fissurazione; fissurement)

Alteración por ruptura que se manifiesta en la formación de soluciones de continuidad en la piedra con desplazamiento o separación macroscópica de las dos partes.

Fragmentación (spalling; frammentazione; effritement)

Alteración por ruptura con pérdida de materia, que se manifiesta por la formación de trozos más o menos compactos.

DISYUNCIONES

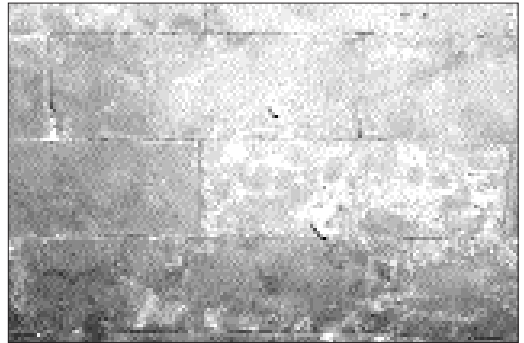
Los accidentes de disyunción implican la separación abierta entre partes de la piedra originariamente juntas, son paralelos a la superficie de la piedra y producen porciones de distinta forma y tamaño:

Placas: láminas extensas y de varios milímetros de espesor, generalmente rígidas.

Hojas de exfoliación: varias láminas delga-



Placas



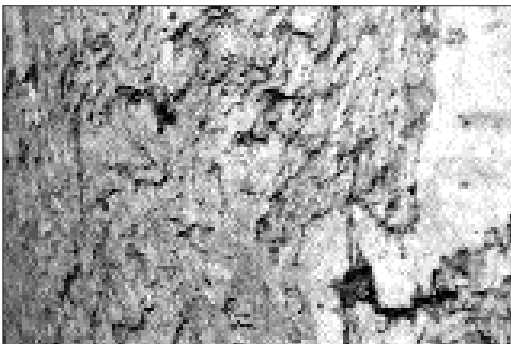
Descamación



Películas



biocostra



Exfoliación



Disyunción

das, superpuestas, de espesor uniforme, generalmente del orden del milímetro.

Películas: pequeñas láminas muy delgadas.

Escamas: láminas análogas a las escamas de un pescado; tienen formas y espesor irregulares y dimensiones variables, con apariencia del material inalterado.

La acción de la separación seguida del desprendimiento de láminas independientes de la estructura de la piedra recibe distintas denominaciones particulares en la bibliografía, en función de su forma y tamaño. El término francés *delitage* designa también dicha acción pero cuando está ligada a estructuras en lechos de sedimentación. Cuando una superficie presenta varias láminas y hojas superpuestas se dice que es laminar o foliácea y su separación o desprendimiento produce una exfoliación.

Separación de placas (*contour scaling*; *separazioni di placche*; *formation de plaques*)

Alteración por disyunción que implica la separación o levantamiento de placas, paralelas a la superficie de la piedra e independientes de la estructura de la misma.

Exfoliación (*exfoliation*; *peeling*; *esfoliazione*; *exfoliation*)

Degradación por disyunción que se manifiesta por un levantamiento seguido de la separación de una o más láminas u hojas de exfoliación paralelas entre sí. En general, se produce en capas paralelas a la esquistosidad.

Separación de películas (*film separation*; *separazione de pellicole*; *pelliculage*)

Alteración por disyunción que se manifiesta en la separación de láminas muy delgadas o películas.

Descamación (*chipping*; *scagliatura*; *desquamation*)

Alteración por disyunción que se manifiesta por despegamiento total o parcial de escamas de la superficie de la piedra, independientemente de su estructura. Las escamas están formadas generalmente de material en apariencia inalterado. Pueden ir acompañadas de eflorescencias y/o microorganismos.

Cuando la causa de la alteración es de origen biológico, se suele utilizar el prefijo *bio*, tanto en los términos genéricos: bioalteración, biodeterioro, biocorrosión, biodecohesión, como en los indicadores de alteración: biocostura, biodepósito, bioeflorescencia, bioalveolización, biofisuración, bioexfoliación, biodescamación.

BIBLIOGRAFÍA

- American Geological Institute (AGI): Glossary of Geology and related Sciences, 1972.
- Architecture. Méthode et Vocabulaire (Principes d'analyse scientifique). Ministère de Affaires Culturelles. Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France. Paris. Imprimerie nationale, 1977 (2 vols, 234 p).
- ARNOLD, A; JEANETTE, D; ZEHNDER, K: Proposal for a terminology of weathering phenomena on building stones. Meeting of Petrology Group of ICOMOS. Strasburg, 1980.
- ASTM C 119-74: Standard definitions of terms relating to natural building stones.
- ASTM D 653-78: Standard definitions of terms and symbols relating to soil and rock mechanics.
- BEACOURT, F. de, JATON, C.: Les types d'alteration des roches calcaires.- Les monuments historiques de la France, 65, rue St. Antoine, Paris, Numéro special hors série, 14-32, 1975.
- DOMASLOWSKI, W: La conservation préventive de la pierre. UNESCO. Musées et Monuments, XVIII, 1982.
- ESBERT, R; MARCOS, R: La deterioración de las piedras de la Catedral de Oviedo. 2a parte: formas y fenómenos de alteración. Materiales de la Construcción 186, 79-88, 1982.
- EVANS, I, S.: Salt crystallisation and rock weathering: a review. Rev. Geomorph. dyn, 19.th annu, 4,153-177, 1970.
- FANCELLI, P: Il Progetto di Conservazione. Ed. Guido Guidotti. Roma, 1983.
- HENAU (DE), P: Approche d'une terminologie descriptive de l'état de surface des matériaux pierreux. Bulletin Institut Royal de Patrimoine Artistique, Bruxelles, XVHI, 170-182,1980-1981.

HENAU (DE), P: Vocabulaire des terms descriptifs de l'état de surface des matériaux de construction. Inst. Royal du Patrimoine Artistique, Bruxelles, 1980.

ISRM: International Society for Rock Mechanics. Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation. Final Document on Terminology, english version, 1972, and list of symbols, 1970.

NÖEL, P: Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille. Paris, Societé de Diffusion des Techniques du Btiment et des Travaux Publics, 1965 (373 p).

NORMAL (Normativa Manufatti Lapidei, CNR-ICR, Italia) 1/80: Alterazioni mactroscopicche de material lapidei: Lessico.

ORDAZ, J: Glosario de términos utilizados en la descripción de fenómenos de deteriorización de las piedras de monumentos. Informe interno 101/82.

Departamento de Petrología de Oviedo.

REAL ACADEMIA DE LA LENGUA: Diccionario de la Lengua Española, Vigésima edición, 1984.

RILEM, Comm Pierres Groupes 25 PEM: Expeiimental methods reconimended. Proc. Int. Symp. Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris, 5-9/VI/1978, Vol. V (Publ. CEBTP). TEST VI. 1: External aspect of stones.

ROSSI-DORIA, P: Draft glossary for the description of macroscopic alteration in stone. Doc. Normal-C 79/26.

STONE-CATALOG: Building Stone Institute. Glossary of Terms, New York, 1968/69.

ZEHNDER, K: Weathering of molasse sandstones on monuments and natural outcrops. Proc. 3rd Int. Cong. Deterioration and Preservation of Stones, Venice, 24-27/X/1979.

Factores biológicos de alteración

Marta Sameño Puerto

Técnico de Gestión en Biodeterioro. E.P.G.P.C.

1. INTRODUCCIÓN

Los monumentos, esculturas y otras obras de arte de naturaleza pétreas expuestas a la intemperie se han deteriorado a través de los siglos por causas naturales. El sol, las heladas, el viento, la lluvia, etc., contribuyen al proceso gradual de envejecimiento y deterioro. Este deterioro que experimentan los materiales pétreos aumenta progresivamente (1).

La mayoría de los organismos, que crecen sobre los monumentos, son capaces de generar sustancias que alteran irreversiblemente el material pétreo, lo cual acelera el proceso de destrucción de dicho monumento. Es algo similar a lo que ocurre en el proceso de formación de suelos, pero en el caso anterior supone una pérdida irreparable.

Así pues, se puede decir que cualquier tipo de alteración irreversible, consecuencia de la actividad metabólica de una o más poblaciones de organismos vivos, cualquiera que sea el tamaño de éstos, es lo que actualmente entendemos por biodeterioro.

Sin embargo, la mera presencia de un organismo sobre un material no es suficiente para determinar que aquél sea el que ha causado el daño. Para poder probar este biodeterioro es necesario comprobar que ha cambiado alguna propiedad esencial del material en estudio.

Por otro lado, los fenómenos de biodeterioro no pueden ser considerados de manera aislada, sino que siempre aparecen asociados a procesos de alteración físicos y químicos. Algunos autores (2) consideran que la superficie de un monumento es colonizada por ciertos organismos

vivos si previamente ésta sufre un proceso degradativo debido a la exposición al ambiente. La lluvia, el viento, el sol, el hielo y los contaminantes atmosféricos provocan un aumento de la superficie específica del material pétreo, por formación de macro y microfisuras y de rugosidades, que favorece la acumulación de partículas atmosféricas y la colonización por parte de organismos vivos (3).

2. FACTORES AMBIENTALES. SITUACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ORGANISMOS

La ecología es la ciencia que estudia las relaciones entre los organismos y el ambiente. La unidad base de un estudio ecológico está representada por el ecosistema. Con este término se define una unidad que incluye todos los organismos que, en un área determinada, interaccionan entre ellos y con el ambiente físico, de modo que el flujo de energía se da en una estructura trófica bien definida, con una equilibrada diversidad biótica y una transformación de la materia.

Si aplicamos estos conceptos ecológicos al estudio de una obra de arte, la cual representa el "sustrato", ésta sería la materia que entra en el ciclo biogeoquímico, expuesta a la acción de los factores ambientales y al ataque potencial por parte de diversas poblaciones biológicas.

Generalmente estas últimas representan los agentes biodeteriorantes, que son aquellos organismos que causan daños a la obra de arte. Sin embargo, la presencia de un factor biológico (organismo o microorganismo) no siempre es negativa, también puede influir positivamente mejorando, a veces, la conservación de la obra en cuestión.

Respecto a las cadenas tróficas, que ponen de manifiesto la posición nutricional de un organismo en el sistema, los organismos presentes sobre una obra de arte, como en todos los ecosistemas, pueden ser tanto productores (autótrofos), como predadores o consumidores (heterótrofos).

Desde el punto de vista energético esta cadena trófica da lugar a una pirámide ecológica; en cada grado se produce una dispersión de energía y un aumento de entropía, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica. Por esta razón quizá sea imposible la conservación del material por un tiempo infinito, en cuanto que la materia tiende siempre a adquirir una estructura más simple y con ello más estable (4).

2.1. Condiciones necesarias para el crecimiento de organismos

Cada grupo biológico puede iniciar su desarrollo y después seguir su crecimiento sólo si se dan determinadas condiciones ambientales. Con respecto a estas variables, existen límites de tolerancia: valores máximos y mínimos de tolerancia que presentan los organismos. El espacio que existe entre estos valores extremos es la amplitud de tolerancia de una determinada especie. Se denomina factor limitante el factor ambiental que

sobrepasa la amplitud de tolerancia de un individuo.

Los parámetros que condicionan la colonización y el posterior crecimiento de los organismos, son entre otros:

- la luz: imprescindible para la fotosíntesis y con ello un factor limitante para organismos autótrofos. La fuente puede provenir no sólo del sol como más común, sino de fuentes artificiales, de distintos tipos e intensidades;
- el oxígeno: aunque no es un factor limitante, pues existen organismos anaerobios implicados en los procesos de biodeterioro, la mayoría de los organismos toman oxígeno (para la respiración celular). Con respecto a los microorganismos, las bacterias se clasifican en aerobias, que utilizan el oxígeno libre como aceptor final del hidrógeno (o electrones), y anaerobias, que utilizan como aceptores compuestos orgánicos o inorgánicos. La mayoría de los hongos necesitan oxígeno;
- el carbono: es un elemento indispensable para el desarrollo de todos los organismos, ya que forma parte de los polímeros que componen la estructura celular (polisacáridos, proteínas, enzimas, ...). Puede ser asimilado



Fig.1. Organismos (cianobacterias, algas verdes, briofitos) creciendo alrededor de la luz de una bombilla.

por los organismos autótrofos (algas y ciertas bacterias) como dióxido de carbono, procedente del aire, a través de mecanismos asociados a procesos fotosintéticos y quimiosintéticos (según el grupo al que pertenezcan los organismos). Los heterótrofos lo asimilan bajo forma orgánica;

- el nitrógeno: posee la misma importancia que el elemento anterior. Sólo algunas bacterias y algas son capaces de fijarlo directamente de la atmósfera, el resto lo absorben en forma de sales inorgánicas;

- el agua: es indispensable para las funciones vitales de todos los organismos ya que constituye la mayor parte de la célula y es indispensable para los cambios metabólicos con el medio ambiente externo, aunque determinados grupos estén muy bien adaptados a la sequía. Puede ser absorbida directamente de la superficie de los monumentos (organismos sustrato-higrófilos), de la humedad atmosférica (organismos aerohigrófilos), o bien de la lluvia. La presencia de humedad predispone a las superficies de las obras de arte al biodeterioro. Los valores críticos de humedad relativa son del 60-65 %, por debajo de éstos se dificulta la proliferación de microorganismos;

- la temperatura y el pH: son parámetros importantes, aunque existen amplios rangos de tolerancia dependiendo del tipo de organismos. En el caso concreto de la temperatura más que ser un factor limitante, afecta sólo a la velocidad de crecimiento. Los microorganismos pueden vivir en una amplia gama de valores, aunque tienen sus rangos de temperaturas óptimas. Esto permite clasificarlos en criófilos, mesófilos y termófilos. Son los mesófilos los que suelen atacar las obras de arte, retardándose su crecimiento por el frío. En cuanto al pH, también existe un amplio rango de valores, que van desde 2,8 a 8,5. La mayoría de las bacterias crecen mejor a pH próximos a la neutralidad, mientras que un pH ácido tiende a favorecer a los hongos.

Así pues, podemos observar que existen distintos factores para los cuales los organismos pueden crecer en determinados intervalos de tolerancia. Por lo tanto la presencia de un determinado organismo puede indicarnos que nos hallamos alrededor de un cierto valor concreto, lo cual puede ser útil cuando el rango de tolerancia es estrecho, porque permite utilizar este organismo como bioindicador.

Por otro lado, ciertas condiciones extremas pueden suponer un cese en la actividad de algu-

Tabla 1. Clasificación de los organismos vivos en grupos nutricionales

Tipo de organismo	Fuente de C	Fuente de E	Donadores de e ⁻	Ejemplos
FOTOAUTÓTROFO o fotolitótrofos	CO ₂	Luz	Compuestos inorgánicos H ₂ O, H ₂ S, S	Plantas vasculares, algas líquenes, cianobacterias y otras bacterias
FOTOHETERÓTROFOS o fotoorganótrofos	Sustancias orgánicas	Luz	Compuestos orgánicos	Bacterias rojas no sulfurosas
QUIMIOAUTÓTROFOS o quimiosintéticos o quimiolitótrofos	CO ₂	Reacciones de oxido-reducción	Compuestos inorgánicos H ₂ S, S, H ₂ , NH ₃ , Fe.	Hidrogenobacterias, bacterias del azufre, ferrobacterias, b. denitrificantes
QUIMIOHETERÓTROFOS o quimioorganótrofos	Sustancias orgánicas	Reacciones de oxido-reducción	Compuestos orgánicos	Animales, protozoos, hongos, bacterias

nos organismos, pero no necesariamente la desaparición de los mismos. Éstos pueden permanecer en estados latentes (estados de actividad metabólica mínima) durante cierto tiempo, de manera que sobre un determinado monumento siempre podemos encontrar una cierta población de organismos potencialmente dañinos.

Con respecto a la influencia que puede ejercer la contaminación atmosférica sobre la conservación de los monumentos, se puede decir que, evidentemente ésta es directa y negativa.

3. FACTORES BIOLÓGICOS DE DETERIORO

El estudio de la biología aplicada a la restauración es muy reciente en nuestro país (3, 5, 6, 7, 8, 9...). Durante mucho tiempo se ha tenido muy poco en cuenta la influencia de ciertos organismos sobre el estado de conservación de los materiales pétreos. Sin embargo estudios llevados a cabo en los últimos años ponen de manifiesto la importancia de tales organismos en los procesos de alteración de dichos materiales.

Los diferentes organismos pueden ser agrupados (4) en base a la forma química con la que asimilan el carbono, en base al tipo de reacción que proporciona la energía necesaria para el metabolismo, y según el tipo de donadores de electrones. Así pues, los organismos

se subdividen en 4 categorías nutricionales (ver tabla 1).

Muchos organismos tienen la capacidad de concentrar moléculas del ambiente para así poder crecer. Así, en ese lugar puede crecer otro organismo que no tenga esta capacidad. Esto es lo que se denomina concepto de sucesión.

Los organismos que mayoritariamente intervienen en los procesos de biodeterioro sobre materiales pétreos, podemos agruparlos, según el concepto de sucesión, de la siguiente manera:

- 1) Microflora autótrofa: bacterias autótrofas (quimiosintéticas), algas y líquenes
- 2) Microflora heterótrofa: bacterias heterótrofas, actinomicetos y hongos
- 3) Macroflora autótrofa: briofitos y plantas superiores (vasculares)

Se hace esta distinción para hablar de la sucesión en monumentos, es decir la secuencia en el tiempo en la que van a aparecer esos organismos. ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$). En 1) podemos encontrar un microorganismo y en 3) una higuera.

Con respecto a la fauna biodeteriorante la división sería:

- Microfauna: insectos, arácnidos, etc...
- Macrofauna: mamíferos y aves

En general, se puede afirmar que son los

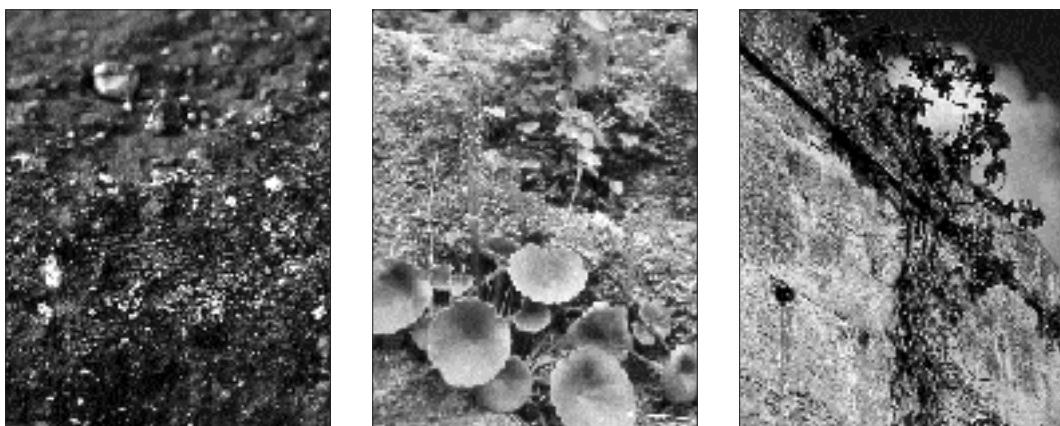


Fig. 2. Sucesión ecológica de organismos fotosintéticos: a) Algas, líquenes y musgos preparan el sustrato para b) plantas superiores de pequeño porte preparan el sustrato para c) plantas superiores de porte arbóreo.

autótrofos los que colonizan el sustrato en primer lugar, mientras que los heterótrofos necesitan materia orgánica para su crecimiento, por lo que aprovechan la presencia de los primeros para desarrollarse en este tipo de sustrato.

Las algas y, en concreto las cianobacterias o algas verde-azuladas son las que generalmente inician la secuencia de la sucesión. Poseen la capacidad de instalarse sobre los sustratos pétreos resistiendo condiciones ambientales extremas. Los restos orgánicos, el polvo, las esporas, etc., pueden depositarse sobre este revestimiento de las algas. Esta capa, rica en sustancias nitrogenadas, constituye un medio ideal para las bacterias, hongos y líquenes. Y éstos, a su vez, facilitan la instalación de los musgos, lo que suministra el suelo necesario para las plantas vasculares, cuyas raíces provocarán una degradación importante.

3.1. Principales grupos de organismos

A. Cianobacterias y algas verdes

Sobre la piedra o en el interior de ésta podemos encontrar algas microscópicas que pertenecen a dos grupos sistemáticos: las Cianofíceas o Cianobacterias (algas azules) y las Clorofíceas (algas verdes). Ocasionalmente pueden ser encontradas también otro tipo de algas (por ejemplo, las diatomeas).

Las algas son microscópicas, unicelulares, aisladas o agrupadas en colonias, más o menos compactas o formando filamentos. Los daños causados por las algas sobre las piedras son esencialmente de naturaleza estética. Sin embargo según su forma de colonizar el sustrato las algas pueden distinguirse en:

- algas recubridoras, que ejercen su acción recubriendo el sustrato, y por tanto, reteniendo polvo y suciedad sobre éste, lo que favorece el asentamiento de otros organismos; y
- algas perforantes y corrosivas, que ejercen su acción sobre el material que colonizan mediante mecanismos químicos y físicos.

Otros autores las clasifican en epilíticas, que crecen sobre la superficie, y endolíticas, que colonizan en profundidad rocas semitranslúcidas o translúcidas (4).

Los factores ambientales más importantes que condicionan el crecimiento de las algas son la intensidad luminosa, la humedad, la temperatura y el pH. Las algas verdes y más comúnmente las cianobacterias son los primeros colonizadores de la piedra, puesto que necesitan luz, agua, algunos compuestos orgánicos y, preferiblemente, un sustrato alcalino (pH= 7-8). Así, generalmente las piedras calcáreas (2) son colonizadas más frecuentemente respecto a otros tipos de piedras como el granito.

Por otro lado, algunas cianobacterias están rodeadas de una vaina mucilaginosa, coloreada, capaz de absorber y retener el agua por mucho tiempo. Esto hace que logren sobrevivir en condiciones ambientales adversas, como una sequía prolongada. Así pues, en respuesta a las condiciones ambientales, las cianobacterias pueden activar o desactivar su metabolismo. Debido a esta característica de las cianofíceas, se puede decir que son las primeras en implantarse sobre el sustrato, mientras que las algas verdes llegarían a dominar sólo después de que la retención de agua por el sustrato estuviera favorecida por la presencia de las anteriores. Con respecto a la luz, en grutas u otros ambientes subterráneos, el desarrollo algal es debido al gradiente luminoso (natural o artificial).

Las diatomeas (Bacillariophyceae) requieren ambientes con elevado índice hídrico. En climas templados están presentes sólo en las fuentes y en zonas tropicales se han detectado cubiertas de diatomeas sobre areniscas, rocas deterioradas y edificios.

B. Líquenes

Los líquenes son organismos capaces de ser activos o sobrevivir con diversas concentraciones de agua, gracias a esto los encontramos en ambientes muy extremos. Junto a las cianobacterias, los líquenes juegan un papel importante como organismos pioneros en la colonización de las rocas.

Son asociaciones simbióticas entre hongos y algas o cianobacterias. Pueden desarrollarse sobre piedras desnudas. Los talos superficiales contienen al alga, pero las hifas del hongo pueden penetrar profundamente en la piedra. Se desarrollan muy lentamente y ocupan ambientes hostiles para la mayoría de las demás formas de vida vegetal (10).

Los líquenes que crecen sobre la piedra se llaman saxícolas y, su presencia se manifiesta en forma de polvo y fragmentos (pulverulentos), pero son sobre todo crustáceos, epilíticos o endolíticos (11), aunque también encontramos foliáceos, escumulosos o fruticulosos.

Los líquenes se pueden clasificar según su biotipo en (2, 10, 12):

- Crustáceo. Talo fuertemente adherido al sustrato por toda su superficie, normalmente carece de córtex inferior y se fija a través de las hifas del hongo (médula) que penetran en el sustrato. El talo puede desarrollarse totalmente incrustado en rocas (endolítico) o bien sobre el sustrato (epilítico). Desde el punto de vista de la erosión química y mecánica son los talos que presentan un mayor efecto negativo.

Una variante del biotipo crustáceo lo denominamos leprarióide: talo enteramente pulverulento o granuloso-pulverulento, cuya superficie es irregular y no lisa.

- Foliáceo. El talo presenta un córtex inferior bien definido y se adhiere al sustrato mediante ricinas producidas por el hongo del liquen. La erosión química es menos acusada, si bien la erosión mecánica producida por las ricinas puede ser mayor que en el caso anterior (2).

- Escumuloso. Talo formado por escamas con los bordes laxamente adheridos al sustrato, a veces superpuestas. Algunos no tienen córtex inferior, otros sí.

- Fruticuloso. Talo formado por lacinias erectas o pendientes y que se fija al sustrato por un punto (disco de fijación), por lo cual la erosión química es mucho menos acusada,



Fig. 3. Algas verdes
(Fuente Borromini de
Pza. Navona, Roma).

pero la erosión mecánica es igual o superior que en el caso de los foliáceos. Las ramificaciones pueden ser cilíndricas o aplanadas.

Es posible que la secuencia de sucesión de los líquenes comience por los crustáceos, que actuarían como pioneros, seguidos por los foliáceos y los fruticulosos (10).

Con respecto a las condiciones ambientales, se pueden diferenciar claramente dos tipos de bioalteración en base a la humedad del sustrato: cuando ésta es continua predominan las cianobacterias, algas y briofitos (4); sin embargo si la humedad no es permanente se observa la presencia de líquenes de biotipo (tipo ecológico) crustáceo, los cuales incrementan la alteración del sustrato.

Los líquenes tienen una amplia distribución ecológica. Esta distribución está influenciada por los gradientes ambientales y la distribución de nutrientes y minerales: depósitos salinos, restos de palomas (alto contenido en N y P). En este último caso se habla de flora ornitocoprófila.

Sobre piedra caliza, sustrato más invadido por los líquenes, el biotipo dominante es el crustáceo, aunque también se observan algunos biotipos foliáceos y escumulosos.

También, sobre el mismo monumento en estudio, la diferente exposición a la lluvia o a la luz solar, unida a las distintas características arquitectónicas, causan colonizaciones variadas y muy particulares de especies con distinta ecología.

Son organismos de crecimiento lento, con pocos requerimientos ecológicos y muy resistentes a las condiciones extremas de temperatura y humedad. Sin embargo, poseen una elevada sensibilidad a la contaminación atmosférica. En aquellos lugares donde la contaminación atmosférica es muy alta, los monumentos constituidos por materiales pétreos están completamente libres de colonización.

C. Bacterias y actinomicetos

Las bacterias atacan la piedra por vía química. Las que juegan un papel importante en la degradación de las rocas y los minerales son autótrofas, pero también quimiolitotrófas facultativas

(que usan indiferentemente sustratos orgánicos y/o inorgánicos) y heterótrofas.

Las alteraciones producidas por las bacterias no son diferentes de aquellas puramente químicas: costras negras, pulverizaciones, exfoliaciones. Generalmente los procesos abióticos son considerados más importantes y el papel que juegan las bacterias en el deterioro sólo se considera si, mediante los análisis, se demuestra una presencia consistente.

Los procesos de solubilización del sustrato, causados por microorganismos, van siempre acompañados de una acidificación del medio (producción de ácido) y de una pérdida de material lítico (4).

Por otro lado, en el caso de que las obras en estudio sean pinturas murales, las bacterias pueden causar también la variación de color de los pigmentos de aquellas. Sin embargo, los pigmentos a base de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de muchos microorganismos por su efecto tóxico.

Para las bacterias, como para todos los microorganismos, el aspecto cuantitativo es fundamental para valorar su importancia en los procesos de degradación. No obstante, dependiendo de los distintos métodos utilizados para extraer las bacterias de la piedra, para cultivarlas y realizar conteos, se pueden obtener resultados muy diversos.

Los microorganismos que se establecen sobre la superficie de los monumentos y que causan parte del biodeterioro que experimentan, se pueden dividir en microorganismos autótrofos y microorganismos heterótrofos. De entre los primeros podemos destacar las llamadas bacterias quimioautótrofas o quimiosintéticas, que comprenden las bacterias del ciclo del azufre (sulfatorreductoras y sulfooxidantes) las bacterias del ciclo del nitrógeno y las ferrobacterias. Y de los segundos, las bacterias heterótrofas y los actinomicetos.

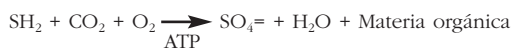
C.1. Bacterias del ciclo del azufre

La colonización y proliferación de estas bacterias es consecuencia de los procesos de alteración físico-químicos que haya sufrido el sustrato, así como de las condiciones ambientales.

La contaminación atmosférica deteriora el material original, formando nuevas sales, frecuentemente sulfatos. El dióxido de azufre junto con el ácido sulfhídrico, además del efecto agresivo que provocan, son los responsables de la presencia de compuestos azufrados sobre el sustrato, lo cual favorece la implantación de una flora bacteriana que utiliza tales compuestos.

Bacterias sulfooxidantes.

La formación biológica de yeso, casi siempre presente entre los productos de degradación de la piedra calcárea, es debida a la acción de estas bacterias, las cuales utilizan varios compuestos reducidos del azufre (4). Sólo con la oxidación del azufre reducido obtienen la energía necesaria para la síntesis de su materia celular. La fuente de carbono que utilizan es el dióxido de carbono del aire, y la fuente de nitrógeno los nitratos o el amonio. Oxidan el ácido sulfhídrico, el azufre elemental, etc., para dar sulfatos mediante la reacción:



Así, las alteraciones son debidas a oxidaciones enzimáticas de sustancias sulfuradas y a la producción de ácido sulfúrico y/o sulfatos.

Bacterias sulforreductoras.

Cuando se produce una reducción de sulfato a sulfuro es obra de estas bacterias. En la reacción anterior, el ácido sulfhídrico existente puede provenir tanto de la contaminación ambiental como de la reducción de sulfatos por estas bacterias según la ecuación:



Numerosos estudios prueban la presencia de bacterias del ciclo del azufre sobre monumentos pétreos en ciudades y en áreas rurales donde la polución atmosférica no puede ser la causa de la alteración.

C.2. Bacterias del ciclo del nitrógeno

Estas bacterias son capaces de acelerar la alteración de la piedra mediante procesos de oxidación, de los cuales obtienen su energía. Parte de esta energía la utilizan para obtener el carbono que necesitan.

Bacterias nitrificantes y nitrooxidantes.

Las primeras oxidan el amoníaco que transforman en ácido nitroso, y las segundas transforman el ácido nitroso en ácido nítrico (4).

El nitrógeno atmosférico puede ser fijado por bacterias aerobias y anaerobias. Esto puede dar lugar a la formación de compuestos orgánicos nitrogenados lo que favorece el desarrollo de organismos heterótrofos (3). Estos compuestos pueden ser descompuestos en amoníaco por bacterias amonificantes (denitrificación), y este amoníaco, a su vez, puede ser oxidado a nitritos y nitratos por las bacterias nitrificantes y nitrooxidantes.

El papel de las bacterias nitrificantes es determinante en los procesos de biodeterioro de los materiales pétreos, porque el ácido así formado ataca los carbonatos produciendo nitrato de calcio, el cual es eliminado por las aguas de lluvia. La roca se disgrega y se vuelve pulverulenta. El aporte de amoníaco puede provenir tanto de la contaminación atmosférica como de la ascensión capilar de agua desde el suelo a los muros (3).

Entre las bacterias autótrofas encontramos también las ferrobacterias que toman energía de la oxidación de los iones ferrosos a iones férricos y además pueden oxidar algunos minerales que contienen hierro como la pirita.

C.3. Bacterias heterótrofas

Las bacterias heterótrofas juegan también un papel muy importante en la degradación de la piedra. Pueden ejercer su acción mediante formación de dióxido de carbono y de ácidos orgánicos que, aunque sean muy débiles, pueden actuar sobre el carbonato cálcico que constituye el sustrato.



Fig. 4. Actinomicetos con apariencia de eflorescencias salinas (Iglesia de San Clemente, Roma).



Fig. 5. Musgos y Hepáticas (Escalera del Castillo de Luna en Mairena del Alcor, Sevilla).

C.4. Actinomicetos

Con respecto a los actinomicetos, la frecuencia de encontrarlos sobre frescos y piedras deterioradas, especialmente en condiciones de elevada humedad y abundante materia orgánica, es considerable. Su presencia se manifiesta en forma de pátina blanquecina o blanco-grisácea, por lo que a veces se confunden con eflorescencias salinas.

Su capacidad de utilizar nitritos y nitratos y de reducir los sulfatos se ha demostrado experimentalmente. Con sus productos metabólicos (ácido carbónico, nítrico, sulfúrico y otros ácidos orgánicos más débiles) pueden atacar la piedra calcárea y minerales (mica y ortoclasa) (4).

D. Hongos

Los hongos, a pesar de ser organismos heterótrofos, a veces pueden ser aislados de materiales pétreos alterados, especialmente en las regiones tropicales (4) o cuando las condiciones de humedad relativa y temperatura son elevadas.

Aunque la composición inorgánica de la piedra no ofrece un sustrato favorable para el crecimiento de estos microorganismos, existen residuos orgánicos de distinta naturaleza que casi siempre están presentes sobre la piedra y sobre pinturas murales, permitiendo el crecimiento de muchas especies fúngicas con limitadas exigencias nutricionales (4).

Así pues, desde el punto de vista morfológico, la presencia de hongos se reconoce por la formación de manchas debidas a sus pigmentos o a la presencia del micelio. Las manchas son más o menos superficiales y, a menudo, de color oscuro. La penetración del micelio fúngico puede ser profunda, por ejemplo en el revoco de la pintura mural, y causar pérdida de cohesión del estrato pictórico. En la piedra dolomítica y calcárea las hifas penetran los cristales de calcita. Algunos hongos son endolíticos y producen fenómenos de pitting.

E. Plantas inferiores (briofitos) y superiores

Briofitos y plantas vasculares crecen abundantemente sobre los edificios y las áreas arque-

ológicas cuando el sustrato y las condiciones ambientales son favorables. Éstas son un contenido de agua suficiente (importante sobre todo para los briofitos), una iluminación adecuada para permitir la actividad fotosintética y una buena porosidad del sustrato, que favorezca tanto la retención de humedad como la penetración mecánica de los rizoides o de las raíces.

E.1. Briofitos

Los briofitos, que incluyen los musgos y las hepáticas, necesitan para poder crecer un mínimo estrato de suelo donde poder anclar sus primitivas raíces, es decir, no son capaces de desarrollarse directamente sobre el sustrato pétreo, sino que necesitan un depósito previo de materia (3). Además necesitan una presencia continua de agua sobre un sustrato preferiblemente poroso, como por ejemplo morteros, que acaban desintegrando por penetración de sus rizoides (10) y una protección de la luz solar (2).

Los briofitos pueden ser clasificados por biotipos o tipos ecológicos (10):

- Folioso. Biotipo de briofitos que supone el mismo impacto que los talos foliáceos de los líquenes porque se adhieren al sustrato mediante rizoides.
- Taloso. Biotipo de hepáticas. Similar en cuanto a impacto al caso anterior.

Estos organismos no tienen órganos para la absorción de elementos minerales del suelo y el contacto entre la planta y su sustrato está escasamente desarrollado. Sus hojas no poseen una capa epidérmica diferenciada, sino que constan de un único estrato de células parenquimatosas, expuestas directamente al aire. Sus principales fuentes de elementos nutritivos son las sales minerales, los aerosoles, suministrados por la lluvia y la deposición seca de partículas (3). De aquí se deduce su sensibilidad a los contaminantes atmosféricos (ozono, fluoruros, metales pesados,...) lo que ocasiona su casi completa desaparición de núcleos urbanos e industriales (6).

E.2. Plantas superiores

Otra causa de biodeterioro de los monumentos pétreos son las plantas superiores. La presencia de estos organismos sobre cualquier tipo de estructura supone un peligro para su conservación debido a la acción mecánica que ejercen sobre el sustrato.

Se distinguen varios biotipos, que afectan desigualmente al sustrato, y que se establecen en base a la duración del ciclo vital y a la perdurabilidad y situación de las yemas.

- Terófitos. Plantas que cumplen su ciclo vital completo en la estación favorable (anuales). No hay estructuras perdurables excepto las semillas. El grado de desarrollo alcanzado por los terófitos depende de la especie considerada. Suelen ser las más comunes en monumentos.
- Hemicriptófitos. Plantas en las que la parte aérea muere cada año, quedando las yemas perdurantes a ras del suelo. No suelen alcanzar tallas tan altas como los terófitos, pero al ser perennes la erosión mecánica puede ser más grave para el sustrato.
- Caméfitos. Plantas leñosas de poco porte, con yemas perdurantes que no se elevan más de 50 cm del suelo.
- Criptófitos. Plantas cuyas partes perdurantes quedan bien protegidas bajo la superficie del sustrato, acomodándose en fisuras, grietas y superficies de escorrentía. Desde el punto de vista de la erosión mecánica son las que pueden provocar un mayor daño.
- Fanerófitos. Plantas leñosas arbóreas. Su grado de desarrollo se ve claramente condicionado por la accesibilidad y la riqueza del sustrato así como por la abundancia de agua. Desde el punto de vista mecánico son las más perjudiciales debido al tamaño y volumen que pueden alcanzar sus raíces, pero lógicamente son las menos abundantes.

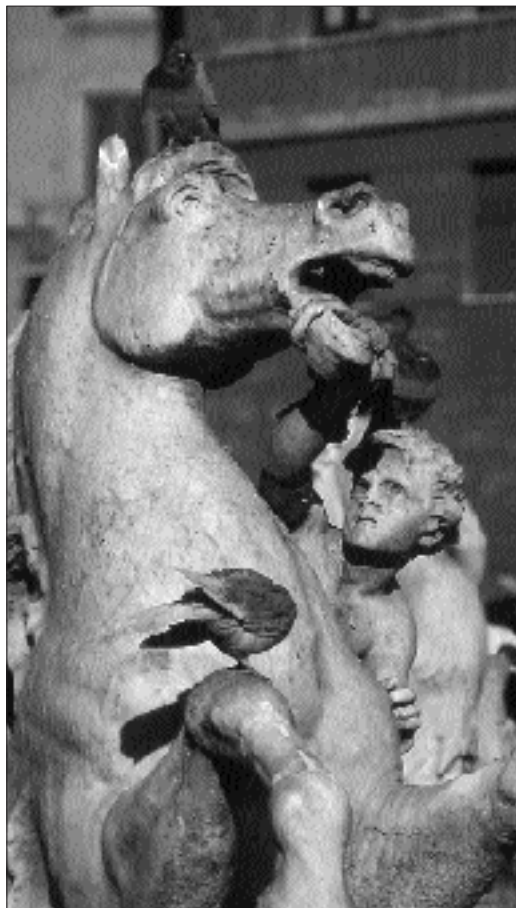


Fig. 6. Avifauna urbana
(Fuente Neptuno de Pza.
Navona, Roma)

Así pues, a grandes rasgos, estos organismos se pueden distinguir entre especies estacionales o perennes de crecimiento continuo y especies herbáceas, arbustivas o arbóreas. En ambas el grado de alteración mecánica aumenta en el mismo orden (2).

Así pues, el análisis y determinación de la vegetación deben ser considerados como una contribución importante previa e imprescindible en los estudios de tratamientos biocidas para la conservación.

F. Animales

El daño más frecuentemente observado sobre materiales pétreos expuestos a la intemperie es aquel provocado por las aves, en particular por la avifauna urbana, por ejemplo las palomas. Éstas son un importante agente de deterioro por estar relacionadas con el crecimiento de la flora ornitocoprófila. Sus excrementos contienen ácidos (úrico, fosfórico, nítrico, etc.) que reaccionan con la piedra produciendo un efecto corrosivo y creando además problemas de naturaleza estética e higiénica.

Cuando se trata de edificios que poseen algunas estructuras de madera se pueden encontrar insectos xilófagos, principalmente escarabajos anóbidos y termitas. Estos insectos viven en climas cálidos, así en Europa existen unas pocas zonas en las cuales estos insectos pueden sobrevivir. En las áreas en las que viven y se reproducen, la madera de los edificios constituye siempre una de sus fuentes de alimento principales.

Entre los mamíferos, los topos y las ratas han adquirido hábitos de vida muy correlacionados a la vida y a los hábitos del hombre. La nocividad de estos animales se hace grave cuando la dimensión de la población, que normalmente en las grandes ciudades es de millones de individuos, hace que algunos individuos actúen de forma agresiva. Las dos especies de roedores que causan daños a los bienes culturales son: el topo doméstico (*Mus musculus*) y la rata común o rata negra (*Rattus rattus*).

En el caso de áreas arqueológicas, son los animales de pastoreo los máximos responsables del deterioro causado en estas obras.

Por otro lado, la mera presencia de animales puede dar lugar a la propagación de otras especies de organismos, cuyas estructuras reproductoras pueden quedar adheridas a ellos y ser transportadas.

Por último, no es necesario mencionar el deterioro que es capaz de causar el hombre en sus propias obras.

En resumen, las superficies pétreas se pueden considerar como un sustrato donde se asientan distintas comunidades, sobre todo cuando no se efectúan trabajos de limpieza y mantenimiento, ni se controla el crecimiento con algún tipo de biocida.

4. MECANISMOS Y ASPECTOS MORFOLÓGICOS DEL BIODETERIORO

El biodeterioro de los materiales pétreos se produce mediante mecanismos de diverso tipo: procesos físicos o mecánicos (disgregación o fracturación), procesos químicos (descomposición) y procesos estéticos. Sin embargo, dependiendo de los agentes biodeteriorantes, del tipo de sustrato y de las condiciones ambientales, uno u otro prevalece (4).

Por otro lado, el desarrollo de microorganismos u organismos puede crear condiciones favorables para el crecimiento de otras especies biodeteriorantes o, en otras palabras, dar lugar a una sucesión ecológica con el desarrollo de cenosis más complejas.

Dependiendo de la distinta composición química de los materiales, se pueden encontrar diversos tipos de biodeterioro, por consiguiente la propia naturaleza del sustrato condiciona el desarrollo de algunos organismos biodeteriorantes por encima de otros.

Algunos procesos metabólicos son característicos de todos los organismos vivos (por ejemplo, la producción de CO_2 a través de la respiración); otros, por el contrario, son específicos de algunos organismos especializados y dependen de la posibilidad de utilizar un determinado sustrato como fuente nutricional (por ejemplo, la descomposición debida a reacciones enzimáticas).

Otras características de los materiales, como por ejemplo el pH, el contenido de agua y la pre-

sencia de impurezas, condicionan el desarrollo de los organismos (9). Un cierto pH puede favorecer el crecimiento de una flora acidófila o basófila; la higroscopicidad de un material y, por consiguiente, su contenido en agua, es fuertemente condicionante. La presencia de impurezas de diversa naturaleza sobre un material puede hacer más fácil la instalación de un agente biodeteriorante o aumentar el rango de microorganismos que pueden desarrollarse.

Por otro lado, es necesario recordar que los procesos de degradación físico-químicos facilitan el biodeterioro. Por ejemplo, la piedra deteriorada, con una mayor porosidad, es atacada más fácilmente que el mismo material sin haber sufrido daño (4).

4.1. Procesos físicos o mecánicos (disgregación o fracturación)

Este tipo de biodeterioro posee un origen mecánico. En el caso de materiales pétreos lo que se produce es un deterioro biogeofísico, es decir, se altera la estructura.

Aquí se incluyen aquellos mecanismos que ocasionan una disgregación del sustrato o un incremento de la porosidad debido a la acción mecánica de los organismos (movimiento-animales o crecimiento-vegetales).

La vegetación causa un deterioro físico importante debido, por un lado, al crecimiento de organismos dentro del sustrato, por otro, a los cambios de volumen que experimenta (según las condiciones de hidratación) lo que ocasiona microfracturas y, por último a la retención de agua, que, mediante ciclos de heladicidad, produce una disgregación del sustrato (4).

4.2. Procesos químicos (descomposición)

Estos mecanismos tienen origen químico. La acción de los organismos causa un deterioro biogeoquímico, se altera la composición del material.

Aquí se incluyen todos los mecanismos que ocasionan la descomposición o la transformación del sustrato debido a la actividad química de los organismos (corrosión, disolución).

La acción química de los organismos puede ser debida a procesos de asimilación o de excreción (4):

- Biodeterioro químico asimilador: Los organismos usan el material (no pétreo) como fuente nutricional, como fuente de carbono o de energía liberada gracias a la actividad enzimática que poseen.

- Biodeterioro químico de excreción o desasimilador: El material es dañado por la excreción de productos metabólicos intermedios o finales (ej.: ácidos y pigmentos que pueden deteriorar o colorear el sustrato). Algunos organismos especializados usan mecanismos de excreción para poder penetrar activamente en el sustrato, por ejemplo, los organismos endolíticos.

Algunos de los procesos químicos son: acidolisis, complejólisis, alcalinolisis, degradación enzimática y emisión de pigmentos.

4.3. Daños estéticos

El concepto de daños estéticos es muy subjetivo, el término se usa para indicar toda una serie de alteraciones en el aspecto exterior de la obra de arte. Estas alteraciones son debidas al crecimiento de poblaciones biológicas.

Los daños estéticos comprenden:

- cambios debidos a alteración cromática,
- desarrollo de pátina biológica e
- impedimento visivo del material que constituye la obra de arte.

No obstante los daños estéticos representan el aspecto menos importante del problema del biodeterioro. De todas formas este concepto puede variar individualmente en relación a la sensibilidad personal y a la cultura de un pueblo y puede cambiar en un tiempo relativamente breve. Por ejemplo, en el siglo diecinueve el valor estético de la pátina algal y líquénica era no sólo tolerado sino también muy apreciado. Actualmente, por el contrario, se prefiere retirar

la pátina biológica, las incrustaciones o la vegetación ruderal no sólo por razones de conservación sino también por tener una mejor visibilidad de la obra (4).

Por otro lado, ha de tenerse en cuenta que una colonización biológica, aunque no sea muy dañina, puede favorecer el ataque de otras especies más agresivas (sucesión).

4.4. Mecanismos de acción de los distintos organismos

A. Cianobacterias y algas verdes

El crecimiento de las algas está promovido por un alto grado de humedad en el sustrato que colonizan y forman una pátina superficial que, a su vez, puede mantener la humedad del material favoreciendo su disolución por agua.

Así, el deterioro causado por algas, o ficodeterioro, puede ser en un primer momento de tipo estético. En este caso las intensas coloraciones y los cambios texturales que producen las algas dan lugar a alteraciones de distinta naturaleza y repercusión: por un lado se observa un deterioro funcional (soiling), por absorción de polvo atmosférico, material particulado, etc. y, por otro lado, una interferencia en la lectura de la obra. Esto último pasa a ser considerado un problema cuando el estado de alteración del sustrato y la contaminación del agua favorecen una proliferación excesiva de estos organismos y una rápida deposición de costras carbonatadas.

Otras alteraciones consideradas también de tipo estético son la formación de pátinas de diversa gama cromática, según la época del año, y la formación de concreciones/acreciones, comprobándose experimentalmente que muchas especies algales condicionan la estructura de las deposiciones minerales.

Así pues, la pátina algal, además de estar causando un daño estético, favorece la deposición de polvo, semillas, esporas, etc., y por consiguiente el crecimiento de otros organismos. Además las variaciones en la tasa de gas carbónico ligada a su respiración y a su fotosíntesis trae consigo modificaciones de las capas superficiales de carbonato cálcico.

Por otro lado, existen estudios, en diversos monumentos, sobre ciertas especies que presentan una vaina con gran capacidad para retener agua. Estos organismos, mediante contracciones y dilataciones, pueden provocar alteraciones físicas en el sustrato.

Así, con respecto a las alteraciones de tipo físico, además de la mencionada anteriormente, se ha comprobado que las algas pueden actuar mecánicamente sobre el material que colonizan favoreciendo la gelifración. Esto sucede en aquellos lugares donde se produzcan heladas en invierno.

En cuanto a la acción química de las algas sobre los monumentos, éstas además pueden ejercer una acción de corrosión, así como una acción perforante (por ejemplo, las algas endolíticas).

Así, el deterioro químico se produce como consecuencia de las reacciones bioquímicas y fisiológicas de las algas. Excretan ácidos orgánicos (pirúvico, glicólico, láctico, acético,...) como consecuencia de los procesos de respiración y con finalidad penetrante en las especies endolíticas. Por otro lado excretan polisacáridos de acción quelante y provocan la precipitación y agregación de partículas de carbonato cálcico mediante la variación del pH causada por el metabolismo fotosintético y el incremento de la concentración de dióxido de carbono.

Por último, las algas favorecen el crecimiento de otros organismos de metabolismo muy corrosivo (bacterias, hongos, briofitos).

B. Líquenes

Los líquenes ejercen un daño estético y físico sobre el sustrato, pero aún más importante es el producido químicamente:

Un elevado desarrollo de colonias líquénicas que puede dar lugar a un depósito de material, así como la producción de pigmentos, suponen mecanismos estéticos de biodeterioro.

La descomposición mecánica se produce porque los líquenes incrementan su masa conforme crecen y, por otro lado, cambian de volumen según el período sea húmedo o seco. Por tanto,

el deterioro se produce por la penetración de las ricinas en el sustrato y la acción física ejercida por la alternancia de expansión en estado hidratado y contracción en estado seco de la gelatina himenal.

Además, la presencia de los líquenes favorece la condensación de agua y su retención sobre la superficie pétrea.

Con respecto a la acción química que los líquenes ejercen sobre el sustrato, éstos pueden provocar una desestabilización química del mismo debido a los productos de su metabolismo. Los líquenes excretan ácidos orgánicos, entre ellos el ácido oxálico, el cual es responsable de la quelación de la superficie, lo que explica su acción degradativa.

Sin embargo, aunque existen muchos estudios que ponen de manifiesto el deterioro causado por estos organismos, éste continua siendo discutido debido a la doble acción que ejercen los líquenes sobre estos materiales: por un lado como organismos deteriorantes y, por otro lado, como agentes protectores del sustrato frente a factores ambientales.

Por tanto, los líquenes pueden ejercer un efecto protector contra agentes degradativos. Causan modificaciones morfológicas y físicas sobre la superficie de la piedra, formando un revestimiento cuyo espesor es del orden de milímetros. Así, al erradicar los líquenes de la piedra, ésta puede ser atacada mucho más drásticamente.

C. Bacterias y Acinomicetos

Los mecanismos bacterianos de ataque a superficies pétreas son de dos tipos: en primer lugar, una fase reversible inicial que incluye atracciones electrostáticas y fuerzas de Van der Waal y, en segundo lugar, una fase irreversible dependiendo del tiempo y la velocidad de crecimiento.

Al estudiar las causas de alteración de la piedra, observamos la presencia de sales solubles, principalmente sulfatos y nitratos. Esto puede ser causado por reacciones químicas producidas entre agentes químicos del aire y material pétreo, o por reacciones enzimáticas de microorganismos específicos. Por tanto, ha sido necesario

establecer el papel que juegan en este proceso las bacterias del ciclo del azufre y del nitrógeno.

Las bacterias del ciclo del azufre participan en el fenómeno de alteración de la piedra mediante oxidaciones enzimáticas de sustancias sulfuradas y la producción de ácido sulfúrico y/o sulfatos.

Las bacterias nitrificantes atacan la piedra utilizándola como fuente de carbono y produciendo ácidos nítrico y nitroso a partir de amoníaco. El proceso de nitrificación comprende dos oxidaciones biológicas, la oxidación del amoníaco a ácido nitroso (bacterias nitrificantes) y la del ácido nitroso a nítrico (bacterias nitrosantes).

Así pues, son los sulfatos y los nitratos los productos de alteración. (Ver factores biológicos de deterioro).

La actividad biodeteriorante de las bacterias heterótrofas viene determinada por la producción de agentes complejantes, ácidos orgánicos e inorgánicos y álcalis. Además, estas bacterias producen pigmentos que se extienden, desde las zonas profundas, donde crecen, hasta la superficie, dando lugar a alteraciones cromáticas antiestéticas.

Los actinomicetos, de los cuales los más frecuentes son los estreptomicetes, son microorganismos capaces de utilizar nitritos y nitratos y de reducir sulfatos. Además, atacan las piedras calizas y los minerales silíceos con sus productos metabólicos (CO_2 , HNO_3 , H_2SO_4 , y otros ácidos orgánicos más débiles).

D. Hongos

Los mecanismos de bioalteración de materiales pétreos debidos a hongos se manifiestan principalmente en dos aspectos: químico y mecánico.

Sin embargo, no puede olvidarse que estos microorganismos provocan también un deterioro estético debido a la formación de manchas causadas por la excreción de pigmentos, lo que ocasiona alteraciones cromáticas en la superficie pétreas que colonizan, por ejemplo la aparición de manchas superficiales en el caso de hongos creciendo sobre frescos.

Con respecto al deterioro mecánico, la penetración del micelio fúngico puede ser profunda, por ejemplo en el revoco de la pintura mural, y

causar pérdida de cohesión del estrato pictórico. En la piedra dolomítica y calcárea las hifas penetran los cristales de calcita. Algunos hongos son endolíticos y producen fenómenos de pitting. Por otro lado, al igual que los líquenes, provocan disgregaciones en el sustrato por cambios de volumen, retención de agua y el propio crecimiento.

La acción química de los hongos parece ser el aspecto más importante de la degradación y ésta se demuestra en el laboratorio: la solubilización del sustrato está siempre relacionada con una disminución del pH, debida a la producción de ácido. Los hongos producen muchos ácidos orgánicos (cítrico, oxálico, glucónico, glucurónico, láctico, fumárico) que forman complejos de quelación con los cationes metálicos del sustrato, disolviendo las calcáreas, los silicatos (mica y ortoclasa), los minerales que contienen hierro y magnesio (biotita, olivino, piroxena) y diversos fosfatos.

Además, las hifas del hongo penetran en los cristales de calcita y sus secreciones químicas producen surcos en la dolomita y la calcita, creando microhábitats para bacterias y algas, también para plantas superiores.

E. Plantas Inferiores (Briofitos) y Superiores

Los briofitos deterioran los materiales pétreos tanto por mecanismos físicos como químicos.

Los rizoides de los musgos penetran dentro de las piedras siguiendo el sistema de vesículas y, a veces, rompiendo las paredes entre éstas.

La acción química que ejercen es similar a los mecanismos que emplean las plantas superiores. Son capaces de extraer cationes debido a la acidez de sus raíces.

Sin embargo, el mayor peligro que representan los briofitos es que su presencia supone un enriquecimiento en materia orgánica e inorgánica que favorece el desarrollo de plantas vasculares, mucho más destructivas.

Por último, es necesario erradicar a los briofitos en estado temprano de crecimiento, ya que si maduran producen esporofitos para su proliferación.

Las plantas ruderales causan daños de diversa entidad dependiendo de su ciclo vital, de su

forma biológica y de la extensión y lignificación de las raíces.

En primer lugar, suponen un deterioro estético del sustrato, aunque no deben olvidarse los aspectos mecánico y químico.

Por un lado, la presión ejercida por las raíces seguida del crecimiento y el engrosamiento radial puede causar serios daños en el sustrato. También puede ocurrir que una zona muy compacta puede ser penetrada cuando se produce una disminución de cohesión de los materiales debida a la acción de otros factores físico-químicos.

Con respecto al mecanismo químico, el deterioro se debe principalmente a la actividad de los exudados de sus raíces, que contienen compuestos orgánicos e inorgánicos. Dichos exudados digieren el material sobre el que vegetan provocando fisuraciones y resquebrajaduras en techos, muros y suelos. En tales fisuras entra el agua que, además de disolver y lavar lentamente el material, se congela en invierno y separa porciones de la estructura lo que, a veces, puede perjudicar la estabilidad del monumento.

F. Animales

El daño más frecuentemente observado sobre los materiales pétreos expuestos a la intemperie es aquél provocado por las aves, especialmente las urbanas. Los daños son debidos principalmente a los hábitos que poseen y al elevado número de individuos que se encuentran en muchos monumentos.

En casos específicos cigüeñas, gaviotas y córvidos pueden ser mencionados como biodeteriogenos, pero existen otras especies más abundantes: el gorrión, la paloma y el estornino.

Es necesario recalcar que la nocividad de estos animales se produce sólo cuando el número y la concentración de individuos es excesiva.

El daño que más nos interesa es el producido por sus excrementos.

Ocasionan un daño estético porque, como en el caso de otras aves gregarias, el acúmulo de excrementos determina con el tiempo el embaldurnamiento del material y termina recubriendo la superficie, impidiendo la visión de la obra.

También los excrementos producen un daño

químico puesto que son riquísimos en ácido úrico y contienen sulfatos, nitratos y fosfatos que son solubles en agua por lo que reaccionan con el sustrato generando otras sales y provocando corrosión.

Por otro lado, se da un daño mecánico debido al posamiento de estas aves si la piedra tiene escasa cohesión superficial. En el caso de las cigüeñas, el deterioro físico es el más importante de todos los que produce debido al peso que pueden alcanzar los nidos de estas aves (más de 100 Kg) sobre los lugares más inaccesibles. Estos nidos se suelen ubicar sobre pináculos y otras estructuras similares que suelen ser las más frágiles.

Además causan daños indirectos mediante el aporte de sustancias orgánicas que sirven de nutrientes para la microflora heterótrofa (bacterias, actinomicetos y hongos). En otras ocasiones la costra biogénica está constituida por algas, líquenes y musgos. También favorecen el desarrollo de una flora nitrófila, especialmente sobre las zonas horizontales donde la deposición de excrementos es mayor.

Por último, a través de los excrementos, las aves depositan sobre cornisas y otras estructuras las semillas no digeridas de los frutos que forman parte de su dieta. Otro vector de propagación de semillas, sería a través de las patas de las aves en las cuales quedan adheridas. Las semillas son transportadas a tejados y zonas altas donde arraigan si existe un suelo incipiente. Estos son los principales vehículos mediante los cuales se dispersan las especies vegetales que van a colonizar las zonas altas del patrimonio arquitectónico.

4.5. Aspecto morfológico de las alteraciones biológicas

Obviamente los organismos vegetales son reconocibles más fácilmente que los microorganismos, porque sus dimensiones nos permiten identificarlos a simple vista (11). La pátina de algas, los musgos, las hepáticas y los líquenes son difíciles de distinguir para aquellas personas que no posean una preparación específica en biología.

Una información sistemática más detallada (a nivel de orden, clase, familia, género y especie) solamente se obtiene mediante análisis específicos. Esto es necesario para aplicar correctamente las medidas preventivas o de control.

El aspecto morfológico de las alteraciones varía según las especies presentes, la naturaleza del sustrato, el clima y el período estacional.

Dependiendo del tipo de organismo, se pueden distinguir dos tipos de deterioro biológico. Por un lado una alteración cuya morfología y características nos permite individualizar su origen y, por otro, las alteraciones que requieren llevar a cabo ensayos de laboratorio para establecer la naturaleza del verdadero biodeteriogeno (3, 13).

La morfología más frecuente de las alteraciones biológicas de los materiales pétreos son:

Bacterias autótrofas

Costra negra, pátina negra, exfoliación, pulverización

Bacterias heterótrofas

Costra negra, pátina negra, exfoliación, cambio de color, manchas

Actinomicetos

Pátina y polvo blanco-grisáceo, eflorescencias blancas

Hongos

Manchas, exfoliación, pitting (punteaduras)

Cianobacterias y algas

Pátinas y películas de varios colores y consistencias

Líquenes

Incrustaciones, manchas, pitting

Musgos y hepáticas

Talos verde-grisáceos

Plantas superiores

Hierba, arbustos y especies leñosas inducen fracturas, colapsamientos, desprendimientos de material

Animales:

Insectos

Agujeros de forma típica

Aves

Deposición de excrementos con efecto corrosivo, agujeros

Sin embargo, la forma más clara y precisa para una clasificación de estos indicadores es la propuesta por A. Martín (13), en la cual clasifica las distintas morfologías o manifestaciones de biodeterioro que se observan frecuentemente en los materiales pétreos:

Clasificación de los indicadores de bioalteración

Modificaciones superficiales

1) Variaciones cromáticas

Alteraciones cromáticas

Moteado

Pátina

2) Costra

3) Depósitos

Depósitos superficiales

Incrustación

Eflorescencias

Eliminación o pérdida de material

1) Alveolización

2) Picado

3) Formación de surcos

4) Descohesión

Rupturas

Disyunciones

Las modificaciones superficiales son manifestaciones de alteración que afectan al aspecto más externo de la piedra, sin provocar modificaciones importantes en el material subyacente. Los organismos que ocasionan estas morfologías son bacterias, hongos y algas, principalmente.

La eliminación o pérdida de material se manifiesta con la formación de pequeñas cavidades o pérdida de cohesión, causadas por bacterias, algas, líquenes, hongos, plantas vasculares e incluso insectos.

Las rupturas son discontinuidades producidas de una forma más o menos perpendicular a la superficie de la piedra. Principalmente causadas por plantas superiores, aunque los líquenes también pueden provocar la fracturación del sustrato.

Las disyunciones suponen la separación entre partes de la piedra, paralelamente a la superficie de la misma, produciendo fragmentos de menor o mayor tamaño (3, 13, 14). La separación seguida del desprendimiento, dependiendo del tamaño y la forma de la porción desprendida, se denomina: separación de placas, exfoliación descamación y separación de películas. Las responsables son principalmente las sulfobacterias.

5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Dependiendo de cual sea la naturaleza de los organismos que se sospecha puedan ser responsables de un fenómeno de bioalteración, será necesario llevar a cabo una serie de análisis que permitan establecer si es así o no.

Los métodos utilizados por los diferentes autores son variados y no existe un criterio o protocolo básico al que someterse. Cabe distinguir entre lo que podríamos llamar métodos directos de estimación de organismos y métodos indirectos, según se compruebe la presencia directa de los agentes bioalterantes o de sus productos metabólicos, actividad bioquímica..., respectivamente.

Los métodos morfológicos y estructurales implican varias técnicas de examen del material pétreo:

- observación visual;
- con estereomicroscopio, aunque de escaso aumento, permite identificar los organismos presentes;
- con microscopio óptico, se puede reconocer la morfología y estructura celular de cada grupo de organismos y microorganismos;
- con microscopio electrónico de barrido,

para la observación tridimensional de las células o de la superficie de la piedra;

5.1. Toma de muestras

La toma de muestras se lleva a cabo en aquellos lugares donde sea evidente la alteración del sustrato. Los diversos factores de los que depende son: la cantidad de muestra a tomar, la forma de hacerlo, y los instrumentos que se emplean en cada caso concreto.

5.2. Métodos de estimación directa de organismos

5.2.1. Reconocimiento de visu

Cuando se trata de plantas superiores u organismos de tamaño macroscópico se realizará su determinación a simple vista.

5.2.2. Microscopía

La microscopía es una técnica empleada principalmente para evaluar la acción alterante de los organismos mediante el estudio de la interfase sustrato-organismo. Por otra parte permite establecer casi inmediatamente el tipo y morfología de los organismos presentes.

Las técnicas microscópicas incluyen microscopía óptica o de luz y microscopía electrónica. En el primer caso, las muestras pueden ser observadas directamente en fresco o pueden ser montadas, previa tinción o no, para su observación.

La microscopía electrónica requiere una serie de pasos más o menos complicados previos a la observación. Se obtienen aumentos mayores que los alcanzados por medio de sistemas ópticos que utilizan radiaciones luminosas como fuente de iluminación. Para ello se requiere una fuente radiante constituida por un haz de electrones a gran velocidad.

5.2.3. Métodos microbiológicos (15)

- Recuento del número de unidades formadoras de colonias

El fin de esta técnica es la identificación y

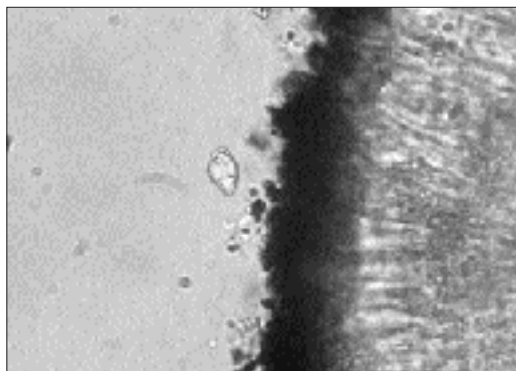
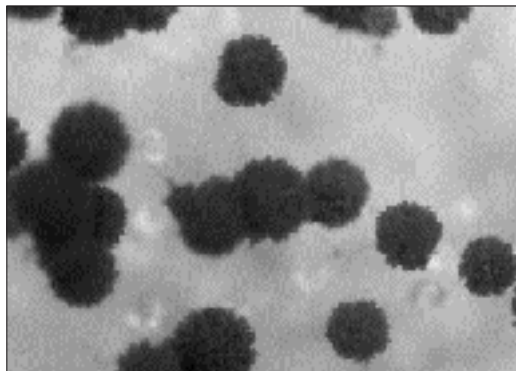


Fig. 7. Hongo (*Aspergillus niger*) observado al estereomicroscopio: conidióforos, 50X

Fig. 8. Líquen (*Caloplaca* sp.) observado al microscopio óptico: corte transversal de apotecio + espora polarilocular, 500X

cuantificación de la microflora que se desarrolla sobre la piedra, siendo, al menos en un primer término, una determinación de poblaciones caracterizadas por sus funciones bioquímicas, en lugar de caracterización de especies.

- Obtención de cultivos puros

Se puede proceder a la obtención posterior de cultivos puros, para lo cual se llevan a cabo varios pasos sobre medios de cultivo de enriquecimiento, utilizando como inóculo el tubo de mayor dilución y posterior siembra en tubo con agar.

- Técnica de impresión

Para poner de manifiesto la distribución de los microorganismos en la superficie de la piedra, se utiliza una técnica de impresión de placa con agar.

- Pruebas fisiológicas

Se llevan a cabo otros ensayos microbiológicos para evidenciar las características fisiológicas y bioquímicas de los diferentes microorganismos que crecen sobre la piedra.

- Recuentos bacterianos en el aire

La gran parte de los microorganismos presentes en sustratos pétreos provienen directamente del aire que les circunda, sobre todo aquellos con una alta producción y dispersión de esporas. Se llevan a cabo análisis de carga microbiana del aire.

5.3. Técnicas de análisis según el tipo de organismo

El objetivo principal de los estudios de laboratorio es el de identificar los agentes responsables del biodeterioro de una obra de interés histórico-artístico para determinar posteriormente el método de intervención más idóneo para su control.

5.3.1. Análisis microbiológico

Junto a la identificación de los organismos que están presentes sobre un sustrato (análisis cualitativo) es necesario realizar, cuando sea posible, los análisis cuantitativos. No es suficiente saber si un microorganismo está presente o no, sino también en qué cantidad está para determinar si juega un papel importante en el proceso del biodeterioro.

a) Toma de muestras

La toma de muestra para los análisis de laboratorio debe ser efectuada con distintas metodologías dependiendo de la naturaleza del biodeteriígeno: polvo superficial, costra, escamas, pátina o película.

Las muestras pueden ser tomadas con instrumentos tales como bisturíes, espátulas e hisopos, previamente esterilizados, y colocadas en recipientes (placas de Petri o probetas) también estériles. Cuando no es posible realizar inmediatamente los análisis, las muestras recogidas han de conservarse en un frigorífico a +4° C (temperatura que bloquea la reproducción microbica sin que llegue a producirse la muerte).

b) Microscopía

Las muestras son observadas al estereomicroscopio y al microscopio óptico para identificar el grupo sistemático de los agentes biodeteriogenos y tener, por tanto, alguna indicación sobre cómo realizar los posteriores análisis. También las observaciones al microscopio electrónico pueden ser de utilidad.

c) Métodos microbiológicos

Para la identificación de los microorganismos es indispensable realizar los cultivos pertinentes. Bacterias, actinomicetos, algas y hongos pueden ser cultivados sobre varios sustratos o medios de cultivo. Estos medios pueden ser líquidos o solidificados con agar, y poseen diferentes composiciones que contienen todas las sustancias nutritivas indispensables y favorables para el crecimiento de los microorganismos en estudio. Puede ocurrir que durante la preparación de los cultivos y de aislamiento de cultivos puros del microorganismo que debe ser identificado, se produzca una contaminación. Por lo tanto es necesario esterilizar el medio de cultivo antes de usarlo y continuar toda la operación en asepsia. La esterilización del medio de cultivo se realiza normalmente en autoclave a 1 atm y 120° C durante 15 ó 20 minutos.

d) Microscopía

La colonia microbiana que se ha desarrollado en el cultivo será posteriormente estudiada al microscopio óptico y al microscopio electrónico de barrido para una completa identificación.

5.3.2. Análisis botánico

Los líquenes, musgos, hepáticas y plantas superiores, no requieren técnicas de cultivo para su identificación.

a) Toma de muestra

La toma de muestra se lleva a cabo en aquellos lugares donde es evidente la alteración del sustrato o en zonas próximas. La forma de tomar la muestra depende del tipo de biodeteriígeno, alteración y estructura de la obra (escultura, muro, relieve...). La muestras se toman rascando o haciendo palanca mediante un escalpelo o espátula y, en el caso de plantas superiores, con una piqueta.

b) Microscopía

La identificación de organismos puede ser realizada en el campo o en el laboratorio tras la toma de muestras, mediante observación al estereomicroscopio y/o al microscopio óptico. Normalmente se examinan el talo y las estructuras reproductoras de líquenes y briofitos, mientras que para las plantas superiores se estudian los distintos elementos del cormo como hojas, flores y frutos.

c) Estudio cualitativo (florístico)

En este caso se efectúa solamente un listado de las especies presentes en un área determinada, con consideraciones de tipo ecológico.

d) Estudio cuali-cuantitativo (fitosociológico)

En este estudio se examinan datos ambientales (de la estación y del sustrato) y datos de la vegetación que incluyen la composición florística.

ca, la cobertura y las asociaciones de las especies presentes. La interpretación de las interrelaciones entre los organismos y el ambiente permite al analista definir el significado ecológico de las distintas asociaciones. Por último, debe tenerse en cuenta la relación entre la vegetación y el sustrato, y la naturaleza de los mecanismos de deterioro.

6.3.3. Análisis entomológico

Los insectos son el grupo de organismos vivos más diverso, por encima de otros como los hongos o las bacterias.

a) Toma de muestra

La toma de muestra se realiza sobre el material afectado. Debe recogerse tanto el material dañado como los restos de los insectos atacantes.

b) Microscopía

Para la identificación de los insectos causantes del deterioro de soportes orgánicos, se emplea el estereomicroscopio (lupa binocular), sobre todo para diferenciar especies muy parecidas mediante el examen de diversas estructuras que no son visibles a simple vista. Para ello es suficiente un instrumental sencillo: pinzas y agujas enmangadas, unos pocillos y potasa.

c) Reconstrucción del ciclo biológico y valoración de daños

Generalmente la reconstrucción del ciclo biológico se realiza en función de datos bibliográficos, a los que se añaden observaciones previas.

La valoración del ataque se realiza en función de la extensión del daño producido sobre el material atacado, y es necesario para establecer la intensidad del tratamiento desinsectante a seguir.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLSOPP, D. & K.J. SEAL (1986). Introduction to biodeterioration. Edward Arnold, London.
- TIANO, P. (1986). Problemi biologici nella conservazione del materiale lapideo esposto. La Prefabbricazione anno 22, Num. 4, 261-272.
- GARCÍA MURILLO, SUSANA (1995). Estudio de los procesos de bioalteración de la piedra en la catedral de Pamplona. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. Pamplona.
- CANEVA, G., M. P. NUGARI Y O. SALVADORI (1994). La biologia nel Restauro. Nardini, Firenze.
- SAIZ JIMÉNEZ, C. (1982). Causas del deterioro de los murales de Vázquez Díaz, Monasterio de Santa María de la Rábida, Huelva. Mundo Científico, 18: 1007- 1011.
- CASAS SICART, C.; SAIZ JIMÉNEZ, C. (1982). Los briofitos de la Catedral de Sevilla Collectanea Botanica, Vol. 13 (1), 163-175.
- ROWE, J. G., A. APARICIO & C. SAIZ JIMÉNEZ (1991). Weeds settling in spanish cathedrals (Salamanca, Seville and Toledo), in N. S. BAER, C. SABBIONI & A. I. SORS (eds.). Science, Technology and European Cultural Heritage. Bologna.
- ARIÑO, X, J. J. ORTEGA-CALVO, A. GÓMEZ-BOLEA & C. SÁIZ-JIMÉNEZ (1995). Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudia (Cádiz, Spain): biodeterioration vs. bioprotection. The Science of the Total Environment, 167: 353-363.
- 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
- GARCÍA-ROWE, J.; SAIZ-JIMÉNEZ, C. (1991). Lichens an bryophytes as agents of deterioration of building material in spanish Cathedrals. International Biodeterioration: Vol. 28, 151-163.
- ICR-CNR (1985). Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di indagine visiva. Normal 19/85.
- SAMEÑO PUERTO, M.; VILLEGAS SÁNCHEZ, R.; GARCÍA ROWE, J. (1996). Inventario de la Vegetación y Estudio de la Interferencia Biocida con los Materiales Pétreos del Yacimiento del Cerro de la Plaza de Armas de Puente Tablas (Jaén). Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, P. 67-74, Núm. 14.
- MARTÍN, A. (1990). Bioalteración de la piedra. Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico.
- ALCALDE MORENO, M.; MARTÍN PÉREZ, A. (1996). Indicadores de alteración de los materiales pétreos. Propuesta de una terminología. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. P. 68, Núm. 15.
- GARCÍA, S. Y A. MARTÍN (1996). Metodología para la evaluación del estado de conservación de obras monumentales en piedra en relación a fenómenos de bioalteración. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. P. 38, Núm. 16.
- CANEVA, G., NUGARI M.P.; SALVADORI, O. (1996). Il controllo del degrado biologico. Nardini, Firenze.
- 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.
- 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.
- 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