

ANÁLISIS DEL DETERIORO EN LOS MATERIALES PÉTREOS DE EDIFICACIÓN

ANALYSIS OF STONE MATERIAL DAMAGES IN BUILDINGS

Fco. Javier Alonso, Rosa M^a Esbert, Jorge Ordaz y Patricia Vázquez

Resumen

Para el correcto diagnóstico de las lesiones de la piedra en edificios o monumentos es conveniente tener en cuenta todos los aspectos implicados en su deterioro: desde su extracción en cantera hasta su evolución en el edificio, además de examinar el estado de alteración presente. En este análisis se separan los efectos observados, conocidos como daños o lesiones, de las causas a las que se atribuyen. Entre estas causas se diferencian los factores que pueden intervenir en el deterioro y los procesos desarrollados.

Se examinan tres tipos de factores: propios del material (composición, textura y espacios vacíos), derivados del clima y de la contaminación ambiental (agua, contaminantes, sales solubles y organismos) y constructivos o propios del edificio (manipulación de la piedra, puesta en obra y disposición en la fábrica). La acción generada por esos factores sobre los materiales son los distintos procesos de alteración, que por su carácter pueden ser físicos, químicos o biológicos. El diagnóstico de lesiones comporta la determinación del origen de los daños a partir de las lesiones observadas, con el fin prevenir dichos daños y reparar las lesiones. En el presente artículo se exponen, de manera sintética, los aspectos relacionados con las causas que producen las lesiones, poniendo especial énfasis en el análisis global de la alteración.

Summary

In order to carry out a correct diagnosis of the stone damage in buildings or monuments all aspects implied in the deterioration should be considered: that is, from the extraction at the stone quarry up until the material evolution on the building, as well as examining the present state of alteration. Here in this analysis, the effects observed --called damages or injuries-- are separated from the causes which produce them. Among these causes, two factors can be distinguished: the factors intervening in the damage and the processes developed.

Three types of factors are studied: the ones of the material itself (composition, texture and voids), those factors derived from the climate and environmental pollution (water, polluters, soluble salts and organisms) and construction factors or those from the building itself (stone handling, placing and laying of stone ashlar). The actions produced by these factors on the materials are the different alteration processes which can be chemical, physical or biological depending on their origin. The diagnosis of the damage includes the determination of the injuries and their repair. In the present article, aspects related to damage causes are briefly explained, emphasizing the global analysis of the alteration.

Fco. Javier Alonso Rodríguez is Titulary Professor in Petrology and Geochemistry. Rosa Esbert Alemany is Cathedratric in Petrology and Geochemistry. Jorge Ordaz Garagallo is Titulary Professor in Petrology and Geochemistry. Patricia Vázquez Menéndez is a Collegian on Training Research Staff. They are professors of the Department of Geology of the University of Oviedo that has a very long trajectory in research on rocky materials of several national monuments.

1. Piedras y rocas utilizadas en construcción

La piedra es un material tradicionalmente utilizado en construcción por sus propiedades: dureza, resistencia y durabilidad, a las que hay que sumar el valor estético. También se emplean otros materiales pétreos artificiales, más o menos similares, como el ladrillo y el hormigón; no obstante, la piedra natural sigue siendo utilizada y apreciada como signo de calidad, especialmente en edificaciones notables, concebidas para perdurar durante generaciones.

Los materiales pétreos naturales utilizados en construcción –tanto en épocas pasadas como hasta fechas recientes– se sitúan entre los más abundantes en cada zona, ya que son éstos los que ha tenido más a mano el hombre y los que normalmente presentan costes más bajos de explotación. Así, los sillares de piedra con los que se han levantado los edificios monumentales proceden del entorno de la edificación. Actualmente se utilizan cada vez más las rocas ornamentales, en forma de losas de revestimiento, y su difusión es mucho mayor.

Las piedras utilizadas en construcción son materiales rocosos, aunque es evidente que no todas las rocas presentes en la naturaleza son aptas para dicho fin. En concreto, las rocas utilizadas como piedras naturales deben ser materiales coherentes, obtenidos a partir de bloques de roca libres de grandes discontinuidades.

Las rocas son agregados de minerales, formados por procesos naturales, abundantes en la corteza terrestre; es decir, normalmente se presentan en grandes masas. Cuando las condiciones de explotación son favorables y pueden obtenerse bloques de una roca relativamente dura, coherente y que mantiene esas propiedades en el tiempo, se extrae la roca en canteras y, elaborada por el hombre en talleres, se utiliza en construcción.

Los diferentes tipos de rocas se establecen en función de sus dos características esenciales: los componentes minerales (mineralogía) y su modo de agregación (textura). Dichas características se conocen como “características petrográficas”, y dan lugar al aspecto distintivo que muestran los diferentes tipos rocosos y, por tanto, de piedras naturales.

Las características petrográficas de las rocas, y de los materiales pétreos en general, son debidas a los procesos ocurridos en su formación. Por ello, una buena forma de clasificar las rocas es a partir de criterios genéticos; en este sentido se distinguen tres tipos de rocas: ígneas (plutónicas, volcánicas), metamórficas y sedimentarias (Tabla 1). No obstante, desde el punto de vista aplicado –en relación con su comportamiento como materiales de construcción– son más útiles clasificaciones descriptivas, basadas en las propias características petrográficas. Así, en función de la mineralogía se utilizan básicamente dos tipos de rocas: silicatadas y carbonatadas, y otros dos de acuerdo con su textura: detríticas y cristalinas (Tabla 2). Las rocas detríticas también se conocen como rocas cementadas, considerando en este caso el cemento en sentido amplio, es decir, como fase de unión entre los granos.

Rocas ígneas	Rocas metamórficas	Rocas sedimentarias
Granito	Mármol	Caliza
Sienita	Pizarra	Arenisca
Gabro	Cuarcita	Dolomía
Andesita	Serpentinita	Travertino
Basalto	Gneis	Limolita
Pórfido	Esquisto	Conglomerado

Tabla 1. Tipos rocosos utilizados en construcción en relación con su origen.

Composición	Rocas silicatadas	Rocas carbonatadas
	Granito	Mármol
	Arenisca	Caliza
Textura / Porosidad	Detriticas / Porosas	Cristalinas / Fisuradas
	Arenisca	Granito
	Caliza	Mármol

Tabla 2. Principales tipos rocosos de acuerdo con sus características petrográficas.

Los espacios vacíos o –en su acepción genérica– la porosidad es una característica petrográfica fundamental en el comportamiento de las rocas, que está relacionada con su textura y en última instancia con su génesis. De acuerdo con las características de los espacios vacíos se consideran dos tipos de rocas: porosas y fisuradas. Las rocas porosas se distinguen por presentar abundantes espacios vacíos más o menos equidimensionales (poros) y las rocas fisuradas por espacios vacíos planares (fisuras). Las rocas porosas son propias de las texturas detriticas y las rocas fisuradas de las texturas cristalinas.

Otras características importantes de los materiales rocosos que intervienen en la valoración de la piedra natural son la heterogeneidad y la anisotropía. Así, son frecuentes diferencias entre distintos bloques de un mismo material, y a veces entre distintas muestras obtenidas de un mismo bloque, por ello las características de la piedra natural deben contemplarse dentro de un cierto margen de variación.

También es frecuente observar orientación en los bloques, que con frecuencia hace variar el aspecto de las distintas caras; la presencia de esos planos de anisotropía ha de tenerse en cuenta tanto a la hora de preparar el material como durante su puesta en obra, ya que puede cambiar de forma notable su comportamiento frente a la alteración.

2. Alteración, meteorización y alterabilidad.

Las piedras en los edificios –como las rocas en la naturaleza–, inmersas en un determinado ambiente durante cierto tiempo, tienden a alterarse, es decir, sufren cambios en su naturaleza, que pueden manifestarse en su aspecto externo (color, estado de agregación...) o en su comportamiento (dureza, resistencia...). En la naturaleza las rocas se meteorizan debido a la acción de los agentes atmosféricos, en los edificios las piedras se alteran por los mismos factores naturales, si bien en este caso también influyen otros factores de tipo constructivo (manipulación del material, puesta en obra, relación con morteros...). En ambos casos se desarrollan procesos similares que conducen a la degradación de sus propiedades físicas del material.

Por alteración de un material se entiende la modificación de sus características: de su composición o de sus propiedades, por exposición al ambiente. Se trata de un término que puede aplicarse a distintas escalas a los materiales (fábrica de piedra, sillar, componente mineral...). La meteorización es la alteración natural de los materiales rocosos por agentes atmosféricos, que conlleva procesos físicos de disgregación o químicos de descomposición; es un término que se aplica a las rocas en la naturaleza, a escala de macizo rocoso.

Normalmente la meteorización tiene lugar a largo plazo, durante periodos de tiempo geológico, y siempre supone degradación de las rocas: pérdida de compacidad y de coherencia. Por el contrario la alteración se considera que tiene lugar a corto plazo, a escala histórica, se refiere a la evolución del material desde un pasado reciente. En teoría la alteración de un material no implica su degradación; no obstante, cuando se aplica a los materiales de construcción se utiliza normalmente con ese significado de degradación o deterioro, es decir, el cambio es perjudicial para su conservación: respecto al mantenimiento de sus características y propiedades en el tiempo. El resultado de la alteración de los materiales rocosos puede verse como el paso de una roca sana, más o menos compacta y coherente –como las que normalmente se utilizan en construcción–, a una

roca alterada, menos coherente o de peor aspecto.

La alteración de los materiales rocosos es un proceso natural cuyo origen es el desequilibrio existente entre sus condiciones de formación y las actuales en el edificio. Las rocas se generan en la corteza terrestre a mayor o menor profundidad –a presión y temperatura más o menos elevadas– y en esas condiciones cristalizan, recrystalizan, se compactan o se cementan. En la superficie terrestre –a más baja presión y temperatura–, en contacto con los fluidos atmosféricos –aire y agua– y bajo la actividad de los organismos, las rocas se desestabilizan y se van transformando en busca de un nuevo equilibrio.

Debido a las distintas reacciones que pueden tener lugar entre el material sólido y los fluidos del ambiente, se desarrollan diferentes procesos que conducen a la disgregación mecánica y a la descomposición química del material. En la mayor parte de los casos el desarrollo de estos procesos es lento, gradual y progresivo. En los edificios, sobre todo en ambientes urbanos con atmósfera más o menos contaminada, la alteración de la piedra evoluciona más deprisa que en la naturaleza. En consecuencia, la alteración de la piedra es un proceso natural más o menos lento y continuo, y siempre irreversible, que puede retardarse con intervenciones de restauración y con el mantenimiento de los edificios, pero que no puede evitarse.

Ligada a la evolución de la alteración en el tiempo se establece el concepto de alterabilidad. La alterabilidad se define como la susceptibilidad o tendencia de un material a alterarse. Inversamente, el término durabilidad expresa la resistencia de un material a alterarse o, de otro modo, la capacidad de mantener en el tiempo sus características y propiedades. El diagnóstico de lesiones atiende fundamentalmente al estado de alteración que presenta la piedra en un momento dado –el presente– en la vida de un edificio. No obstante, a partir de esos datos de alteración, de su evolución en el pasado y, normalmente, con el apoyo de ensayos complementarios de envejecimiento artificial, es conveniente hacer

también consideraciones respecto a su futuro comportamiento.

3. Análisis de la alteración

Valorar la alteración de los materiales es un tema complejo, difícil de sistematizar y de cuantificar, debido a los numerosos aspectos implicados, concernientes a distintas categorías (formas, grados, procesos, agentes...) que, a su vez, presentan relaciones de dependencia entre sí. En consecuencia, el análisis de la alteración comienza por ordenar y definir esos aspectos.

En la alteración de los materiales –como en la meteorización de las rocas– cabe distinguir entre los *efectos* presentados, conocidos como daños, lesiones o formas de alteración, y las *causas* que los han generado. Dentro de las causas puede atenderse a los *factores*, variables o agentes que pueden intervenir en el deterioro; y a los *procesos* o mecanismos desarrollados. Los factores responden a por qué se alteran los materiales y los procesos a cómo se alteran. Las causas de la alteración no son observables, lo que vemos son sus efectos: el resultado de los procesos. Las causas se deben deducir de la interpretación de los hechos observados. El diagnóstico de lesiones consiste en hacer esa interpretación, es decir, determinar el origen de los daños a partir de las lesiones observadas, con el fin prevenir dichos daños y sanar las lesiones.

3.1. Factores y agentes de alteración.

Los factores presentes o las variables que pueden intervenir en la alteración de la piedra en los edificios, pueden incluirse en distintas categorías; unos son factores *internos* al material, es decir propios de la roca de la que procede la piedra, son los que permiten establecer su calidad. Otro género de factores –considerados *externos* al material– son las características del ambiente donde se encuentra inmersa la piedra, se conocen como agentes de alteración y determinan la agresividad del medio. Finalmente existe un tercer grupo que puede tener tanto peso como los anteriores, son los factores relacionados con la construcción (preparación de la piedra, puesta en obra,

situación en el edificio, relación con otros materiales...).

Factores relativos a la naturaleza del material

La variabilidad de materiales pétreos es relativamente grande y también lo es su comportamiento frente a la alteración; si bien en distinto grado, todos los materiales se alteran con el paso del tiempo.

Las características petrográficas: composición, textura y porosidad –que permiten identificar el tipo de roca y que condicionan sus propiedades– son los parámetros que en última instancia influyen en su comportamiento frente a la alteración (Tabla 3). Ejemplos de esta influencia pueden verse en paramentos contruuidos con distintos tipos de piedra, cuando sillares próximos –y por tanto sometidos a las mismas condiciones– presentan deterioros diferentes (Figura 1); también puede observarse cómo dentro de un mismo tipo de piedra pequeñas diferencias petrográficas entre sillares –no siempre fáciles de detectar– pueden conducir a comportamientos desiguales frente a la alteración (Figura 2).

Macroscópicas	Composicion*	Microscópicas
Aspecto general	Granos / Cristales	Tipo de textura
Color	Fase de unión	Tamaño de grano / cristal
Compacidad	- matriz	Forma de grano / cristal
Coherencia	- cemento	Fase de unión / Bordes de cristal
Orientación	Otros componentes	Tamaño y forma de vacíos
Homogeneidad	Espacios vacíos	Orientación y distribución
Estructuras	- poros	Discontinuidades
Alteración	- fisuras	Alteración

* Naturaleza y porcentaje de los componentes

Tabla 3. Características petrográficas relacionadas con la calidad de la piedra natural.



Figura 1. Acusadas diferencias de alteración entre dos tipos de piedra (caliza amarilla y dolomía blanca) situadas en ambiente similar, en la Catedral de Oviedo.



Figura 2. Sillares aparentemente del mismo tipo de piedra (dolomía blanca) y expuestos al mismo ambiente con notables diferencias de alteración, en la Catedral de Palma de Mallorca.

Respecto a la composición de la piedra, importa la mineralogía y la composición química. Así, en general, las rocas silicatadas (granitos y areniscas) muestran mejor comportamiento que las carbonatadas (mármoles y calizas); en particular destaca la mayor solubilidad de estas últimas. Determinados minerales minoritarios en la roca (arcillas, minerales de hierro...) pueden influir negativamente en su resistencia a la alteración, debido a distintas causas: disolución, hidratación, hinchamiento, cambio de color... El estudio de la composición, además de atender al tipo de mineral presente, con frecuencia se debe contemplar también su grado de alteración (en feldespatos, micas...).

En cuanto a la textura, las rocas cristalinas (granitos y mármoles) suelen mostrar mejor comportamiento que las detríticas (areniscas y calizas). En las texturas detríticas la presencia de matriz arcillosa –en vez de cemento– como fase de unión de los granos, es un factor negativo. También influye negativamente la existencia de anisotropías (estratificación, laminación...), condicionando además la forma de alterarse del material (acanaladuras, exfoliación...). Otros parámetros texturales a considerar son el tamaño, la forma y las características de los bordes de los granos –en las rocas detríticas– o de los cristales –en las cristalinas–, dada su relación con la coherencia del material.

Los espacios vacíos –íntimamente ligados a la textura– constituyen sin duda el factor petrográfico más importante frente a la alteración, ya que contienen fluidos y en el contacto sólido-fluido tienen lugar las reacciones de alteración. Normalmente las rocas porosas (textura clástica) son más alterables que las fisuradas (textura cristalina); en concreto son las características de la porosidad las que justifican este comportamiento. En las rocas porosas influye en primer lugar el volumen de poros abiertos o accesibles al agua, siendo en general más alterables las rocas más porosas; después importa el tamaño de los poros, presentando mayor alterabilidad las rocas de menor tamaño de poro y, por tanto, con mayor superficie

específica. En las rocas cristalinas al aumentar la fisuración –el tamaño y la densidad de las fisuras– disminuye la durabilidad.

Factores relativos a las condiciones del ambiente. La influencia del ambiente en la alteración de la piedra puede contemplarse a distintas escalas: en diferentes ámbitos geográficos –con diferencias climáticas–, o en distintas partes de un edificio, y por tanto con el mismo clima pero con variaciones en el microclima. En ambos casos puede observarse cómo un mismo material sometido a distintas condiciones ambientales evoluciona de forma diferente y muestra distinta alteración.

Los factores ambientales que actúan sobre los materiales son diversos, y pueden agruparse según su origen en propios del clima y derivados de la contaminación. El *clima* conlleva variables muy importantes en el desarrollo de los procesos de alteración (temperatura, precipitación, viento...), importando tanto sus valores medios como los extremos y, sobre todo, la frecuencia y velocidad de sus variaciones. La *contaminación* también agrupa otras variables (diversos tipos de gases y de partículas –aerosoles– en la atmósfera y de sales en los suelos), procedentes de distintas fuentes (naturales y antrópicas). Todas estas variables interactúan entre sí y determinan las características de la atmósfera que envuelve la piedra en los edificios. Además, todas ellas, condicionan el desarrollo de otra fuente notable de alteración: la actividad de los *organismos*. Atendiendo a su actuación, también se denominan agentes de alteración, siendo los principales: el agua, los contaminantes, las sales solubles y los organismos.

El agua es el agente más importante de alteración, presente en todos los procesos: interviene en los procesos químicos, ya que siempre son reacciones en medio acuoso, y en los procesos físicos más importantes (acción del hielo, de las sales solubles...), (Figura 3). Los materiales porosos siempre presentan un cierto contenido en agua –o de humedad– que tiende a estar en equilibrio con el contenido en agua o en vapor de agua en el ambiente; de acuerdo poroso de la roca, el agua puede presentarse en fase líquida, sólida o de vapor, lo que conlleva

cambios de fase. En cuanto a la acción del agua en los materiales, importan sobre todo los cambios en su contenido (ciclos humedad-sequedad) y los cambios de fase (ciclos hielo-deshielo).

Los contaminantes atmosféricos se presentan esencialmente en las áreas urbanas e industriales, y también en las zonas costeras. En ambientes urbanos e industriales los *contaminantes* que más afectan a la piedra son: los gases –entre los que destacan el dióxido de azufre (SO_2), los compuestos de nitrógeno (NO_x , NH_4), los óxidos de carbono (CO , CO_2), los cloruros (HCl) y los compuestos orgánicos volátiles (COV)– y las partículas –variables en composición, tamaño y origen–. En dichos ambientes los contaminantes proceden principalmente de los procesos de combustión (centrales térmicas, calderas domésticas, automóviles, industria...). Las zonas costeras presentan otro tipo de contaminantes naturales: los *aerosoles salinos*. La presencia en la atmósfera de estos contaminantes, junto a elevados contenidos en vapor de agua, genera contaminantes secundarios, como la lluvia ácida.

El agua de lluvia es ligeramente ácida (pH: 5,6) debido a que está en equilibrio con el contenido en CO_2 que presenta la atmósfera.

Esta agua en contacto con la piedra va disolviéndola a la vez que se neutraliza; en consecuencia, las aguas de escorrentía presentan más o menos sales, y el contenido en sales se incrementa en las aguas freáticas. Las sales contenidas en el agua –sales solubles– circulan por piedra y, de acuerdo con las condiciones del ambiente, precipitan y se disuelven con mayor o menor facilidad. Esta alternancia de estado, junto al hecho de cristalizar con distintos grados de hidratación, hace que sean importantes agentes de alteración.

Los materiales de construcción pueden presentar distintos tipos de sales solubles: sulfatos, nitratos, cloruros y carbonatos. Los *sulfatos* son las sales más abundantes y también las más importantes como agentes de alteración; en los edificios pueden proceder de la contaminación ambiental o de los morteros. Los *cloruros* son sales muy higroscópicas, relacionadas normalmente con aerosoles marinos, excepcionalmente pueden proceder del suelo (en terrenos evaporíticos) o ser aportados por el hombre en relación con las heladas. Los *nitratos* se atribuyen a la actividad de los organismos, principalmente proceden de la descomposición de la materia orgánica, cuya fuente pueden ser excrementos en aguas de escorrentía o en aguas freáticas abonos (zona agrícola), aguas fecales (zona urbana). Los *carbonatos* están relacionados con sustratos calcáreos y, en general, son menos abundantes y menos nocivos que otras sales.



Figura 3. Daños generados por la humedad en el teatro Victoria Eugenia (San Sebastián).



Figura 4. Desarrollo de vegetación (musgos y plantas superiores) en la iglesia de Santa María de Briviesca (Burgos).

Los organismos pueden colonizar todo tipo de sustratos y ser notables agentes de alteración; de acuerdo con sus características y su acción sobre la piedra se distinguen: microorganismos, algas verdes, líquenes, musgos, plantas superiores y animales. Los *microorganismos* y las *bacterias* –aunque difíciles de detectar– están presentes en todos los sustratos y en todos los ambientes, y su actividad altera y prepara los materiales para ser colonizados por otros más evolucionados. Las *algas verdes* –el verdín de los edificios– son propias de los materiales calizos y de ambientes húmedos, donde forman sustratos ricos en materia orgánica, favorables a la retención de polvo y humedad. Los *líquenes* se fijan sobre superficies rugosas en ambientes limpios (no contaminados), iluminados y bien ventilados, y cabe destacar respecto a la alteración su lento desarrollo. Los *musgos* crecen en zonas horizontales sobre sustratos porosos –ricos en depósitos superficiales–, en ambientes húmedos y umbríos, donde retienen la humedad y empieza a formarse suelo (Figura 4). Las plantas superiores suelen aparecer en grietas y fisuras, o en las juntas sobre los morteros, y también colaboran a convertir la roca en un suelo. Algunos animales son notables agentes de alteración: ciertos insectos como las avispas por sus nidos, determinadas aves como las palomas y las cigüeñas por sus excrementos...



Figura 5. Sillar colocado con la estratificación vertical, mostrando tendencia a exfoliarse, en el Ayuntamiento de Comillas (Santander).

Factores relativos al edificio. Además de las características del material y del ambiente, existen otra serie de factores que afectan a la alteración de la piedra en los edificios, derivados en parte de su manipulación previa y de su puesta en obra y, por otra parte, de la posición que ocupa en la fábrica.

En relación con la su manipulación debe señalarse en primer lugar que el paso de una roca –en la naturaleza– a una piedra de construcción implica su extracción en cantera, y el método de extracción (artesanal, hilo diamantado, explosivos...) puede afectar a su comportamiento. En su elaboración, de acuerdo con la textura y porosidad de la roca, el material pueden presentar distintos acabados superficiales (fractura, corte de sierra, abujardado, pulido...) que hacen que sea más o menos susceptible a la alteración. También deben tenerse en cuenta sus condiciones de almacenamiento, evitando humedades o aportar contaminantes. Otros factores que pueden influir en la puesta en obra son: el tamaño de los elementos, dada su relación con la longitud de las juntas; su disposición respecto a la estratificación u otra anisotropía, para prevenir exfoliaciones y descamaciones (Figura 5); la naturaleza de los morteros y la de otros materiales de construcción (metales...) con los que está en contacto, ya que pueden aportar productos nocivos (sales solubles, óxidos de hierro...), (Figura 6).



Figura 6. Eflorescencias sobre ladrillos, aparecidas tras un periodo lluvioso, en el Palau de la Música (Barcelona).



Figura 7. Diferencias en la alteración de la piedra (caliza del Páramo) con la altura, en la iglesia de San Pablo (Valladolid).

La disposición en la fábrica también condiciona la alteración de la piedra. Así, la orientación influye en la insolación y en la retención de humedad; la disposición en altura, así en las zonas bajas puede penetrar el agua por capilaridad (Figura 7); la inclinación de la superficie respecto de la vertical, ya que cuanto más horizontal más fácil es el depósito de partículas y el desarrollo de vegetación; la exposición a la lluvia, puesto que el agua de escorrentía mantiene la superficie limpia y, por el contrario, la retención de humedad fija la suciedad; los elementos singulares (zonas labradas, cornisas, impostas, dinteles...), pues aumentan la superficie expuesta y modifican la circulación del agua (Figura 8); las zonas de concentración de tensiones, donde se generan fisuras que favorecen la actuación de los agentes de alteración.

3.2. Procesos.

La alteración de la piedra es consecuencia de los distintos procesos o mecanismos desarrollados en su seno por la acción de los agentes ambientales. Procesos y mecanismos son términos que tienen el mismo significado: ambos se refieren al conjunto de las fases sucesivas que presenta un fenómeno, en este caso la alteración.

Esencialmente todos los procesos se pueden incluir dentro de dos tipos: físicos y químicos; en los primeros los cambios producidos en los



Figura 8. Influencia del diseño de la fachada en el deterioro de la piedra (caliza de Hontoria), en la fachada de Santa María de la Catedral de Burgos.

materiales afectan sólo a su estado de agregación y no hay cambio sustancial en su naturaleza, mientras que los segundos producen cambios en su composición. Son procesos físicos característicos la disgregación y la fragmentación, mientras que términos como descomposición y disolución responden a típicos procesos químicos.

También suelen citarse como origen de los daños procesos o acciones de tipo mecánico y biológico. En los edificios, las acciones mecánicas se refieren a un tipo concreto de procesos físicos que sufren los materiales cuando forman parte de estructuras constructivas, consecuencia de las cargas que tienen que soportar o por problemas de subsidencia. Los procesos biológicos se refieren las acciones generadas por organismos, y en última instancia, según como afecten a la naturaleza de los materiales, pueden tener carácter físico o químico.

Los procesos físicos son consecuencia de fuerzas externas (presiones) que generan esfuerzos internos (tensiones) en el seno del material. Dichas fuerzas pueden ser naturales (procesos físicos en sentido estricto), como la presiones de cristalización o de hidratación, o ser debidos a una mala distribución de cargas en el edificio (procesos físico-mecánicos). En ambos casos se generan expansiones y contracciones que producen cambios de volumen y, finalmente, la desintegración o rotura del material. Dependiendo de las características del material –especialmente de

su textura— y del agente que genera las tensiones, los daños pueden ser de distinta clase: deformación, disgregación o fragmentación.

Los procesos químicos son debidos a distintas reacciones del material con los fluidos del ambiente: hidratación, hidrólisis, disolución, oxidación, carbonatación, sulfatación, intercambio iónico. Dependiendo del tipo de material —esencialmente de su composición— se presenta un tipo de reacción u otro. Así, los feldespatos se descomponen por hidrólisis y pasan a minerales arcillosos, los carbonatos mayoritariamente se disuelven, los minerales de hierro tienden a oxidarse, muchas sales solubles se hidratan y las arcillas se transforman por cambios iónicos. Todas estas reacciones tienen lugar en medio acuoso y en ellas influye la composición y temperatura del agua, y la superficie específica del material, sobre la que actúan todos estos procesos. Entre ambos procesos se produce una sinergia, ya que los físicos incrementan la superficie específica y los químicos debilitan y ablandan la roca.

Los procesos biológicos varían dependiendo del tipo de organismo que los genere. Los microorganismos y las bacterias utilizan materiales inorgánicos como nutrientes, los metabolizan y los alteran; pueden participar en la formación de yeso, oxidar los compuestos de hierro y liberar ácidos o álcalis. Las algas verdes, al retener la humedad y el polvo, favorecen los procesos químicos. Los líquenes actúan de forma física (contracción y expansión del talo) y química (liberación de ácidos liquénicos y oxalatos). La acción de los musgos es esencialmente química, resultado de la acidez de raíces y exudados. Las plantas superiores tienen acciones físicas (presión de las raíces) y químicas (liberación de ácidos). Igualmente los animales pueden generar daños físicos por su acción directa o químicos por reacciones a partir de sus excrementos. Finalmente la acción del hombre cada vez es mayor —sobre todo en edificios monumentales— debido a veces al creciente uso (desgastes, golpes...), a conflictos bélicos (impactos, incendios...), a intervenciones incorrectas (tratamientos desacertados...) o,

en este caso de deterioro de edificios, también puede ser por omisión: falta de mantenimiento.

4. Conclusión.

La consecuencia de todos estos procesos es un cambio en el aspecto y en la naturaleza de los materiales y, por tanto, en sus propiedades y comportamientos. El grado de modificación que sufren los materiales varía —de forma más o menos gradual— desde la superficie expuesta hacia su interior. El resultado son los daños o lesiones puestos de manifiesto en las superficies alteradas y, como es sabido, el estado de los materiales en los edificios es importante por su función estructural y por su percepción estética.

BIBLIOGRAFÍA

- Amoroso, G.G. y Fassina, V. (1983). Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Elsevier, Amsterdam, 453 p.
- Ashurst, J y Dimes, F.G. [Ed.] (1990). Conservation of Building & Decorative Stone. Part 1 y 2. Butterworth-Heinemann, 193 + 254 p.
- Camuffo, D. (1998). Microclimate for cultural heritage. Elsevier, Ámsterdam, 415 p.
- Caneva, G.; Nugari, M.P. y Salvadori, O. (2000). La biología en la restauración. NEREA, Junta de Andalucía, IAPH, 274 p.
- Esbert, R.M.; Ordaz, J.; Alonso, F.J.; Montoto, M.; González, T. y Álvarez de Buergo, M. (1997). Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Barcelona, 126 p.
- Ferretti, M. (1993). Scientific Investigations of Works of Art. ICCROM, Roma, 81 p. Matteini, M. y Moles, A. (2001). Ciencia y restauración. Método de investigación. NEREA, Junta de Andalucía, IAPH, 304 p.
- Pavía, S. y Bolton, J. (2000). Stone, brick and mortar: historical use, decay and conservation of building material in Ireland. Wordwell, 296 p.
- Schaffer, R.J. (1932). The weathering of natural building stones. Publ. His Majesty's Stationery Office, London, 149 p.
- Torraca, G. (1986). Materiaux de Construction poreux. ICCROM, Roma, 148 p.
- Winkler, E.M. (1997). Stone in architecture. Properties. Durability. Springer Verlag, Berlin, 313 p.