INTERACCIÓN PIEDRA-AMBIENTE, 1.ª PARTE: FORMAS DE ALTERACIÓN DESARROLLADAS SOBRE LA PIEDRA DE LA CATEDRAL DE BURGOS

(STONE-ENVIRONMENT INTERACTION, FIRST PART: ALTERATION FORMS DEVELOPED ON THE STONE OF BURGOS CATHEDRAL)

F. J. Alonso, F. Díaz-Pache y R. M.ª Esbert
Departamento de Geología (Petrología). Universidad de Oviedo
ESPAÑA

Fecha de recepción: 5 - IX - 94
650-1

RESUMEN

Se realiza la descripción e inventario de las principales formas de alteración desarrolladas sobre la caliza de Hontoria, empleada en la construcción de la Catedral de Burgos, aportando una exhaustiva información gráfica de las mismas, así como de su localización en las distintas partes del edificio.

La cartografía de las lesiones, realizada sobre el alzado de las fachadas, ha sido almacenada en soporte informático. A partir de estas imágenes digitales se han establecido relaciones entre distintos aspectos alterológicos tales como: porcentaje que representa cada tipo de lesión en el total de una superficie, formas de alteración más frecuentes en los distintos paramentos, etc.

Las diferentes formas de alteración se agrupan en zonas que, por sus características cromáticas, son fáciles de localizar en el monumento, sin necesidad de realizar una observación cercana y minuciosa.

La finalidad de este procedimiento es facilitar a arquitectos y restauradores datos precisos y útiles para las intervenciones de conservación.

SUMMARY

The description and inventory of the main alteration forms developed on Hontoria limestone, used in Burgos Cathedral, are carried out in this article. An exhaustive graphic information of these forms, as well as their location in the different parts of the building, are provided.

The mapping of defects, made on façade upright projections, has been stored in a computer and digitalized. Relationships among different alterological aspects have been established from these digital images: percentages representing each type of defect on the total surface, types of deterioration more frequent in the walls, etc.

The forms of deterioration are grouped in zones that, owing to their chromatic characteristics, are easy to locate in the monument, even without a nearby and detailed inspection.

The aim of this procedure is to facilitate to architects and restorators useful and precise data for conservation interventions.

1. Introducción

La incidencia del ambiente en el deterioro de los materiales pétreos de edificación, se traduce en el desarrollo de lesiones de diversa índole sobre los mismos. Su correcta definición, el análisis del material alterado, así como la ubicación de dichas lesiones en cada parte del edificio, proporcionan muchas de las claves para interpretar los mecanismos de alteración que han tenido lugar a lo largo

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

del tiempo, permitiendo identificar la naturaleza de los diversos procesos alterológicos: físicos, químicos biológicos, antrópicos, etc.

Por otra parte, la definición e inventario de lesiones resulta imprescindible, tanto para plantear las diferentes etapas que deberán acometerse en las intervenciones de conservación de la piedra, como para seleccionar los métodos y productos a aplicar en cada una de ellas.

El presente estudio contempla las principales formas de alteración desarrolladas en los paramentos exteriores de la Catedral de Burgos, incluido el cimborrio. Todos ellos están labrados con un mismo tipo de piedra: la caliza de Hontoria (1). No obstante, en algunas zonas de la parte baja se observan sillares de caliza del Páramo (del Mioceno de la meseta), que con toda probabilidad son de sustitución; dado su escaso volumen en el conjunto de la Catedral, no se han tenido en consideración.

En la génesis de las formas de alteración intervienen, además de las características de la piedra y de las del ambiente, otras relacionadas con la fábrica de la Catedral, es decir con el lugar de emplazamiento (altura, orientación, disposición horizontal o vertical) de cada uno de los paramentos considerados.

En general, en cuanto a la distribución de las formas de alteración en la Catedral, puede afirmarse que existen zonas más claras (blancas o grises), en las que la piedra mantiene un color próximo al original y está relativamente bien conservada, y otras más oscuras (negras o pardas), donde la piedra está mucho más deteriorada.

Después de inventariadas las formas de alteración, resulta muy conveniente cartografiarlas sobre alzados, facilitando de esta manera la labor de los restauradores, en sus intervenciones de conservación de la piedra. Los alzados son registrados posteriormente en soporte informático —mediante proceso digital de imágenes—, y este método de trabajo permite implementar otras informaciones; por ejemplo: las referidas a las etapas de conservación, a los métodos a seguir en ellas, a los productos de tratamiento a aplicar, etc. En uno de los apartados de este trabajo —a modo de ejemplo metodológico—, se muestra la cartografía informatizada de las lesiones presentes en una parte del cimborrio de la Catedral de Burgos y algunos diagramas deducidos de la misma.

En una segunda parte de este trabajo, se presentarán los datos climáticos y las características del ambiente, en el entorno de la Catedral de Burgos, resaltando su incidencia en los procesos de alteración que han generado las formas aquí descritas. De acuerdo con dichos resultados, podrán establecerse criterios generales de intervención para la conservación de la piedra.

2. Formas de alteración

La definición y descripción de las formas de alteración, desarrolladas mayoritariamente sobre los paramentos externos de la Catedral de Burgos, se ha realizado siguiendo el Glosario de Ordaz y Esbert (2). Las principales formas inventariadas han sido las siguientes:

- **Pátinas:** variaciones en el aspecto superficial de la piedra, consecuencia de su exposición a la intemperie durante largos períodos de tiempo. Se manifiestan por cambios en la coloración de su superficie. Se trata de modificaciones superficiales que no implican necesariamente deterioro del sustrato pétreo.

Las pátinas pueden ser naturales o artificiales, siendo en este último caso el resultado de la evolución de pinturas o tratamientos aplicados sobre la piedra en tiempos pasados.

En la Catedral de Burgos se pueden diferenciar diversas clases de pátinas: cromáticas, biogénicas y de decoloración, principalmente.

Pátinas cromáticas: se distinguen dos clases bien diferenciadas, unas generalizadas por todo el edificio y otras ocasionales. Entre las primeras se distinguen tres tipos: una ocre, fruto posiblemente de un acabado superficial antiguo dado por la mano del hombre; otra gris, debida a la adherencia de contaminantes en zonas sin incidencia directa de la lluvia pero con cierta humedad; y una tercera negra, que puede considerarse como el primer estadio en el proceso de formación de las costras negras, si bien en este caso aún no se observa deterioro químico del sustrato (Fig. 1).

Las pátinas cromáticas ocasionales incluyen aquellas que —a pesar de no presentarse con excesiva frecuencia— pueden ser observadas con facilidad, debido a lo característico de sus coloraciones. Entre ellas destacan las pátinas ocres o rojizas, formadas por óxidos de hierro, consecuencia de la alteración de las rejas que protegen las vidrieras. También

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Fig. 1. Aspecto de las distintas pátinas presentes en el cimborrio (orientación NNE) de la Catedral de Burgos, identificables por sus coloraciones: negra, ocre y gris. a) Zona con predominio de pátina gris, en la parte más resguardada aparece la pátina ocre y sobreimpresa la negra. b) Detalle de las pátinas ocre y negra. En todos los casos el grado de deterioro del sustrato pétreo es mínimo.

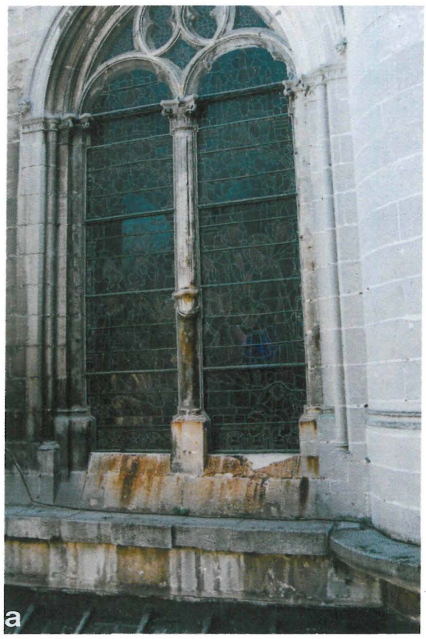


Fig. 3. Parte posterior de uno de los ángeles que rodean el cimborrio. Es notoria la presencia de líquenes formando pátinas, destacando sus colores amarillos y verdes.

Fig. 2. Pátinas cromáticas ocasionales: a) Pátina ocre de herrumbre localizada en el exterior de una de las vidrieras de la capilla de Santa Ana. b) Pátina verde por migración de cobre de la toma de tierra de un pararrayos, en el cimborrio (orientación NNE).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

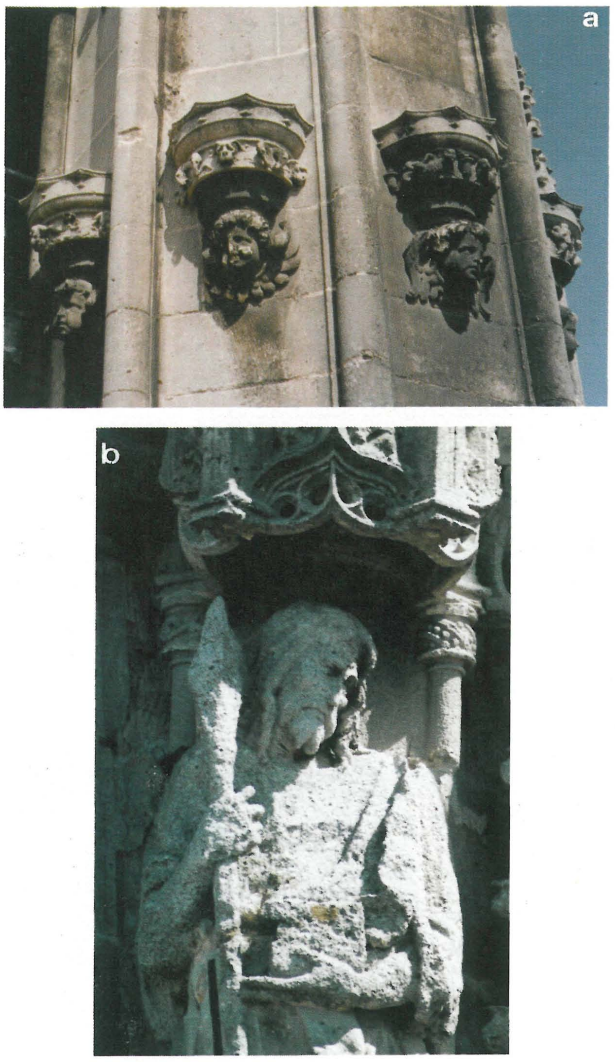


Fig. 4. Pátinas de decoloración: a) Los sillares de la izquierda —zona más expuesta a la lluvia— muestran con nitidez un aspecto decolorado (torre derecha del cimborrio, orientación ESE). b) Figura de una de las torres de la capilla del Condestable, donde la decoloración está asociada a notables procesos de disolución.

destacan las pátinas verdes, formadas por compuestos de cobre, debidos a la migración de dicho metal desde las tomas de tierra de los pararrayos (Fig. 2).

Pátinas biogénicas: películas o capas muy delgadas formadas por organismos vivos que se desarrollan sobre la superficie de la piedra. Los organismos que las forman son principalmente líquenes, y también algas y musgos (Fig. 3).

Estos organismos dan a las pátinas una coloración que va desde el pardo oscuro al amarillo, pasando por tonos verdes y rojizos. El color depende del tipo de organismo involucrado, el ciclo biológico que presente y la época del año.

Pátinas de decoloración: pérdida de color de la piedra, consecuencia de su continuo lavado por el agua de lluvia. Con frecuencia llevan asociadas pérdidas más o menos importantes de material de la superficie, debido a procesos de disolución.

La decoloración puede considerarse un tipo especial de alteración cromática, aunque ahora —además del cambio de color— suelen producirse pérdidas de material difíciles de observar y cuantificar (Fig. 4).

• **Costras (negras):** láminas compactas de material situadas en la parte externa de la piedra, producto de su transformación superficial bajo la influencia de aportes exógenos. Su naturaleza químico-mineralógica y sus características físicas son parcial o totalmente distintas de las del sustrato pétreo sobre el que se asientan. Se identifican muy bien por sus rasgos morfológicos: estrato superficial (a veces en forma de caparazón), de mayor dureza (respecto al material rocoso alterado), y a menudo de color negro, al contener productos carbonosos de contaminación (Fig. 5).

Las costras negras presentan partículas sólidas de contaminación, producidas mayoritariamente por distintos procesos de combustión: calefacciones, motores de vehículos, fuentes de generación de energía (centrales térmicas), procesos industriales, etc.

Las costras pueden evolucionar en el tiempo, haciéndose más espesas, y en ocasiones se desprenden del sustrato, generando otras patologías como son: ampollas, escamas, desconchaduras y disgregaciones.

Costras biogénicas: costras generadas por la acción de los organismos (líquenes, algas y musgos), los cuales —por medio de sus productos metabólicos— desarrollan o acentúan estas formas de alteración.

Dentro de este grupo cabe resaltar el papel de los líquenes endolíticos, ya que pueden generar graves lesiones actuando desde el interior de la roca, en ocasiones sin manifestación exterior alguna (Fig. 6).

• **Ampollas:** despegues más o menos convexos y con ahuecamiento interno de costras. Pueden mostrar distintos grados de evolución hasta eclosionar y romperse, generando descamaciones, y dejando al descubierto una superficie pétrea disgregada, de color blanco intenso cuando la rotura es reciente (Fig. 7).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Fig. 5. Ejemplos de costras detectadas en diferentes orientaciones del cimborrio: a) Detalle de una zona con costras muy evolucionadas, dando lugar a nuevas patologías (NNE). b) Costras con distintos grados de desarrollo, en una zona labrada (NNE). c) Otro aspecto de las costras, comenzando a levantarse del sustrato pétreo, dando lugar a ampollas y descamaciones (ESE).

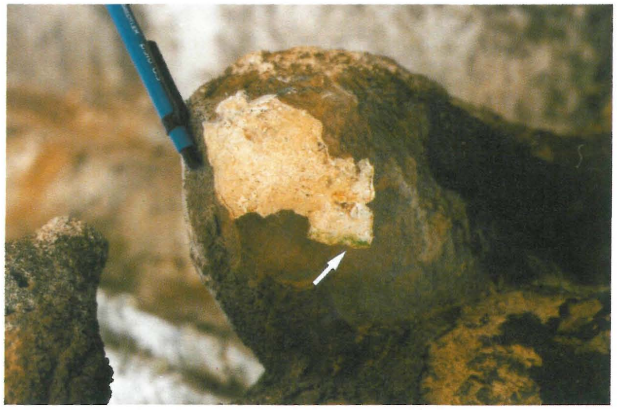


Fig. 6. Aspecto de una costra biogénica donde puede apreciarse la existencia de líquenes endolíticos. Costra localizada en la primera balconada del cimborrio (orientación NNE), en una de las rodillas de la gárgola central.

Fig. 7. Detalle de ampollas, en el borde de un paramento labrado (cimborrio, ESE). Puede observarse su aspecto ondulado y el color blanco de la roca del sustrato, en los sitios donde la capa externa se ha levantado (parte central de la imagen).

Dichas formas de alteración se encuentran ampliamente representadas en los paramentos exteriores de la Catedral de Burgos, especialmente en las zonas labradas (Fig. 5). Con frecuencia, en la Catedral, muchas ampollas de gran desarrollo —las que generan las lesiones más graves—, están relacionadas con las juntas de los morteros. Este hecho es atribuido a que dichos morteros aportan por disolución diferentes elementos, que aceleran y acentúan el proceso alterológico.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

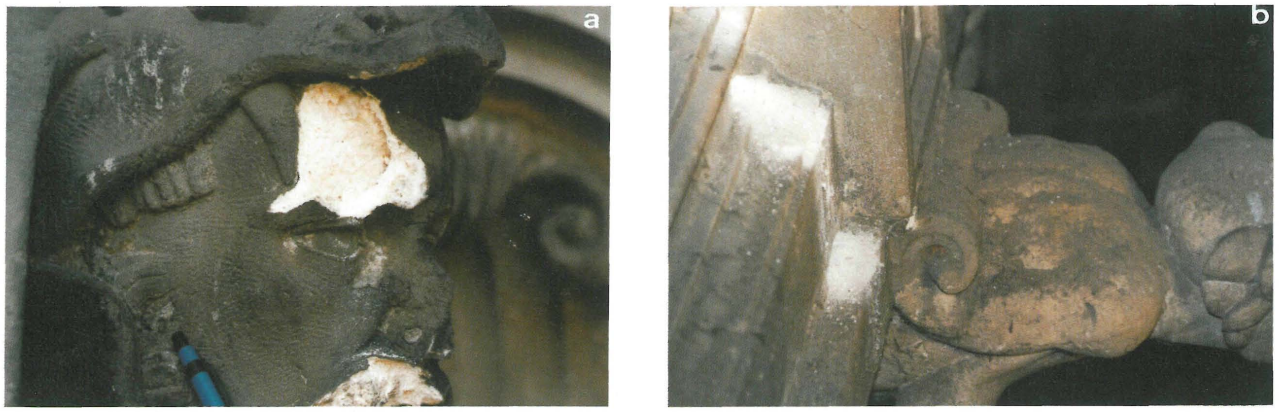


Fig. 8. Material disgregado: a) Figura que constituye uno de los medallones del cimborrio (NNE), con disgregación muy localizada e intensa. b) Parte interna del cimborrio, donde las juntas de los morteros se están disgregando de forma acusada; también pueden observarse depósitos pulverulentos en las zonas más horizontales.

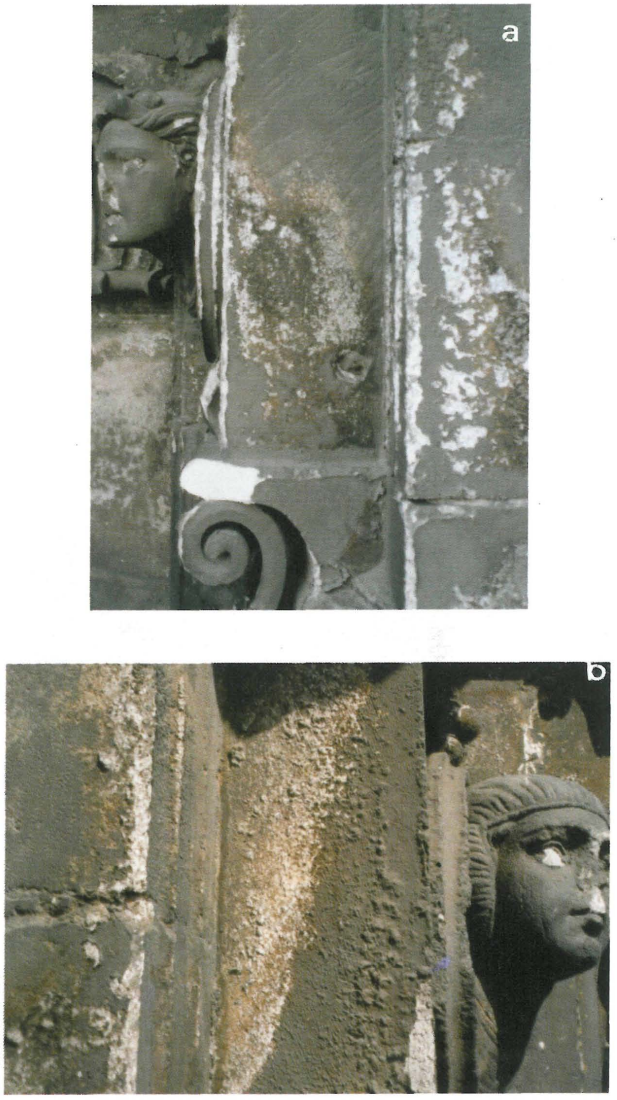


Fig. 9. Eflorescencias en la parte baja del cimborrio (ESE): a) Pérdida de la pátina negra consecuencia del desarrollo de eflorescencias. b) En este caso las eflorescencias se presentan en una zona de costras y colaboran en la formación de las ampollas.

• **Disgregaciones:** desprendimientos de material que tienen lugar de forma natural, o bajo un mínimo esfuerzo, como consecuencia de la pérdida de coherencia entre sus componentes elementales. Morfológicamente se distinguen bien por el color más claro y por la retracción que suponen respecto al nivel original de la superficie externa (Fig. 8).

En función del tamaño de los componentes petrográficos desprendidos se puede distinguir entre disgregación granular (arenización) y disgregación pulverulenta (pulverización).

La disgregación puede ser local, asociada a la eclosión de ampollas, o generalizada, cuando afecta a grandes superficies. En todos los casos, su presencia indica que el grado de alteración alcanzado por el material pétreo es muy elevado.

• **Desmoronamientos:** desagregaciones o colapso físico de la piedra por pérdida total de cohesión entre sus componentes o partes. Término genérico en donde se han incluido las zonas con notables pérdidas de material, generadas por distintas causas —no siempre fáciles de determinar—, incluyendo desde disgregaciones a desprendimientos (Fig. 5a).

• **Eflorescencias:** depósitos o capas de sales solubles que aparecen sobre la superficie de los materiales porosos, de color blanco, aspecto más o menos cristalino y escasa coherencia. Con frecuencia varían periódicamente en cuanto a su extensión, espesor y grado de cristalinidad, como consecuencia de las variaciones climáticas del entorno. Normalmente son la causa de importantes daños en la piedra, desde picaduras a disgregaciones.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Fig. 10. Detalle de un depósito de polvo —de nula coherencia—, localizado en la terraza intermedia de la fachada de Coronería.

En la Catedral de Burgos las eflorescencias son muy abundantes, y pueden aparecer localmente en ampollas eclosionadas —asociadas al material disgregado—, o presentar mayor extensión, generando áreas blanquecinas en los paramentos (Fig. 9).

• **Depósitos superficiales:** acumulaciones de material mayoritariamente pulverulento, de origen diverso (inorgánico u orgánico), que se forman sobre la superficie de la piedra.

Se caracterizan por su falta de cohesión interna y por su escasa adherencia al sustrato. Su espesor puede ser muy variable y su color variar desde el gris oscuro, cuando se deben a acumulaciones de polvo ambiental, al blanquecino, cuando proceden del material pétreo pulverulento desprendido por otras lesiones o de las sales solubles de las eflorencencias (Figs. 10 y 8b).

Como un caso particular de depósitos superficiales pueden considerarse los excrementos de aves, los cuales aparecen ampliamente repartidos por toda la Catedral.

• **Descamaciones-desplacaciones:** son dos formas de alteración que presentan cierta relación entre sí. La descamación es el levantamiento y separación de escamas paralelamente a la superficie de la piedra, debido a diferentes mecanismos como pueden ser: cambios de temperatura, de humedad, acción del hielo, de las sales solubles, etc. (Fig. 11 a).

Cuando el fenómeno tiene lugar a mayor escala y se desprenden grandes superficies de roca —de

Fig. 11. Descamaciones y desplacaciones: a) Pináculo sobre portada de Pellejería con descamaciones y pequeñas desplacaciones. b) Muro en avanzado proceso de desplacación, en la parte superior de la fachada de Coronería.

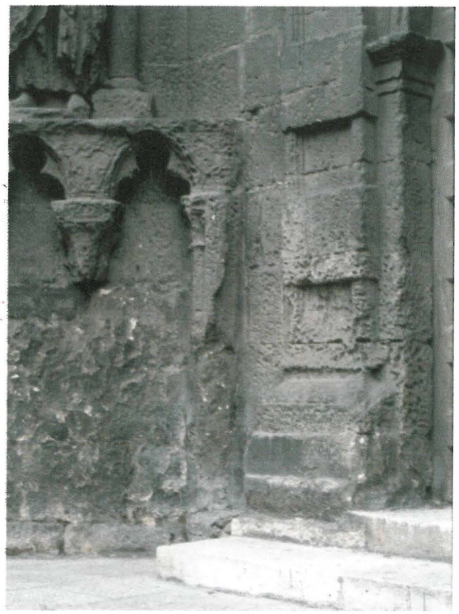


Fig. 12. Detalle de una zona de alveolización localizada en los sillares de la parte baja de la fachada de Coronería.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

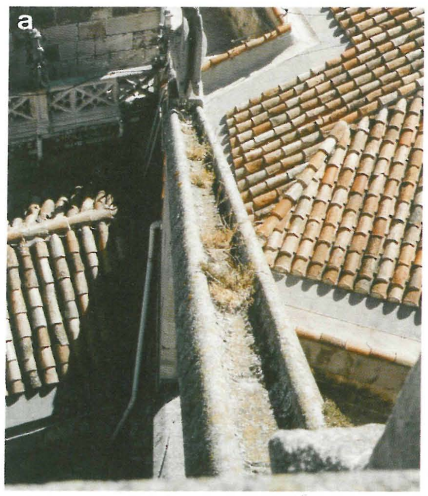
varios milímetros de espesor—, la lesión pasa a denominarse desplacación y las partes desprendidas placas (Fig. 11 b).

• **Alveolizaciones:** cavidades más o menos globulares (alveolos) de tamaño centimétrico, que se forman en la superficie de las piedras, y en cuyo interior se suele localizar material pétreo disgregado, eflorescencias, microorganismos, etc. (3).

En el exterior de la Catedral, en zonas muy localizadas como las partes bajas de la fachada de Coronería, se han encontrado alveolizaciones bien desarrolladas (Fig. 12).

• **Fisuras:** dicontinuidades planares, fracturas o hendiduras de tamaño variable y origen diverso. Pueden afectar a uno o a varios sillares y, en este segundo caso, las fracturas tienden a desarrollarse aprovechando las uniones entre ellos (juntas de mortero).

Fig. 13. Fisura abierta, afectando a varios sillares, en la parte posterior de la torre Sur de la fachada de Santa María.



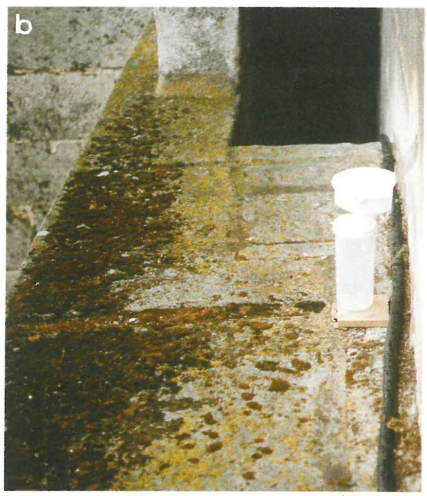


Fig. 14. Diferentes tipos de vegetación implantados en la Catedral: a) Herbáceas en un canalón situado entre el cimborrio y la capilla del Condestable. b) Desarrollo de musgos y líquenes en la terraza intermedia de la fachada de Coronería. c) Aspecto que pueden llegar a presentar algunas plantas superiores, segunda balconada del cimborrio (NNE).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Son formas de alteración cuya gravedad es variable, dependiendo del factor que las ha generado, de su tamaño y su localización. En la Catedral se observan abundantes fisuras, debidas a la oxidación e hinchamiento de los herrajes que sujetan las figuras escultóricas y los pináculos. Su gravedad radica en el riesgo de desprendimiento de las piezas fisuradas.

En otras ocasiones las fisuras se deben a causas estructurales, son consecuencia de que el reparto de las cargas no ha sido correctamente calculado o ha variado por algún motivo. Algunas fisuras en las torres de la fachada de Santa María pueden incluirse dentro de este grupo (Fig. 13).

• **Vegetación (plantas superiores):** las plantas superiores (musgos, hierbas, arbustos), desarrolladas sobre las piedras de las edificaciones, se consideran formas de alteración, ya que colaboran a su deterioro desde varios puntos de vista. En primer lugar, producen una alteración cromática; además, sus productos metabólicos suponen una agresión química para el sustrato, colaborando a su disolución y a la formación de pátinas y costras biogénicas; sus raíces también pueden generar bioincrustaciones y terminar produciendo fisuras y fragmentación del sustrato pétreo. A todo ello hay que añadir que el desarrollo de vegetación supone un incremento en la capacidad de retención de humedad por la piedra (Fig. 14).

3. Cartografía de lesiones

Al mismo tiempo que se catalogan las distintas formas de alteración, es conveniente cartografiar dichas lesiones sobre alzados, con objeto de facilitar las intervenciones de conservación.

La cartografía sobre alzados ha sido llevada a cabo en algunos estudios alterológicos de monumentos de forma manual (4), pero el tiempo y los recursos necesarios en su elaboración hacen que no sea un procedimiento muy habitual. Su informatización permite combinar distintos tipos de datos para obtener nueva información, incrementando su utilidad (5).

En este caso concreto la cartografía de lesiones ha sido digitizada y almacenada en un soporte informático. De esta forma pueden realizarse diversos cálculos con relativa facilidad: obtener los porcentajes que representa cada tipo de lesión sobre una orientación o sobre la totalidad del monumento, resaltar la presencia de las lesiones que con mayor frecuencia aparecen en una orientación determinada, etc. Al mismo tiempo, se puede implementar información de otro tipo sobre los alzados: situar los puntos donde se han muestreado las diferentes patologías, mostrar los resultados de los análisis realizados, etc. Posteriormente, se pueden incluir datos relativos a las intervenciones de conservación (etapas, métodos, productos, etc.).

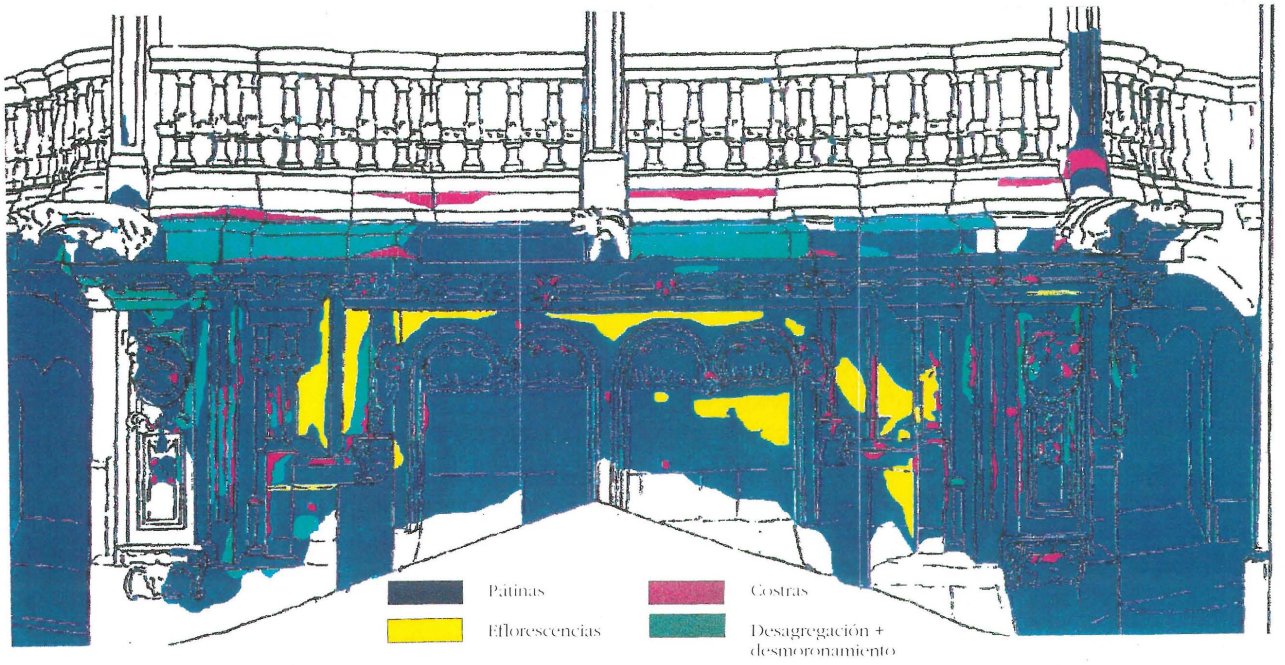


Fig. 15. Cartografía digital de las lesiones inventariadas en la parte baja del cimborrio de la Catedral de Burgos (ESE).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

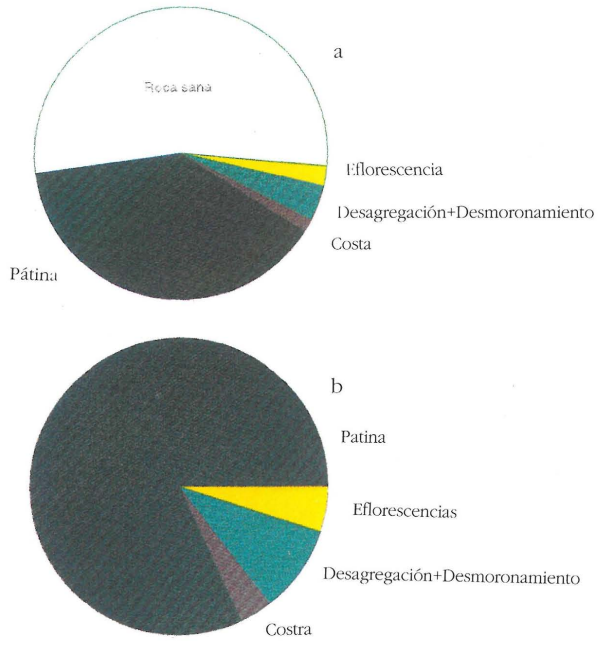


Fig. 16. Diagramas deducidos de la cartografía de la Fig. 15: a) superficie ocupada por las distintas lesiones en relación con la roca sana y b) porcentajes relativos de las lesiones cartografiadas.

Cuando existen diferentes tipos de piedra en un monumento es necesario comenzar por una cartografía litológica, ya que —una vez digitalizada junto con el resto de la información— puede proporcionar datos como la proclividad de un tipo litológico a desarrollar una determinada patología, etc.

Pueden añadirse a las cartografías sobre alzados de las litologías y lesiones, las correspondientes a las etapas de intervención y productos recomendados. De esta forma se puede actuar y supervisar la obra de forma más precisa, obteniéndose además otras ventajas como facilitar el cálculo de los costos de la obra, de las cantidades de los productos a emplear, etc.

Este tipo de información, como se ha señalado, resulta muy útil para quienes deben intervenir posteriormente en la piedra —restauradores y arquitectos principalmente—, en las distintas labores de limpieza, consolidación, protección, sustitución o reintegración. Por medio de esta cartografía digitalizada se tiene un acceso rápido, cómodo y preciso a gran cantidad de información, y parece conveniente que esta metodología de trabajo se generalice.

A modo de ejemplo, se muestra la cartografía de las formas de alteración realizada sobre parte del cimborrio de la Catedral de Burgos (Fig. 15). A partir de dicha imagen, se ha reflejado en dos diagramas la importancia de las distintas lesiones (Fig. 16).

4. Distribución en la catedral: zonas de alteración

Observada la Catedral en su conjunto, el color de la piedra permite establecer distintas zonas, que guardan relación con su alteración. En cada una de ellas se han desarrollado distintas formas y productos de alteración, debido a los diferentes procesos que han intervenido; en consecuencia, el grado de alteración es distinto.

De forma esquemática y simplificada, pueden distinguirse cuatro tipos de zonas a nivel de las grandes superficies externas (fachadas y cimborrio):

1. Zonas blancas o zonas de lavado: expuestas a la lluvia y a su escorrentía, enfrentadas a los vientos dominantes, que se humedecen y secan con gran facilidad. Dichas zonas están periódicamente sometidas a procesos de lavado, que impiden la formación de depósitos sobre la piedra, y además en algunos sitios dan lugar a procesos de disolución más o menos acusados.

En estas zonas se distinguen dos procesos y en consecuencia dos formas de alteración extremas: la *decoloración*, corresponde al simple lavado de la superficie de la piedra sin que la pérdida de espesor sea apreciable; y la *disolución*, donde además de la decoloración superfical se observa pérdida de espesor.

El desarrollo de estas formas de alteración está condicionado por la situación y orientación de la piedra: los relieves —sus partes salientes— y los paramentos verticales, sometidos a la escorrentía de las aguas de lluvia, son los lugares más favorables. También influyen las características de la roca; así, la caliza de Hontoria —de naturaleza carbonatada y de elevada pureza y porosidad— es un material favorable para el desarrollo de este tipo de alteración (Fig. 17).

Normalmente en dichas zonas la piedra se mantiene en buen estado, conserva bien su coherencia, y su grado de alteración puede considerarse bajo. No obstante, debe valorarse en cada lugar la importancia que puede tener la pérdida de espesor; así, en muchos bajorrelieves, esculturas y torrecillas, las partes más externas —enfrentadas a la lluvia— presentan daños importantes, con pérdida de sus contornos (Fig. 4 b).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Fig. 17. Fachada de Santa María donde se observa cómo la parte superior, expuesta a la lluvia y al viento, presenta en general coloración blanquecina, en contraste con la parte inferior protegida, más oscura.

2. Zonas grises o zonas de depósito seco: abrigadas de la lluvia directa y de la escorrentía; fundamentalmente secas, aunque expuestas de forma periódica a humedades, normalmente de condensación. En ellas la superficie de la piedra está sometida a la continua sedimentación de las partículas del ambiente (aerosoles, polvos y hollines).

En estas zonas la superficie de la piedra presenta fundamentalmente dos formas de alteración: los *depósitos superficiales*, acumulación de material pulverulento de origen diverso; y las *pátinas*, película o capa superficial muy delgada, consecuencia de su exposición al ambiente, durante largos períodos de tiempo. La piedra de Hontoria, cuando pierde la humedad de cantera y se expone a la intemperie, desarrolla sus características pátinas en poco tiempo.

Los depósitos superficiales se presentan en los lugares más resguardados, y normalmente los mayores espesores se alcanzan sobre superficies con una componente horizontal importante y favorable al depósito. Las pátinas aparecen en zonas relativamente más expuestas y mejor ventiladas, en paramentos más verticales; se caracterizan por presentar gran extensión, con notables diferencias de unos lugares a otros, ya que pueden pasar gradualmente a zonas blancas decoloradas o, en sentido contrario, comenzar la formación de costras negras (Fig. 18).

Las características de la piedra —en particular su textura y porosidad— tienen gran influencia en el desarrollo de estas formas de alteración. En concreto, la caliza de Hontoria es una roca granada y porosa, y además con granos y poros de tamaño relativamente elevado, por lo que presenta una acusada rugosidad superficial. Este hecho favorece la retención de las partículas sólidas que están en contacto con la superficie de la piedra y la formación de pátinas, dependiendo el grado de desarrollo de uno u otro proceso de la situación de la superficie y de factores medioambientales.

En ambos casos el grado de alteración de la piedra subyacente es muy bajo. Los depósitos superficiales no reaccionan químicamente con el sustrato pétreo, por lo que normalmente una simple limpieza mecánica permite eliminarlos, presentándose la piedra más oscura —más o menos patinada—, pero perfectamente coherente. En las pátinas el espesor afectado es insignificante por definición, y en general —independientemente de la alteración cromática que suponen— su permanencia es positiva ya que protegen la piedra del ambiente.

3. Zonas negras o zonas de depósito húmedo: abrigadas de la lluvia directa pero próximas a dichas zonas, ya que están caracterizadas por la presencia de humedad permanente. Dicha humedad retiene los depósitos exógenos y facilita las reacciones entre ellos y el sustrato pétreo (Fig. 19).

La alteración en estas zonas es más importante y con más variación de formas; las más abundantes y características son las costras, las cuales con el tiempo pueden evolucionar, dando lugar a ampollas y disgregaciones, que con frecuencia presentan asociadas eflorescencias (Fig. 20).

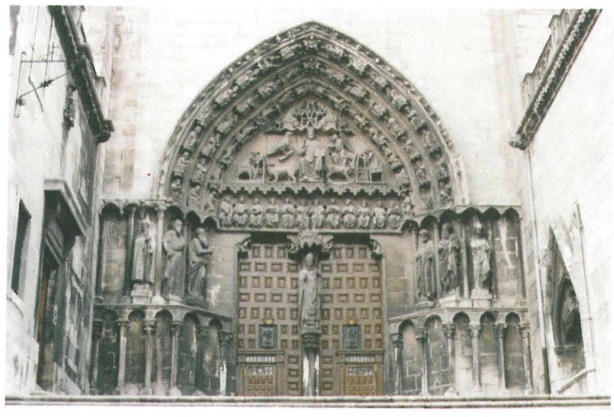


Fig. 18. Detalle de la fachada del Sarmental. Destaca el color oscuro de las zonas protegidas, en la parte alta de la portada, donde se localizan depósitos de polvo y abundantes pátinas.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

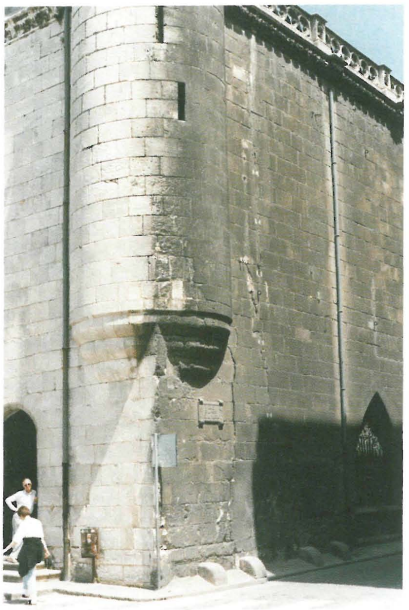


Fig. 19. Contraste entre una zona clara, enfrentada a la lluvia: "zona de lavado" y otra oscura, resguardada: "zona de depósito". El mayor deterioro de la piedra tiene lugar en el contacto entre ambas zonas. (Esquina entre la fachada del Sarmental y la calle de la Paloma.)

Fig. 20. Detalle del avanzado grado de alteración que muestra la piedra en las zonas negras de depósito húmedo. (Fachada de Santa María, zona media, bajo el rosetón central.)

En las *costras* aparece ya diferenciada de la piedra una lámina o estrato superficial de espesor apreciable, más o menos compacto, coherente y de color negro, con notables variaciones de tamaño y forma de unos sitios a otros. Con frecuencia —en relación con los agentes externos—, dicha capa tiende a evolucionar, aumentando de tamaño y tendiendo a despegarse del sustrato, dando lugar a la formación de *ampollas*, fáciles de distinguir por sus formas convexas. Al aumentar el despegue las ampollas rompen —dada su fragilidad—, y la roca del sustrato presenta *disgregaciones*, que se distinguen muy bien por su intenso color blanco —dentro de zonas negras— y por la pérdida de material. Con frecuencia estas dos formas de alteración están asociadas a *eflorescencias*, concentraciones más o menos pulverulentas de sales solubles, que periódicamente se disuelven y precipitan, generando empujes capaces de levantar y romper las costras.

Las zonas más favorables para el desarrollo de estos procesos son las partes inferiores de cornisas y salientes, debido a que el agua, que alcanza su parte superior, es retenida y va escurriendo lentamente por la superficie externa de la piedra y también por su interior. La humedad permanente favorece las reacciones químicas entre los componentes de la roca y los contaminantes ambientales: partículas sólidas y elementos gaseosos (SO_2, NO_x). Esto hace que se generen nuevos compuestos, entre los que es mayoritario el yeso (sulfato cálcico), el cual siempre se presenta en mayor porcentaje en las caras externas de las costras que en las internas. La humedad también favorece los procesos de disolución y reprecipitación de las sales solubles (fundamentalmente nitratos y sulfatos de elementos alcalinos), en menor grado del yeso y en mucho menor de la calcita.

La caliza de Hontoria, dada su textura y porosidad, es un sustrato muy favorable a la circulación de agua por su interior y —como se ha indicado previamente— a la retención de partículas sólidas de contaminación. En los lugares donde los aportes de humedad son frecuentes la movilidad de las sales es muy elevada y se ven potenciados todos estos procesos.

En todos los casos se trata de formas que indican un grado de alteración elevado y creciente al pasar de costras y ampollas a disgregaciones. Una vez comenzados estos procesos, la evolución tiene lugar de forma acelerada, y normalmente conduce en más o menos tiempo a la descomposición y al desmoronamiento de la piedra, mientras no se evite la fuente de humedad permanente. En estos ambientes húmedos da la impresión que, una vez alcanzado un determinado grado de alteración, tienen lugar en la piedra procesos irreversibles, por lo que —además de evitar la humedad— es preciso actuar sobre la piedra para mejorar su conservación.

4. Zonas verde-amarillentas o con desarrollo de vegetación: expuestas a la lluvia y a la insolación, con grados de humedad y de insolación variables según la vegetación desarrollada (Fig. 21).

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Fig. 21. Detalle del cimborrio (primera balconada) en donde se pone de manifiesto la importancia que adquiere la vegetación, su relación con la humedad (correponde a la orientación NNE) y la distinta distribución de líquenes y plantas superiores.

De acuerdo con la disposición (horizontal o vertical) de la superficie pétrea, su orientación y las características microclimáticas del entorno, se pueden desarrollar distintos tipos de vegetación: líquenes, algas verdes, musgos y plantas superiores.

Los líquenes se presentan incrustados en la superficie de la piedra como pátinas o costras, destacando por sus vivas coloraciones (rojizas, pardas, verdes, amarillentas), las cuales pueden variar a lo largo de las estaciones.

Las algas se distinguen por su color verde y su aspecto blando, más o menos filamentoso. Los musgos destacan por su color verde intenso, su mayor espesor y su aspecto plumoso. Finalmente, también se presentan plantas superiores, siendo las herbáceas las más abundantes.

El factor más importante para el desarrollo de las formas inferiores de vegetación es la humedad; las partes bajas —húmedas con frecuencia— y las superficies horizontales —en las que el agua queda retenida— son las zonas más favorables. El desarrollo de los musgos y las plantas superiores se ve también favorecido por la existencia de depósitos superficiales, que hacen de fértil sustrato. En consecuencia, los lugares más favorables para el desarrollo de vegetación son las cornisas (sus zonas horizontales resguardadas), y dentro de los paramentos verticales las juntas, por el quimismo más variado y la mayor porosidad de sus morteros.

En la Catedral, en las partes altas de las fachadas y en el cimborrio, los líquenes presentan un notable desarrollo y una amplia distribución, sobre superficies horizontales (cornisas, barandillas) y también verticales (Fig. 21). Las algas se presentan en las zonas bajas, en los lugares más húmedos, y dadas las características climáticas del ambiente no alcanzan gran desarrollo. Las plantas superiores aparecen en las zonas altas y húmedas, como las cornisas de las balconadas del cimborrio y los canalones.

En general, la vegetación es un buen indicador del grado de alteración que puede presentar una edificación, dicho grado es creciente al aumentar en cantidad y también al pasar de las plantas inferiores a las superiores. Por ello, se requiere un mantenimiento constante que impida su implantación.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

5. Agradecimientos

A la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), Proyecto PAT91-1093-CO3-01: "Modelos de interacción piedra-ambiente para el diagnóstico del deterioro de la piedra monumental."

A la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León, Contrato B1-038-92: "Incidencia del ambiente en el deterioro de la piedra de Hontoria de la Catedral de Burgos: cimborrio y fachada de la Coronería."

Al Cabildo de la Catedral de Burgos, por las facilidades prestadas en las repetidas visitas realizadas al momento.

BIBLIOGRAFÍA

(1) MARCOS, R. M.; ESBERT, R. M.; ALONSO, F. J. y DÍAZ-PACHE, F. (1993): "Características que condicionan el comportamiento de la caliza de Hontoria (Burgos) como piedra de edificación", *Boletín Geológico y Minero*, vols. 104-5.

(2) ORDAZ, J., y ESBERT, R. M. (1988): "Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción", Materiales de Construcción, vol. 38, n.º 209.

(3) VALDEÓN, L.; ESBERT, R. M., y MARCOS, R. M. (1985): " La alveolización y otras formas de alteración desarrolladas sobre las areniscas del Palacio de Revillagigedo de Gijón", Materiales de Construcción, vol. 35.

(4) FITZNER, B. (1990): "Mapping of natural stone monuments. Documentation of lithotypes and weathering forms", Advanced Work-shop: Analytical Methodologies for the Investigation of Damage Stone, Pavía (Italia).

(5) ESBERT, R. M.; GARCÍA-RAMOS, J. C.; NISTAL, A.; ORDAZ, J.; VALENZUELA, M.; ALONSO, F. J., y SUÁREZ DE CENTI, C. (1992): "El proceso digital de imágenes aplicado a la conservación dela piedra monumental. Un ejemplo, Santa María del Naranco", Revista de Arqueología, número 139.

* * *

Publicación del Instituto Eduardo Torroja-CSIC

publicación del ICCET/CSIC

ACUEDUCTOS ROMANOS EN ESPAÑA
Carlos Fernández Casado
Prof. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Esta publicación se compone de una serie de artículos, publicados en la Revista «Informes de la Construcción», en los cuales se hace un análisis de los acueductos romanos que existen en España y el balance de las condiciones de conservación en que se encuentra cada uno de ellos, incluyendo referencias históricas y literarias. Se ha ilustrado con la reproducción de la valiosa documentación gráfica que posee el prestigioso autor.

Un volumen encuadernado en couché, a dos colores, de 21 x 27 centímetros, compuesto de 238 páginas, numerosos grabados, dibujos, fotos en blanco y negro y figuras de línea.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es