

**ALTERACIÓN DE LAS ROCAS
Y OTROS MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN
EN LOS MONUMENTOS.
TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN**

Iván de Rosario Amado

Jorge Feijoo Conde

Pontevedra

2016

MONOGRAFÍAS DA UNIVERSIDADE DE VIGO.
TECNOLOXÍA E CIENCIAS EXPERIMENTAIS, 23

Rosario Amado, Iván de Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos : técnicas de conservación / Iván de Rosario Amado, Jorge Feijoo Conde

Vigo : Universidade de Vigo, Servizo de Publicacións, 2016

294 p.; 17x24 cm. – (Monografías da Universidade de Vigo. Tecnoloxía e ciencias experimentais; 23)

D.L. VG 673-2016. -- ISBN 978-84-8158-720-3

1. Piedras de construcción -- Conservación y restauración 2. Monumentos – Conservación y restauración I. Feijoo Conde, Jorge II. Universidade de Vigo. Servizo de Publicacións, ed.

691.2/4.059

72.025.4

Edición:

Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo

Edificio da Biblioteca Central

Campus de Vigo

36310 Vigo

© Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo, 2016

© Jorge Feijoo Conde e Iván de Rosario Amado

Universidade de Vigo

ISBN: 978-84-8158-720-3

D.L.: VG 673-2016

Impresión: Tórculo Comunicación Gráfica, S.A.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluidos fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información e sistema de recuperación, sin el permiso escrito del Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.

Preámbulo

La urgente necesidad de conservar y restaurar nuestro patrimonio monumental, cada vez más deteriorado con el paso de los años, nos hace replantear en muchos casos la posibilidad de hacer intervenciones sobre la obra en cuestión. Estas intervenciones tienen como finalidad intentar devolverles sus características originales y protegerlos frente a la acción de las causas que dieron lugar a su deterioro. Para ello, es de suma importancia conocer con que material se está trabajando, pues la amplia variedad de tipos de rocas con las que se construyen los monumentos hace que en muchos casos cada intervención sea única.

En este libro se describen las principales formas de alteración de las rocas así como los métodos destinados a su conservación y restauración cuando forman parte de monumentos y esculturas labradas en piedra. Además, pone de manifiesto la enorme complejidad que supone afrontar una intervención sobre un Bien Cultural de naturaleza lítica, debido fundamentalmente a la heterogeneidad mineralógica y química de algunos tipos de roca. Con ello, se pretende condensar en un único libro, apto tanto para estudiantes que comienzan sus estudios en este campo, como para personal profesional (principalmente restauradores) que trabajen en la Conservación del Patrimonio, los conocimientos necesarios básicos para llevar a cabo una intervención sobre un material pétreo, y además concienciar a la sociedad actual del grave daño que está sufriendo el patrimonio, exponiendo a su vez los métodos existentes actualmente y que se encuentran a nuestro alcance para paliar el deterioro que el paso del tiempo y otras incidencias producen en el mismo.

Objetivos

El objetivo de esta publicación es por tanto, dar a conocer las patologías que sufren los monumentos construidos por materiales pétreos y definir líneas de actuación ante una posible intervención sobre un bien cultural deteriorado, pues el Patrimonio es la herencia cultural propia del pasado de una comunidad, con la que ésta vive en la actualidad y se transmitirá a las generaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos.

En especial:

A mi padre, José Antonio de Rosario

A mi mujer Eva Quintas y a mi hijo Sergio Feijoo

1. INTRODUCCIÓN	13
2. LAS ROCAS EN LOS MONUMENTOS.	21
2.1. ROCAS Y MINERALES	21
2.1.1. LOS MINERALES	21
2.1.1.1. Clasificación de los minerales	21
2.1.1.2. Propiedades de los minerales	24
2.1.2. LAS ROCAS. CLASIFICACIÓN Y TIPOS	30
2.1.2.1. Rocas ígneas	31
2.1.2.2. Rocas metamórficas	34
2.1.2.3. Rocas sedimentarias	38
2.2. ROCAS MÁS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE MONUMENTOS	44
2.2.1. GRANITO	48
2.2.2. ARENISCA	50
2.2.3. MÁRMOL	51
2.2.4. CALIZAS Y DOLOMIÁS	52
2.2.5. ALABASTRO	52
2.3. MORTEROS EN RESTAURACIÓN	54
2.3.1. TIPOS DE MORTEROS	54
2.3.2. COMPOSICIÓN DE LOS MORTEROS	56
2.3.2.1. Conglomerantes	56
2.3.2.1.1. Conglomerantes inorgánicos	57
2.3.2.1.2. Conglomerantes orgánicos	62
2.3.2.2. Áridos	63
2.3.2.3. Agua	63

2.3.2.4. Aditivos	63
2.4. LADRILLO	64
3. MECANISMOS DE ALTERACIÓN	67
3.1. DEFINICIONES BÁSICAS	67
3.2. TIPOS DE ALTERACIÓN	68
3.2.1. ALTERACIÓN FÍSICA	68
3.2.2. ALTERACIÓN QUÍMICA	70
3.2.3. ALTERACIÓN BIOLÓGICA	73
4. FACTORES DE ALTERACIÓN	75
4.1. FACTORES DE ALTERACIÓN	75
4.1.1. FACTORES INTRÍNSECOS	75
4.1.1.1. Composición mineralógica y química	75
4.1.1.2. Porosidad y sistema poroso	76
4.1.1.3. Características estructurales	77
4.1.1.4. Propiedades térmicas	77
4.1.1.5. Propiedades mecánicas	78
4.2.2. FACTORES EXTRÍNSECOS	78
4.2.2.1. El agua	78
4.2.2.2. Las sales solubles	81
4.2.2.3. Contaminantes atmosféricos	89
4.2.2.4. Organismos vivos	92
4.2.2.5. La temperatura	93
4.2.2.6. El viento	95
4.2.2.7. Terremotos	96
4.2.2.8. Otros agentes	98

5. INDICADORES DE ALTERACIÓN	105
5.1. MODIFICACIONES SUPERFICIALES.....	107
5.1.1. ALTERACIONES CROMÁTICAS	107
5.1.2. COSTRAS	110
5.1.3. DEPÓSITOS	113
5.2. ELIMINACIÓN O PÉRDIDA DE MATERIA.....	115
5.2.1. CON FORMACIÓN DE HUECOS.....	115
5.2.2. SIN FORMACIÓN DE HUECOS.....	120
5.3. DEFORMACIONES.....	122
5.4. RUPTURAS.....	124
5.5. DISYUNCIONES	127
5.6. ORIGEN BIOLÓGICO	130
6. TRATAMIENTOS PARA LA CONSERVACIÓN DE LOS MONUMENTOS	139
6.1. RECOPIACION DE INFORMACIÓN.....	139
6.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS	140
6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA	148
6.4. TRATAMIENTOS.....	158
6.4.1. CONTROL DE HUMEDADES.....	159
6.4.1.1. Limitar o reducir la entrada de agua.....	162
6.4.1.2. Reducir la capacidad de absorción del monumento.....	163
6.4.1.3. Mejora de la capacidad de evaporación del edificio.....	165
6.4.1.4. Empleo de procesos electrocinéticos que permitan movilizar el agua (electroósmosis).....	166

6.4.2. LIMPIEZA	168
6.4.2.1. Métodos físicos	169
6.4.2.2. Métodos de limpieza acuosos	175
6.4.2.3. Limpieza química	176
6.4.2.4. Limpieza con láser	179
6.4.3. DESALINIZACIÓN	183
6.4.3.1. Los baños de inmersión	185
6.4.3.2. Aplicación de apósitos o papetas	187
6.4.3.3. Morteros de sacrificio	193
6.4.3.4. Productos inhibidores o modificadores de los procesos de cristalización	194
6.4.3.5. Técnicas electroquímicas: Electromigración	197
6.4.4. CONSOLIDACIÓN	200
6.4.4.1. Consolidantes inorgánicos	203
6.4.4.2. Consolidantes organosilíceos	205
6.4.4.3. Consolidantes orgánicos	207
6.4.4.4. Nanomateriales de efecto consolidante	210
6.4.5. HIDROFUGACIÓN	212
6.4.6. OTROS TRATAMIENTOS	220
7. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA	231
7.1. EVALUACIÓN DE LA EFICACIA Y EFECTIVIDAD DESALINIZADORA	231
7.2. INTERACCIÓN ROCA-TRATAMIENTO (CONSOLIDACIÓN, HIDROFUGACIÓN)	233
7.3. EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS CONSOLIDANTES E HIDROFUGANTES	234
7.3.1. Eficacia consolidante	234

7.3.2. Eficacia hidrofugante	238
7.3.3. Evaluación de la durabilidad	242
7.3.4. EFECTOS NEGATIVOS	246
8. BIBLIOGRAFÍA.	251
9. ANEXO GRÁFICO	267
9.1. DESCRIPCIÓN DE LAS LÁMINAS	267

1. INTRODUCCIÓN

Se define el término monumento como “*una entidad identificada por su valor y que forma un soporte de la memoria. En él, la memoria reconoce aspectos relevantes que guardan relación con actos y pensamientos humanos, asociados al curso de la historia y todavía accesibles a nosotros*” (Carta de Cracovia 2000). Es por tanto, toda obra preferentemente arquitectónica, la cual por encima de su valor intrínseco o utilitario, es apreciada por su valor artístico, histórico y/o social. La mayor parte de los monumentos construidos desde civilizaciones antiguas (egipcia, griega, romana, etc.) hasta las actuales, están construidos con materiales naturales pétreos, debido principalmente a su durabilidad, variedad y resistencia frente al tiempo. Ello permitió dejar constancia a las generaciones futuras, con el paso de los años, de las diferentes culturas y estilos arquitectónicos existentes en aquella época.

En este capítulo se muestran algunos de los monumentos recogidos por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad que han sido construidos con diferentes rocas ornamentales (*Figuras 1-6*).

Sin embargo, estos materiales cuando se encuentran expuestos a la intemperie (tal y como sucede en la mayor parte de los casos), son susceptibles de alterarse, ya que las condiciones ambientales en las que se encuentran distan mucho de las condiciones en que se formaron. De esta manera, un material poroso puesto en obra se ve afectado por las condiciones ambientales que rodean al monumento del cual forma parte (factores extrínsecos de alteración). Este proceso de alteración hacia un nuevo estado de equilibrio es muy lento, sin embargo el creciente y desmesurado desarrollo industrial (combustibles fósiles sobre todo) ha acelerado la contaminación del aire incrementando los daños causados sobre los materiales que conforman este tipo de obras.



Figura 1: *Templo del Partenón construido con mármol blanco procedente de canteras cercanas a la ciudad de Atenas; Acrópolis de Atenas, Grecia. Construcción 447-438 a. C.*

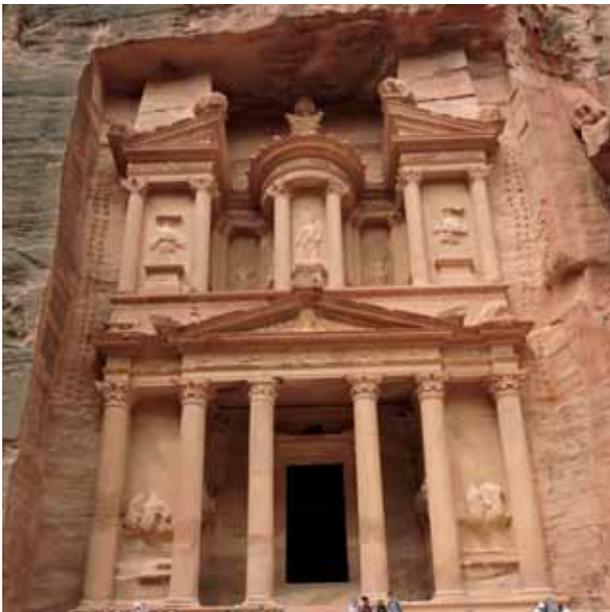


Figura 2: *Khazneh (El Tesoro de Petra) labrada en arenisca, Jordania. Siglo I a. C.*



Figura 3: Torre inclinada de Pisa construida principalmente con mármol de San Giuliano, la Toscana, Italia. Construcción 1173-1370.



Figura 4: El Templo de Kukulcán construido con roca caliza, Chichén Itzá, Península del Yucatán, México, siglo XII d.C.



Figura 5: *Catedral de Santiago de Compostela construida con granito, Galicia, España. Construcción 1075-1211.*

La Carta de Venecia de 1964 especifica que *“la conservación y restauración de los monumentos constituyen una disciplina que se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental”* (art. 2), y además *“tiene como finalidad salvaguardar tanto la obra de arte como el testimonio histórico”* (art. 3), es decir, se debe intentar mantener tanto el aspecto original del monumento así como el mensaje artístico que el autor quería transmitir. En artículos posteriores define también *“la restauración como un proceso que debe tener un carácter excepcional, pues su finalidad es la de conservar y poner de relieve los valores formales e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a los elementos antiguos y a las partes auténticas”* (art. 6). Además *“debe estar siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento”* (art. 9). Queda claro pues que una intervención, además de ser realizada por profesionales cualificados procedentes de diferentes disciplinas, debe ser llevada a cabo de la forma más rigurosa posible, pues en muchos casos la obra puede ser de incalculable valor social y/o histórico.

Más recientemente el comité de redacción de la Carta de Cracovia 2000 definió el **Patrimonio** como el *“conjunto de las obras del hombre en las cuales una comunidad*

*reconoce sus valores específicos y particulares y con los cuales se identifica. La identificación y la especificación del patrimonio es por tanto un proceso relacionado con la elección de valores”; a su vez definió la **Conservación** como “el conjunto de actitudes de una comunidad dirigidas a hacer que el patrimonio y sus monumentos perduren”; y la **Restauración** como “una intervención dirigida sobre un bien patrimonial, cuyo objetivo es la conservación de su autenticidad y su apropiación por la comunidad”.*

La conservación del patrimonio de naturaleza pétreo, es un tema que ya preocupaba antaño, donde la falta de conocimientos y tecnología hacían que muchas de aquellas intervenciones (usos de sustancias orgánicas como aceites o ceras de forma inadecuada), agravaran en muchos casos el deterioro inicial del monumento. Con el paso del tiempo se fueron desarrollando distintas normas de actuación sobre un Bien Cultural, como la Carta de Atenas de 1931, la de Venecia de 1964, La Carta del Restauo de 1972, o La Carta de la Conservación y Restauración de los objetos de Arte y Cultura de 1987, con el objeto de normalizar y marcar las pautas a seguir en una intervención.

En el deterioro de la piedra influyen dos tipos de factores de alteración. Los factores intrínsecos del material de construcción empleado (naturaleza, composición y propiedades) y los factores extrínsecos (medio ambiente y agentes externos) determinarán el mecanismo de alteración que afecta al material puesto en obra, ya sea físico, químico o biológico. Estos mecanismos pueden poner en riesgo el valor histórico-artístico de la obra y además mermar su comportamiento mecánico, hasta el punto de poder ser declarado ruina.

Avances científicos y tecnológicos han permitido conocer de una forma más precisa las patologías que sufren las rocas, permitiendo diagnosticar y estudiar la alteración de un material pétreo más exhaustivamente a través de diferentes técnicas analíticas como la difracción de rayos X, la microscopia electrónica de barrido o la resonancia magnética nuclear entre otras. Sin embargo, y a pesar de estos avances no existe un perfecto y único tratamiento para la conservación de un monumento pétreo, pues la diversidad de factores de alteración y sobre todo la heterogeneidad química y mineralógica de algunas rocas imposibilitan este cometido. En estos casos, el procedimiento ideal consistiría en realizar estudios previos en laboratorio para simular el comportamiento del material ante los productos o tratamientos aplicados, pero esto no siempre es posible.

Junto con estos avances tecnológicos desarrollados en el estudio de las patologías de la piedra, también se han definido diferentes métodos de conservación, cuyos objetivos consisten en intentar devolver las características originales de los materiales deteriorados y protegerlos frente a los agentes causantes de su deterioro. Estos tratamientos son principalmente cuatro (Villegas y Sebastián, 2003):

1. **La limpieza de la superficie pétreo alterada**, tratando de no ocasionar variaciones texturales en la roca. Suele ser la primera tarea que se realiza sobre la obra, pues el objeto de esta operación es la eliminación de toda materia extraña adherida a la roca para a continuación aplicar otro tratamiento posterior. Se trata de una operación que en muchos casos puede llegar a ser irreversible, pues el uso inadecuado de las diferentes herramientas como cinceles o máquinas de chorreo pueden tener consecuencias nefastas en la obra. Para evitar problemas de esta índole, es importante empezar definiendo una serie de cuestiones, tales como; qué se quiere limpiar y por qué, cómo se va a limpiar y quién es el responsable material de esta acción.
2. **La desalinización de materiales afectados por la acción de sales solubles.** En esta operación es de suma importancia conocer la fuente de sales, pues si no se anula o reduce el aporte de dichas sales será difícil garantizar que el material tratado quede desalinizado completamente. Una vez detectada, se identificará que tipos de sales están presentes en la roca a través de técnicas analíticas, visuales, etc., las cuales permitan realizar además una cartografía de sales definiendo de este modo la distribución de las mismas en el paramento o monumento a tratar. Por último, se procederá a la desalación propiamente dicha, bien por métodos electrocinéticos, por baños de inmersión en algún efluente líquido de bajo contenido iónico o por la aplicación de papetas entre otros posibles tratamientos.
3. **La consolidación de materiales afectados por procesos que generan pérdida o descohesión de material**, como son la desagregación arenosa o las desplazaciones (ocasionadas ambas por la acción de sales solubles). Este tratamiento tiene por objeto la mejora de la cohesión y adherencia entre los granos minerales de las capas alteradas al sustrato sano, permitiendo mejorar las propiedades y características mecánicas de la roca, siendo la profundidad de penetración y la cantidad de residuo seco en el interior de la roca determinantes en este tratamiento.
4. **La protección de la roca frente al agua o hidrofugación**, consiste en la aplicación de un producto que una vez aplicado sobre la superficie de la roca impide la entrada de agua líquida en el volumen poroso de la roca, permitiendo sin embargo la transpiración de ésta en forma de vapor de agua. Esto se consigue mediante una red de moléculas que presentan una parte hidrofílica que se adhiere a la roca, y otra parte hidrofóbica responsable de la repelencia a la humedad.

Uno de los principales objetivos de este libro es dar a conocer los fundamentos teóricos sobre las patologías que sufren las piedras en los monumentos de interés cultural y la metodología apropiada para llevar a cabo su intervención y su salvaguarda.

Además, se busca concienciar a la sociedad de la importancia de conservar y restaurar tanto el patrimonio propio como el ajeno, para preservar el testimonio cultural de nuestros antepasados. Esta labor tan importante es la que ha permitido que podamos seguir disfrutando de numerosos edificios históricos como por ejemplo la Torre de Hércules, único faro romano y el más antiguo de los que se encuentran en funcionamiento a nivel mundial (s. II). En esta edificación, se acometió una importante restauración en 1993 que consistió en la rehabilitación de los muros exteriores de la torre, pues había problemas de estanqueidad al agua, colonización biológica, desaparición del mortero de las juntas y graves daños ocasionados por las sales solubles provenientes del agua de mar. Todos estos daños habían mermado el comportamiento mecánico y estructural de la torre. El proceso de restauración de la fachada exterior, se basó en la aplicación de tratamientos fungicidas para la destrucción y prevención de algas y microorganismos, limpieza de la piedra de eflorescencias salinas y de óxidos, rejuntado de la sillería y aplicación de un consolidante (*Figura 6*).



Figura 6: La Torre de Hércules (La Coruña), Antes, durante y después de la restauración de 1993 (imágenes extraídas de web 1 y web 2).

El patrimonio cultural, presente en multitud de pueblos, ciudades y demás regiones, reflejan y representan valores emocionales, culturales, políticos, etc., que la sociedad de aquel momento quería transmitir a través del tiempo. España, después de Italia, es el país con mayor número de lugares que han sido declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Esta herencia de incalculable valor debe ser considerada por todos nosotros, desde los ciudadanos de a pie hasta las altas

personalidades, como un bien a proteger pues nos pertenece a todos ya que forma parte de nuestra identidad, de nuestra riqueza cultural, histórica y/o artística.