



Guía para el estudio de la alteración de la piedra de los monumentos y de medidas de conservación

Manuel Alcalde Moreno
Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Universidad de Sevilla

Rosario Villegas Sánchez
Instituto Andaluz del Patrimonio
Histórico

La demostrada aceleración que en las últimas décadas han experimentado los procesos de degradación de la piedra de los monumentos ha alertado a aquellas comunidades con un patrimonio histórico-artístico valioso y las han puesto en movimiento, en el sentido de realizar algo para paliar este deterioro.

No siempre los pasos dados han sido acertados. Ya figuran en los anales las intervenciones que, en el pasado, queriendo reparar un daño, al cabo de cierto tiempo han dejado maltrecho el elemento reparado. El remedio fue peor que la enfermedad. Muchas de estas actuaciones equivocadas podían aceptarse por la falta, en ese momento, de conocimientos suficientes de los mecanismos de alteración.

Y aún hoy es difícil tener la certeza de que una actuación sea la idónea, dada la complejidad de factores que intervienen pero, desde luego, lo que no se puede es actuar ignorando los avances conseguidos actualmente en el conocimiento de materiales y en tecnologías de conservación.

La presente guía pretende resumir una metodología para el estudio de la alteración de la piedra de los monumentos y de medidas de conservación, que quiere ser útil a la hora de elaborar un proyecto de restauración o, al menos, que ayude a clarificar los criterios que los responsables de un monumento han de manejar a la hora de tomar decisiones.

En el presente trabajo se hace una síntesis de dicha metodología y en los sucesivos se irán desarrollando cada uno de los puntos aquí expuestos.

El proyecto de restauración

El proyecto de restauración debe contener todas las actuaciones que vayan a realizarse sobre el monumento, tendentes a su conservación. Las improvisaciones que pudieran surgir en el transcurso de la obra deben quedar reducidas al mínimo y, en cualquier caso, deben quedar reflejadas en un informe final.

Las actuaciones serán las dictadas por los resultados obtenidos en la investigación de los **factores** de alteración, agentes causantes de los **mecanismos** que han provocado transformaciones en las propiedades de la piedra, lo que se manifiesta como **indicadores** de alteración, y del efecto inhibitorio que los posibles **tratamientos** puedan ejercer sobre aquellos. Es decir, toda actuación que no haya sido investigada en su relación causa-efecto no debe llevarse a cabo en un monumento histórico.

Para determinar los factores de alteración es necesario conocer la naturaleza de la piedra y el medio en que ésta se encuentra. Los mecanismos de alteración se investigan a través de **experiencias** en las que las piedras son sometidas, de forma controlada, a factores de alteración. Una vez determinados los mecanismos se estará en condiciones de realizar una propuesta de los tratamientos que se consideren adecuados y, en cualquier caso, éstos deben ser ensayados a su vez antes de su aplicación al monumento.

El proyecto debe contemplar también un **programa de seguimiento** de la evolución de las intervenciones realizadas.

Estudio de los factores de alteración

Los factores de alteración pueden ser **intrínsecos**, derivados de la propia naturaleza de la piedra, y **extrínsecos**, de origen externo a la misma.

Las fuentes de información que han de manejarse para conocer la piedra y su medio y, por tanto, los factores de alteración son:

Historia del monumento

Como fase previa, a través del estudio de los archivos del propio monumento, de los ayuntamientos, de arquitectos que han intervenido, fondos fotográficos, trabajos de investigación anteriores, obras literarias, hemerotecas, inscripciones en el edificio como marcas de canteros, fechas, símbolos, etc. se han de extraer todos los conocimientos posibles acerca de los materiales que se han empleado en la construcción, canteras de origen, distribución de materiales en el edificio, sustituciones, reparaciones, restauraciones y tratamientos realizados, vicisitudes históricas como terremotos, incendios, guerras, etc.

HISTORIA DEL MONUMENTO

| Fuente | Información |
|------------------------------|----------------------------|
| Archivos del monumento | Origen de la piedra |
| Fondos fotográficos | Distribución de materiales |
| Investigaciones anteriores | Restauraciones realizadas |
| Hemerotecas | Elementos sustituidos |
| Inscripciones en el edificio | Terremotos |
| Marcas de canteros | Incendios |

Indicadores visuales de alteración

La morfología macroscópica de las alteraciones que la piedra presenta en el monumento dan información acerca de la naturaleza de la misma y de los factores y mecanismos que han intervenido. Esta fase, de difícil traducción a valores cuantitativos es, sin embargo, de gran valor a la hora de orientar las futuras experiencias de alteración y de decidir de qué ensayos se pueden esperar conclusiones más significativas. Por esta difícil cuantificación, una buena documentación fotográfica es imprescindible para dejar constancia objetiva de las observaciones realizadas.



También es importante que los indicadores sean designados mediante una nomenclatura precisa, evitando en lo posible los términos ambiguos y los genéricos. (En este mismo número se recoge una propuesta de terminología de indicadores de alteración).

INDICADORES DE ALTERACIÓN EN EL MONUMENTO

| Fuente | Información |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Morfología de las alteraciones | Estado de conservación general |
| Distribución de indicadores según: | Grados de alteración |
| la fachada | Efectos de los factores: |
| la altura | contaminación |
| la orientación | humedad ascendente |
| la forma del elemento | lluvia, viento... |
| el tipo de piedra | Experiencias que deben realizarse |

Naturaleza de los materiales

Una vez realizado el examen visual sobre el monumento y conocidas las canteras de origen, es necesario caracterizar las piedras, tanto alteradas, es decir, en el monumento, como de las canteras. En ambos casos se comienza con la **toma de muestras** que, en el caso del monumento estará limitada en cantidad y número por el criterio, lógicamente, de producir el menor daño posible al mismo, y en las canteras, donde esta limitación desaparece, buscando que sean, dentro de las heterogeneidades que se presentan en toda cantera, similares a las usadas en el monumento. Esta correspondencia monumento-cantera debe venir avalada posteriormente por los resultados de los análisis que se efectúen.

NATURALEZA DE LOS MATERIALES

| Fuente | Información |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Análisis químico | Alterabilidad de la piedra |
| Análisis mineralógico | Comportamiento frente al agua |
| Estudio petrográfico | Defectos internos |
| Ensayos físicos, hídricos y mecánicos | Posibilidad de aplicar tratamientos |

por calcinación), responsables principales del comportamiento químico y, en aquellos casos en que es necesaria la identificación precisa de los litotipos, los elementos traza (Pb, Ti, Zn, Cu, Ni, Co, Mn...). También pueden establecerse correlaciones entre el grado de alteración y la composición química. Es importante determinar, si existen, el contenido y tipo de sales solubles en la piedra.

Composición mineralógica

La alterabilidad de la piedra no depende solo de su composición química, sino también de las formas cristalinas que los compuestos adoptan. Algunos mecanismos de alteración residen precisamente en la conversión de unos minerales en otros, sin que por ello haya cambio en la composición química global. Es el caso, por ejemplo, del incremento de volumen asociado a la hidratación-deshidratación de sustancias higroscópicas, o a la hidrólisis de los feldespatos en que la ortoclasa se convierte en caolinita o en sericita. Distintas variedades alotrópicas pueden implicar alterabilidades diferentes. Incluso la anisotropía de los cristales origina alterabilidades diferentes según sea la orientación.

Características petrográficas

Además de la composición química y mineralógica es necesario conocer la textura y estructura de la piedra. Es conocido, por ejemplo, que una piedra caliza porosa es más alterable que un mármol. Así, el tamaño de grano, tipo y grado de cementación, estratificación, defectos cristalinos, etc. están relacionados con la alterabilidad del material, propiedades que, en gran medida, están relacionadas con el origen de la roca, según sea éste sedimentario, metamórfico o ígneo.

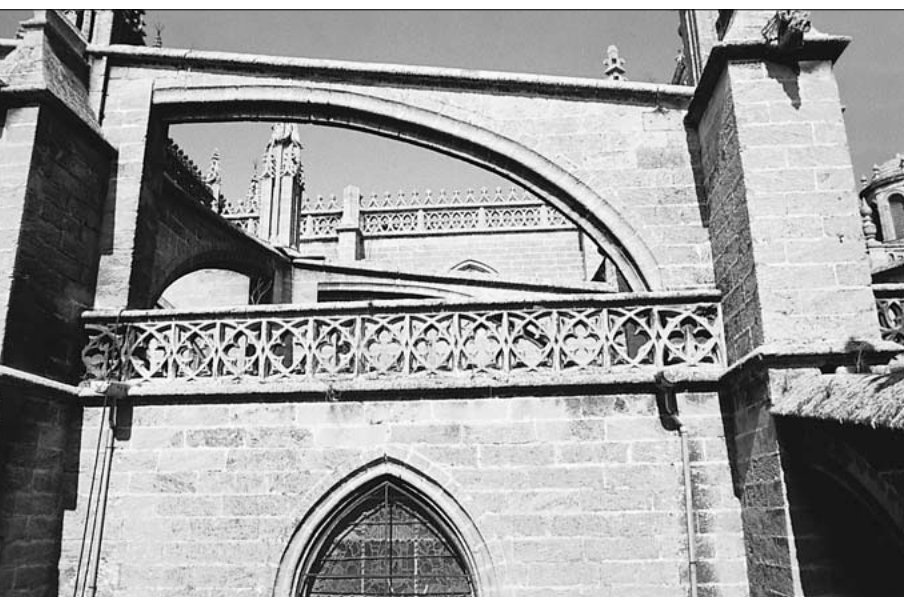
Propiedades físicas, hídricas y mecánicas

La **porosidad**, que nos informa sobre la compacidad del material, y la **porometría** que nos da la distribución de tamaños de poros, tal vez sean las determinaciones más utilizadas, debido a la importancia que en la alteración tiene la presencia y circulación de agua. El estudio del movimiento de agua es importante tanto en forma de vapor, mediante medidas de humedad de equilibrio con el aire y curvas de evaporación, como en forma líquida, a través de la absorción del agua procedente de una superficie libre o de una película depositada sobre el material, o bien, mediante **absorción** por inmersión progresiva, completa, a ebullición, a presión elevada, reducida o por **capilaridad**. Los ensayos de absorción por inmersión y los de capilaridad pueden convertirse en ensayos cinéticos en los que se estudia la evolución del contenido de agua con el tiempo. El conocimiento del sistema poroso se hace más necesario si han de aplicarse tratamientos que deben penetrar en la piedra.

Los métodos que determinan las **propiedades mecánicas** del conjunto de la piedra (resistencia a la flexión, compresión, tracción y adherencia) tienen el inconveniente de tratarse de ensayos destructivos que necesitan probetas relativamente grandes y en número elevado. No obstante, la determinación de las características de transmisión del sonido y de la frecuencia de resonancia son técnicas no destructivas que dan información indirecta sobre la calidad de la piedra, alteraciones

Composición química

La naturaleza química de la piedra está muy ligada a su alterabilidad. Así, por ejemplo, las piedras calizas, de carácter básico, son más reactivas frente al medio ambiente urbano, normalmente ácido, que las silíceas. Deben analizarse los componentes mayoritarios (SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃ y pérdida



no visibles y propiedades elásticas. Las **propiedades mecánicas superficiales** de la piedra están ligadas a la dureza superficial, que puede relacionarse con la dureza por penetración, rebote, rayado y desgaste.

Factores extrínsecos

Una vez conocida la naturaleza de la piedra, es necesario estudiar los factores externos que pueden originar cambios en sus propiedades. Éstos pueden ser **naturales** o antropogénicos, siendo la contaminación atmosférica la principal causante de la aceleración que han experimentado los procesos de degradación, sobre todo a partir de la revolución industrial.

Climatología

El Instituto Nacional de Meteorología y los Ayuntamientos proporcionan datos climatológicos de la zona pero, en casos concretos, puede que sea necesario hacer un estudio del microclima en el propio monumento. De los datos térmicos lo que más interesa conocer son las oscilaciones entre máximos y mínimos, los máximos en verano, y si se alcanzan en invierno temperaturas inferiores a -4°C , que es cuando comienzan los fenómenos de heladicidad. Las oscilaciones de humedad son importantes cuando intervienen procesos de hidratación-deshidratación de sales. También hay que conocer las velocidades y orientaciones de los vientos, sobre todo de los dominantes, y la pluviometría.

FACTORES EXTRÍNSECOS

| Fuente | Información |
|---------------------------|-----------------------|
| Clima y microclima | Oscilaciones térmicas |
| Contaminación atmosférica | Heladicidad |
| Agentes biológicos | Reacciones químicas |
| Otros factores | Presencia de sales |

Medio ambiente

También en este caso será necesario completar los datos de contaminación atmosférica suministrados por los Servicios de Medio Ambiente locales o regionales con medidas efectuadas en el ambiente próximo al monumento. De los gases interesa conocer, especialmente, el **anhídrido sulfuroso**, causante principal del ataque ácido, los **óxidos de nitrógeno** y los **compuestos orgánicos**, que intervienen en la formación del smog fotoquímico y en la producción de contaminantes secundarios, es decir, originados por reacciones en la atmósfera; en zonas cercanas a plantas de tratamientos de residuos urbanos o de fabricación de fertilizantes, el **amoníaco**, de actividad catalítica y modificador del pH.

De las partículas sólidas, lo más importante es la cantidad de **polvo sedimentable**, que se deposita directamente sobre la piedra, pero también el **polvo en suspensión** participa catalizando reacciones atmosféricas. Las sustancias más activas de los depósitos son los ácidos, las sales solubles y los elementos catalizadores como hierro, vanadio y carbono.

De la **humedad ascendente** interesa, sobre todo, el contenido de sales, por lo que es deseable disponer de análisis de agua del subsuelo.

Agentes biológicos

Se consideran aquí desde microorganismos, bacterias, algas, hongos... hasta plantas superiores y animales. Las bacterias más importantes son las autótrofas implicadas en los ciclos del azufre y del nitrógeno. La acumulación de agentes en lechos espesos provocan retenciones de humedad y favorecen las reacciones químicas. Las raíces de las plantas superiores ejercen una acción mecánica y sus exudados a veces son ácidos. El guano de palomino contiene ácidos fosfórico y nítrico, y acumula humedad.

Otros factores

Por último, otros factores que pueden intervenir en la alteración son los **de tensión**, entre los que se incluye el labrado de la piedra, su forma de colocación en la obra, las cargas que recibe; los **de incompatibilidad**, como la unión de materiales de diferentes coeficientes de dilatación o el embutido en la piedra de elementos metálicos oxidables; y los **de uso**, cajón de sastre donde se incluyen el resto de los factores como la situación geográfica (por ejemplo, proximidad al mar), estructura urbana de la zona, vibraciones, y todos los relacionados con el uso y abuso del monumento (entre los que hoy día no es desdeñable el de las visitas masivas).

Determinación de los mecanismos de alteración

Se entiende por mecanismos de alteración los procesos que se originan en la piedra cuando sobre ella actúan los factores de alteración y que conducen a cambios en sus propiedades o indicadores de alteración. Por ejemplo, la acción conjunta de la presencia de sales y de las oscilaciones de humedad produce cambios de volumen en los capilares e intersticios que pueden conducir a rupturas internas o a desagregaciones. Estos mecanismos pueden agruparse en

- cambio de volumen en capilares e intersticios
- cambio de volumen en la masa pétreo
- disolución de la piedra y reacción química
- actividad biológica

Aunque esta formulación parece sencilla, este tema, sin embargo, es el gran desconocido en el estudio de la alteración de la piedra. Se pueden conocer y cuantificar los factores, se pueden medir los cambios de propiedades, pero es difícil conocer con exactitud los mecanismos que han ocurrido. Por ello, en investigación se ha recurrido a la realización de **experiencias de alteración** en las que las piedras son sometidas de forma controlada a diversos factores de alteración y se estudian los cambios producidos. El objetivo ideal es reproducir los mismos mecanismos que tienen lugar en el monumento para así poder inhibirlos a través de los tratamientos adecuados; inhibición que siempre habrá de corroborarse repitiendo las experiencias con la piedra tratada. Las dos dificultades que impiden alcanzar este ideal son, por un lado, la com-



plejidad de factores simultáneos que intervienen en la realidad y, por otro, la necesidad de obtener resultados en un tiempo razonable, lo que obliga a realizar las experiencias de forma acelerada, y esta intensificación en los agentes de alteración podría dar lugar a mecanismos diferentes.

Experiencias de alteración acelerada

Las distintas experiencias se pueden agrupar en cinco tipos:

- a. Experiencias de heladicidad
- b. Experiencias de cristalización de sales
- c. Ciclos termohigrométricos con y sin radiación UV
- d. Ataque químico con soluciones
- e. Experiencias en atmósferas contaminadas

EXPERIENCIAS DE ALTERACIÓN ACELERADA

| Fuente | Información |
|---|--|
| Experiencias de heladicidad | Mecanismos de alteración |
| Experiencias de cristalización de sales | Alterabilidad de la piedra |
| Ciclos termohigrométricos c/s radiación | Tipos de tratamientos recomendados |
| Ataque químico con soluciones | Efecto inhibitor de los tratamientos |
| Experiencias en atmósferas contaminadas | Efecto perjudicial de los tratamientos |

a. Experiencias de heladicidad

Este tipo de experiencias pretenden reproducir los mecanismos de incremento de volumen en poros e intersticios debidos a la expansión que se produce al congelar el agua. Consisten en una serie de ciclos, cada uno de los cuales incluye una fase de hielo y otra de deshielo. En la primera, la muestra saturada de agua se somete durante unas horas a temperaturas del orden de -15 a -25°C . La fase de deshielo puede tener lugar en aire o en agua, a temperaturas que van desde 1°C a temperatura ambiente.

La duración del ensayo depende de que se adopte el criterio de conseguir alteraciones macroscópicas o de seguir la evolución de ciertas propiedades, que se controlan después de cada ciclo. Para evaluar los resultados se efectúan una serie de medidas: pérdida de peso, observación visual o al microscopio de la aparición de grietas o fisuras, módulo de elasticidad, frecuencia de resonancia, etc.

b. Experiencias de cristalización de sales

El fundamento de este ensayo consiste en inducir sucesivamente la solubilización y la cristalización de una sal en el interior de las probetas. Esto se logra sometiendo las muestras a una fase de impregnación con una solución y a otra posterior de secado, repitiéndose este ciclo un número determinado de veces.

La sal más frecuentemente utilizada es sulfato sódico, y también, aunque con menor frecuencia, cloruro sódico, sulfato cálcico, sulfato amónico, bisulfato amónico, etc. El sulfato sódico puede cristalizar en forma hidratada con diez moléculas de agua, experimentando un aumento de volumen del 300% respecto de la sal anhidra, por lo cual es particularmente adecuado para simular las tensiones que se producen en el interior de la piedra como consecuencia de las cristalizaciones.

El número de ciclos depende del tipo de muestras y del grado de alteración que se desee alcanzar. La evaluación de los resultados suele hacerse por examen visual de las probetas, variación de peso y de porosidad o porometría. Cuando se evalúan tratamientos puede medirse alguna propiedad conferida por los mismos, por ejemplo, la hidrofugación.

c. Ciclos termohigrométricos y de radiación

Las experiencias termohigrométricas estudian los mecanismos producidos por variaciones de temperatura y de humedad relativa. Estas experiencias son muy poco severas y por tanto de gran duración, ya que la mayoría de las piedras se alteran muy lentamente en estas condiciones, por lo que su mayor utilidad está en la evaluación de los tratamientos.

Las experiencias de radiación se usan conjuntamente con los ciclos termohigrométricos y también están orientados a la evaluación de tratamientos, fundamentalmente de tipo orgánico. La radiación que se utiliza es exclusivamente la ultravioleta.

d. Ataque químico

Los contaminantes atmosféricos ejercen un efecto considerable sobre la velocidad de alteración de los materiales pétreos; los más perjudiciales son los gases ácidos capaces de reaccionar con los componentes de las piedras calizas. Una primera aproximación para reproducir en el laboratorio los mecanismos implicados consiste en simular el ataque químico con soluciones ácidas. Estas soluciones contienen en la mayoría de los casos ácido sulfúrico en distintas concentraciones y las muestras se someten a inmersión en la solución o a lluvia.

e. Experiencias en atmósferas contaminadas

Las experiencias en atmósferas contaminadas están más próximas a la realidad, que las de inmersión. La mayoría de las experiencias se realizan en cámaras con aire contaminado por anhídrido sulfuroso en concentraciones que van desde algunas ppm a varios miles, en función del grado de aceleración deseado. Otros contaminantes utilizados son óxidos de nitrógeno, ácido fluorhídrico, nieblas salinas, compuestos orgánicos, etc. También se pueden introducir radiaciones ultravioletas y lluvia.

Evaluación de tratamientos

La última etapa en el proyecto es la propuesta y evaluación de tratamientos. La evaluación, previa a la aplicación, de los distintos tipos de tratamientos puede realizarse de dos formas:

- efectuando aplicaciones controladas en pequeñas áreas del monumento y determinando los efectos que se producen (con ayuda de las distintas técnicas de análisis).
- aplicando los tratamientos a probetas de los materiales de los materiales pétreos existentes en el edificio y someténdolas a experiencias de alteración acelerada para determinar su eficacia y alterabilidad.

En algunos casos (tratamientos de limpieza o biocidas), la segunda opción no es posible, por lo que debe recurrirse a realizar pruebas in situ. Para los consolidantes e hidrófugos, es deseable siempre realizar ensayos previos en laboratorio, donde se reproduzcan los mecanismos de alteración observados en el edificio.

Los tipos de tratamientos a realizar serán los siguientes:

Limpieza, con la que se pretende eliminar tanto el material que se haya depositado sobre la piedra (p.e. partículas carbonosas) como el que proceda de transformaciones químicas de los constituyentes de la misma (p.e. yeso).

Los distintos métodos pueden recogerse en cinco grupos: con agua (sola o con jabones), con productos químicos, limpieza abrasiva, limpieza mecánica, y limpieza con láser.

Eliminación de organismos, con el uso de productos biocidas se eliminarían los distintos tipos de organismo, micro y macroscópicos, que constituyen un importante factor de alteración. Fundamentalmente están formulados a base de compuestos orgánicos, ácidos y oxidantes.

Consolidación, cuya finalidad es devolver la cohesión a la piedra que la ha perdido. Los productos consolidantes pertenecen a tres grupos: inorgánicos, organosilícicos (monómeros, prepolímeros, polímeros), y orgánicos (monómeros y especialmente polímeros).

Hidrofugación, llamada también protección, ya que su objetivo es impedir (o al menos disminuir) la entrada de agua líquida en la piedra, con lo cual ésta queda protegida frente a la mayoría de los factores de alteración, que necesitan el concurso del agua para actuar. Los hidrófugos se agruparían en: organometálicos, organosilícicos (monómeros, prepolímeros, polímeros), y orgánicos (monómeros y especialmente polímeros).

Programa de seguimiento

Debería tenerse previsto un programa de seguimiento del comportamiento de los materiales tras la intervención, especialmente cuando se hayan aplicado productos de tratamiento, dado que la vida útil de cualquiera de ellos es limitada. Fundamentalmente se basará en inspecciones periódicas del edificio, realizando algunas determinaciones in situ que permitan valorar el estado de los materiales tratados, por ejemplo, medida de la velocidad de ultrasonidos en zonas consolidadas, para valorar la pérdida de propiedades mecánicas, determinación de la absorción de agua in situ en las zonas hidrofugadas, observación al microscopio electrónico de muestras tratadas para comprobar si la película de producto se altera.

Un programa de seguimiento de este tipo permitiría corregir las alteraciones que se vayan produciendo en sus etapas iniciales (por tanto de forma menos costosa), y sobre todo, proporcionaría una información muy valiosa para futuras intervenciones en el mismo edificio o en otros que se encuentren sometidos a condiciones semejantes o que estén contruidos con materiales del mismo tipo.

Bibliografía

ALCALDE, M., Villegas, R., Vale, J.F., Martín, A.: *Diagnosis y tratamiento de la piedra*. CSIC/ICCET, Monogr. n° 400, Madrid 1990.

ANGELIS D'Ossat, G.: *Guide to the methodical study of monuments and causes of their deterioration*. ICCROM, Rome, 1982.

DOMALOWSKI, W.: *La conservation préventive de la pierre*. UNESCO, 1982.

MARTÍN, A.: *Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico artístico*. Ceura, Madrid, 1990.

TOMBACH, I.: *Measurement of local climatological and air pollution factors affecting stone decay*. Conf. Nat. Ac. Sc. Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments. 2-4/III/1981.

VALE, J. F., Martín, A.: *Ensayos de materiales en atmósferas controladas*. Universidad de Sevilla, 1985.

TORRACA, G.: *Porous Buildings Materials Science for Architectural Conservation*. ICCROM. Rome, 1982.