

ACTAS DE LA JORNADA TÉCNICA

Tratamientos de **CONSERVACIÓN** aplicados a **MATERIALES PÉTREOS** en **CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS**



C Á C E R E S

26 DE ABRIL DE 2007


intromac

ACTAS DE LA JORNADA TÉCNICA

Tratamientos de **CONSERVACIÓN**
aplicados a **MATERIALES PÉTREOS**
en **CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS**

C Á C E R E S

26 DE ABRIL DE 2007



JORNADA TÉCNICA SOBRE TRATAMIENTOS
DE CONSERVACIÓN APLICADOS A MATERIALES
PÉTREOS EN CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

Edita:

Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales
y Materiales de Construcción - INTROMAC

Fotografía de cubierta:

Isidro Álvarez - Tecnigraf, S.A.

Dep. Legal: BA-256/2007

Diseño e impresión:

Tecnigraf, S.A.
Manuel Sánchez Barriga, 5
Tel. 924 286 006
06006 Badajoz

Badajoz, 2007

Introducción

El contenido de esta publicación recoge las ponencias de la Jornada Técnica sobre “Tratamientos de conservación aplicados a materiales pétreos en construcciones históricas”, celebrada en el Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC), en abril de 2007. Esta acción formativa está enmarcada en la línea de Desarrollo y mejora de materiales, productos y sistemas para conservación y rehabilitación del patrimonio construido, que la OTRI (Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación) de INTROMAC contempla en su Plan de Actuación Ordinario.

Los objetivos generales de este Plan son:

- Captar informaciones, oportunidades tecnológicas y mejores prácticas localizadas a nivel nacional en el área de patrimonio y difundirlas al Sistema Extremeño de Innovación.
- Fomentar la creación de redes, plataformas, acuerdos, convenios y otros mecanismos de colaboración e interacción permanente con un objetivo común “Conservación y rehabilitación del patrimonio construido”.
- Aumentar la capacidad de asimilación y de innovación de las empresas extremeñas vinculadas a la tecnología y a la innovación del sector de Patrimonio.
- Fomentar la participación de todos los agentes involucrados en el sector del Patrimonio en actividades de I+D+i.

En concreto, esta Jornada persigue ampliar y mejorar los niveles de formación y cualificación profesional en el amplio campo de la intervención en el Patrimonio Histórico Artístico, centrandó dichos conocimientos en el análisis, la restauración y la puesta en valor de la piedra monumental.

Esta publicación será de interés para profesionales de la piedra, restauradores, constructores, arquitectos técnicos y aparejadores, arquitectos, ingenieros técnicos de obras públicas, historiadores y arqueólogos, licenciados en arte, restauradores, en definitiva, todos los profesionales que intervienen en el proceso multidisciplinar de la restauración y la rehabilitación monumental.

ACTAS

Jornada Técnica sobre Tratamientos
de Conservación Aplicados a Materiales
Pétreos en Construcciones Históricas

JORNADA TÉCNICA

Tratamientos de
CONSERVACIÓN
aplicados a MATERIALES
PÉTREOS en
CONSTRUCCIONES
HISTÓRICAS



C Á C E R E S

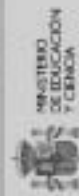
26 DE ABRIL DE 2007

ORGANIZA



JUNTA DE EXTREMADURA
Comisión de Infraestructuras y Desarrollo Tecnológico

PATROCINA



LUGAR Y FECHA DE CELEBRACIÓN

SALÓN DE ACTOS DE INTROMAC
Instituto Tecnológico de Rocas
Ornamentales y Materiales de
Construcción.

26 de abril de 2007

HORARIO: 8,30 a 14,00 h.

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES

INTROMAC

Avda. de la Universidad, s/n.
Apdo. de Correos, 135.
Cáceres 10071
www.intromac.com
Tel. 927 181 042
Fax 927 181 041



OBJETIVO

Ampliar y mejorar los niveles de formación y cualificación profesional en el amplio campo de la intervención en el Patrimonio Histórico Artístico, centrándose dichos conocimientos en el análisis, la restauración y la puesta en valor de la piedra monumental.

DIRIGIDO A

Este curso está dirigido a profesionales de la piedra, constructores, arquitectos técnicos y apañajadores, arquitectos, ingenieros técnicos de obras públicas, historiadores y arqueólogos, licenciados en arte, restauradores y todos los profesionales que intervienen en el proceso multidisciplinar de la restauración y la rehabilitación monumental.

P R O G R A M A

08,30 h. - 9,00 h.

Recepción de participantes y entrega de documentación

09,00 h. - 09,15 h.

Apertura y Presentación de la Jornada

Ilmo. Sr. D. Francisco Páez Urbán. Director General de Patrimonio Cultural de la Consejería de Cultura de la Junta de Extremadura

D^a Carmen M^a Felipe Llanos. Directora General de INTROMAC

09,15 h. - 10,00 h.

La alteración de la piedra en los monumentos

D. Manuel Alcalde Moreno. Profesor Escuela Superior Ingenieros

10,00 h. - 10,45 h.

Factores, mecanismos e indicadores de alteración en los materiales pétreos

D. Manuel Alcalde Moreno. Profesor Escuela Superior Ingenieros

10,45 h. - 11,15 h.

Café

11,15 h. - 12,00 h.

Técnicas y productos para el tratamiento de materiales pétreos.

D^a Rosario Villegas Sánchez. Profesora Escuela Superior Ingenieros

12,00 h. - 13,00 h.

Ensayos y técnicas para evaluar la eficacia de los tratamientos.

D^a Rosario Villegas Sánchez. Profesora Escuela Superior Ingenieros

13,00 h. - 14,00 h.

Experiencias en la rehabilitación de edificios

-Rehabilitación de la Catedral de Coria (Cáceres). D. Manuel

Viola Nevado y D^a Isabel García Jiménez. Arquitectos.

-Rehabilitación de la Muralla de San Miguel Alto de Granada.

Premio Arquitectura Piedra 2006. D. Michele Panella.

Arquitecto del Estudio de Antonio Jiménez Torrecillas

-Proyecto Alba Plaza. Estudio de los materiales del Acueducto

de los Milagros de Mérida (Badajoz). D. José M^a Avila Macías.

Director de la División de I+D+i de INTROMAC.

BOLETÍN DE INSCRIPCIÓN

DATOS DEL ASISTENTE

Empresa.....

Nombre y apellidos.....DNI.....

Cargo.....

Dirección.....Población.....

C.P.....Provincia.....

Teléfono.....Fax.....

E-mail.....

DATOS FACTURACIÓN

Empresa.....

CF.....

Dirección.....

C.P.....Población.....

Provincia.....

¿Su empresa es ASOCIADO DE INTROMAC? SI NO

En Cáceres a..... de..... de 2007

Firma:.....

NOTA: No se aceptan las inscripciones en las que no estén cumplimentados todos los

datos de facturación y el DNI del asistente. La organización devolverá el importe siempre

y cuando se entregue la base 1.4 del curso del curso del curso a pasado.

La entrega de las plazas se realizará por rigurosa orden de inscripción al ser

plazas limitadas.

El pago de curso se realizará una vez confirmada la inscripción y antes del inicio del mismo

Coste de inscripción

Costa General de Inscripción.....60 € (IVA Incluido)

Costa ASOCIADOS

DE INTROMAC.....28 € (IVA Incluido)

Cómo dar pago

Ingreso en el siguiente nº de cuenta

IBAN-ES17-2099-0202-79-0070049947

Indicando en la transferencia el nombre del asistente

y la clave CTD

Remitir antes del día 24 de abril de 2007

INTROMAC

Avenida de la Universidad, s/n. Apdo. de Correos. 135.

Cáceres 10071 • www.intromac.com

Tel. 927 181 042 • Fax 927 181 041

E-mail: informacion@intromac.com

JORNADA TRATAMIENTOS DE CONSERVACION APICADOS A MATERIALES PÉTREOS EN CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

26 DE ABRIL DE 2007



Índice

La alteración de la piedra en los monumentos <i>Manuel Alcalde Moreno</i>	13
Factores, mecanismos e indicadores de alteración en los materiales pétreos <i>Manuel Alcalde Moreno</i>	29
Consolidantes e hidrófugos. Productos para el tratamiento de materiales pétreos <i>Rosario Villegas Sánchez</i>	35
Ensayos y técnicas para evaluar la eficacia de los tratamientos <i>Rosario Villegas Sánchez</i>	49

*La alteración de la piedra
en los monumentos*

MANUEL ALCALDE MORENO

Profesor Titular de Universidad
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla

1. LA ALTERACIÓN DE LA PIEDRA

Entendemos por ALTERACIÓN el cambio de propiedades que experimenta la piedra cuando, ante variaciones del medio que la rodea, evoluciona hacia situaciones de nuevo equilibrio. Cuando la alteración conduce a una pérdida de propiedades, la llamamos DEGRADACIÓN.

Existe una alteración natural, debida a los cambios climáticos que se producen en el medio ambiente, que siempre está subyacente. Pero desde la revolución industrial, se han incorporado factores antropogénicos, sobre todo contaminación ambiental, que han hecho que los procesos de deterioro incrementen su velocidad alarmantemente. Ya en los años ochenta se decía que en cincuenta años los monumentos habían sufrido un deterioro mayor que en los quinientos anteriores.

En el proceso de alteración intervienen FACTORES que producen MECANISMOS que conducen a cambios en las propiedades de ésta o INDICADORES de alteración.

Los indicadores son lo primero que vemos al estudiar un monumento y nos informan de la naturaleza e intensidad de los factores y mecanismos, nos dan una visión del estado de conservación del monumento. El estudio de los factores y mecanismos nos conducirá a la selección de las medidas correctoras adecuadas.

En la tabla siguiente se dan algunos ejemplos de la relación entre los factores, mecanismos e indicadores de alteración.

Factores alteración	Mecanismos alteración	Indicadores alteración
Humedad con presencia de sales y viento	Incremento de volumen en poros e intersticios	Picados Alveolizaciones
Humedad ascendente con sales disueltas, sin viento	Cristalización de sales	Eflorescencias Subflorescencias
Anhídrido carbónico atmosférico y lluvia	Solubilización de los carbonatos	Costra calcín Concreciones
Contaminación atmosférica con óxidos de azufre	Ataque químico	Costra sulfín Disyunción de placas Arenizaciones
Naturaleza esquistosa de la piedra	Tensiones por diferencias de temperatura o presión	Exfoliaciones

2. INDICADORES DE ALTERACIÓN DE LA PIEDRA

Nos referiremos a los indicadores visuales de alteración, cambios en las propiedades del material, apreciables a simple vista, que permiten evaluar cualitativa o semicuantitativamente la alteración sufrida.

La alteración de la piedra de los monumentos concierne a muchos especialistas: geólogos, químicos, físicos, biólogos, arquitectos, ingenieros, restauradores, historiadores, etc. Todos ellos tienen sus propias ideas acerca de la alteración de la piedra y su preservación, e incluso cada científico ha desarrollado su propia terminología. En la bibliografía de los ochenta aparecían muchos términos con gran cantidad de ambigüedades, confusiones y generalizaciones, lo que hacía necesaria una sistematización y definición de los mismos que permitiese el uso de un mismo lenguaje. La terminología aquí propuesta está basada en un amplio estudio bibliográfico y ya ha sido aceptada por la gran mayoría de expertos interesados en la conservación de monumentos. Los términos, además de en castellano, se dan en inglés, italiano y francés.

La siguiente tabla expresa cómo se han clasificado los indicadores, de acuerdo con su morfología y forma de afectar al material pétreo, en seis grandes apartados:

- TÉRMINOS GENÉRICOS
- MODIFICACIONES SUPERFICIALES
- ELIMINACIÓN DE MATERIA
- DEFORMACIONES
- RUPTURAS
- DISYUNCIONES

INDICADORES VISUALES DE ALTERACIÓN

Términos genéricos		
Alteración	Alteración atmosférica	Corrosión
Alteración diferencial	Meteorización	Descomposición
Degradación	Alteración antropogénica	Decohesión
Ruina	Alteración de conjuntos	Bioalteración

Modificaciones superficiales

ALTERACIÓN CROMÁTICA	COSTRAS	DEPÓSITOS
Cromatización	Costra	Depósito superficial
Limonitización	Calcín	Concreción
Tinción	Sulfín	Incrustación
Moteado	Biocostra	Eflorescencia
Pátina		Subflorescencia
Patinaura		Criptoflorescencia

Eliminación de materia

CON FORMACIÓN DE HUECOS

ACCIONES MECÁNICAS EXTERNAS	ACCIONES FISICOQUÍMICAS	VARIAS ACCIONES SIMULTÁNEAS
Excoriación	Cavernas	Cancerización
Estriado	Alveolización	
Acanalación	Picado	
Vermiculación	Excavación	

SIN FORMACIÓN DE HUECOS

ACCIONES MECÁNICAS	DECOHESIONES
Erosión	Desagregación
Corrasión	Disgregación
Abrasión	Arenización
	Pulverización

Deformaciones

Rupturas

Disyunciones

Hinchamiento	Fracturación	Separación de placas
Combamiento	Fisuración	Exfoliación
Ampollas	Fragmentación	Descamación
		Separación de películas

2.1. Términos genéricos

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

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

— **Alteración** (alteration; alterazione; altération).

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

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

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

— **Degradación** (degradation; degradazione; dégradation).

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

— **Ruina** (ruin; ruina, sfacimento; ruine, délabrement).

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

— **Alteración antropogénica** (antropogenic alteration; alterazione antropogenica; alteration antropogenique).

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

— **Alteración atmosférica** (weathering; alterazione atmosférica; altération atmosphérique).

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

— **Meteorización** (meteorisation; meteorizzazione; météorisation).

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

— **Alteración de conjuntos de piedra** (alteration of stone assemblages; alteraciones da conglimentos di piedra; altération des assemblages de pierre).

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

— **Corrosión** (corrosión; corrosione; corrosión).

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

— **Descomposición** (decomposition; decomposizione; décomposition).

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

— **Decohesión** (decohesion; decoesione; décohesion).

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

2.2. *Modificaciones superficiales*

Se trata de una serie de manifestaciones superficiales de alteración que afectan, esencialmente, al aspecto exterior de la piedra, sin provocar generalmente modificaciones importantes del material subyacente. Son esencialmente de tres tipos: variaciones

cromáticas (cromatización, moteado y pátina), costras y depósitos (depósitos superficiales, concreciones y depósitos de sales).

— **Cromatización** (Chromatic alteration; alterazione cromatica; altération chromatique).

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

— **Moteado** (spotting; spotting, macchie; moucheté).

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

— **Limonitización** (limonitisation; limonitizzazione; limonitisation).

Amarilleamiento por transformación de óxidos de hierro en limonita.

— **Tinción** (stain; tingitura; teinture).

Alteración cromática producida por la asunción de materiales coloreados; es muy frecuente la tinción producida por el lavado, desplazamiento y deposición sobre la superficie de la piedra de óxidos metálicos procedentes de la corrosión de elementos (rejas de ventanas, clavos, barandillas, etc.).

— **Pátina** (patina; patina; patine).

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

— **Costra** (crust; costra; croute).

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

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

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

— **Concreción** (concretion; concrezione; concrétion).

Alteración que implica la presencia en la superficie de la piedra de una masa más o menos compacta, dura y adherente, formada por depósito o desecación. Cuando

dicho depósito aparece como embutido en la superficie recibe el nombre de **incrustación** (incrustation; incrostazione; incrustation).

— **Eflorescencias** (efflorescence; efflorescenza; efflorescence).

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

— **Subflorescencias** (subflorescence; subflorescenza; subflorescence).

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

— **Criptoflorescencias** (criptoflorescence; criptoflorescenza; criptoflorescence).

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

2.3. Eliminación o pérdida de materia

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

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

2.3.1. Con formación de huecos

a) Acciones mecánicas externas

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

Las manifestaciones más importantes de estas acciones mecánicas externas son:

— **Excoriación** (excoriation; scoriation; écorchure).

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

— **Estriado** (striction; striato; striure, pelade).

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

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

— **Acanalación**, para surcos grandes y estrías vermiculares.

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

b) Acciones fisicoquímicas

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

Entre estos indicadores de alteración los más característicos son:

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

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

— **Alveolización** (alveolar erosion; alveolizzazione; alvéolisation).

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

— **Picado** (pitting; pizzicato; piqúres).

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

— **Excavación** (excavation; scavazione; excavation).

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

c) Varias actuaciones simultáneas

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

— **Cancerización** (chancre; chancro; chancre).

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

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

2.3.2. Sin formación de huecos

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

a) Acciones mecánicas

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

— **Erosión** (erosion; erosione; érosion).

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

— **Corrosión** (corrasion; corrasione; corrasion).

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

b) Pérdida de cohesión intergranular (Ver decohesión)

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

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

— **Desagregación** (disaggregation; desaggregazione; désagregation).

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

— **Disgregación** (disgregation; disgregazione; disgrégation).

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

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

— **Arenización** (grain disgregation; arenazione; désaggregation sableause).

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

— **Pulverización** (pulverization; pulverizzazione; poudroiment).

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

2.4. Deformaciones

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

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

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

a) La deformación es un hecho aislado

— **Hinchamiento** (swelling; rigongiamento; bouffement, boursoufflement).

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

— **Combamiento o alabeamiento** (warping; piegamento; goudolement).

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

b) Formación conjunta de varias deformaciones

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

En general, pueden denominarse a estos abultamientos ampollas.

— **Ampollas** (blistering; ampollas; ampoules).

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

2.5. Rupturas

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

Las rupturas pueden considerarse como accidentes mecánicos en la piedra que crean discontinuidades en la misma y no entrañan pérdidas de material; son más o menos perpendiculares a la superficie. Estas discontinuidades en la piedra pueden producir una mayor o menor separación de partes; mientras que la fractura no implica separación de las partes, en la fisura ésta es ya más o menos completa.

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

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

— **Fracturación** (cracking; fratturazione; fracture).

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

— **Fisuración** (fissuring; fissurazione; fissurement).

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

— **Fragmentación** (spalling; frammentazione; effritement).

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

2.6. *Disyunciones*

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

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

Hojas de exfoliación: varias láminas delgadas, superpuestas, de espesor uniforme, generalmente del orden del milímetro.

Películas: pequeñas láminas muy delgadas.

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

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

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

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

— **Exfoliación** (exfoliation, peeling; esfoliazione; exfoliation).

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

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

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

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

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

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

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDE, M.; MARTÍN, A. *Indicadores de alteración de los materiales pétreos. Propuesta de una terminología. PH*, Boletín Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, ISSN 1136-1867, 1996, IV (15), 68-74.

ALCALDE, M.; VILLEGAS, R. *Guía para el estudio de la alteración de la piedra de los monumentos y medidas de conservación. PH*, Boletín Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, ISSN 1136-1867, 1996, IV (15), 62-67.

ARNOLD, A; JEANETTE, D; ZEHNDER, K. *Proposal for a terminology of weathering phenomena on building stones*. Meeting of Petrology Group of ICOMOS. Strasburg, 1980.

ASTM C 119-74: *Standard definitions of terms relating to natural building stones*.

ASTM D 653-78: *Standard definitions of terms and symbols relating to soil and rock mechanics*.

BEACOURT, F. DE; JATON, C. *Les types d'alteration des roches calcaires.- Les monuments historiques de la France*, 65, rue St. Antoine, Paris, Numéro special hors série, 14-32, 1975.

DOMASLOWSKI, W. *La conservation préventive de la pierre*. UNESCO. Musées et Monuments, XVIII, 1982.

ESBERT, R; MARCOS, R. *La deterioración de las piedras de la Catedral de Oviedo. 2ª parte: formas y fenómenos de alteración*. Materiales de la Construcción 186, 79-88, 1982.

FANCELLI, P. *Il Progetto di Conservazione*. Ed. Guido Guidotti. Roma, 1983.

HENAU (DE), P. *Approche d'une terminologie descriptive de l'état de surface des matériaux pierreux*. Bulletin Institut Royal de Patrimoine Artistique, Bruxelles, XVIII, 170-182, 1980-1981.

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

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

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

NORMAL (Normativa Manufatti Lapidei, CNR-ICR, Italia) I/80: *Alterazioni macroscopiche de material lipidei: Lessico.*

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

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

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

Stone-Catalog: Building Stone Institute. *Glossary of Terms,* New York, 1968/69.

ZEHNDER, K. *Weathering of molasse sandstones on monuments and natural outcrops.* Proc. 3rd Int. Cong. Deterioration and Preservation of Stones, Venice, 2427/X/1979.

*Factores, mecanismos
e indicadores de alteración
en los materiales pétreos*

MANUEL ALCALDE MORENO

Profesor Titular de Universidad
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla

1. FACTORES DE ALTERACIÓN

1.1. Factores intrínsecos

Composición química:

- Las de carácter básico (calizas) más reactivas (el medio suele ser ácido) que las ácidas (silíceas); con éstas pueden reaccionar los álcalis provocando expansiones.
- Sales solubles (SO, Cl⁻, NO, Na⁺, K⁺) —> alterabilidad.
- Sales ferrosas hidrolizan con)V —> *disyunción placas*.
- Ión ferroso se oxidan a férrico —> *cromatizaciones*.

Características petrográficas: origen sedimentario, metamórfico, ígneo.

— Textura:

- Relaciones espaciales minerales

Granulometría.

Unión intergranular: cristalinas (mármoles, granitos, pizarras) cementadas (areniscas, calizas, conglomerados).

Anisotropías (estratos bidimensionales pizarras).

- Configuración del sistema poroso

Tipo: fisurado (espacios planares: mármoles, granitos; % porosidad < 1%, alta permeabilidad).

Tipo poroso (bulbos interconectados por gargantas: areniscas, calizas; > porosidad, permeabilidad heterogénea).

Tamaño, forma, interconexión. Porosidad abierta.

- Fisuras (tipo, densidad, localización)

- Minerales (quimismo): Especies, estructuras, grado de deterioro, contacto entre fases de diferente comportamiento

Propiedades físicas:

- Densidad, dureza, mód. elasticidad, coef. dilat., conduct. térmica.
- Movimiento del agua: porosidad, porometría, permeabilidad.

1.2. Factores extrínsecos

1.2.1. Factores ambientales

El **agua** es el más importante, se relaciona con todos los factores.

Térmicos:

- Oscilaciones de T.
- T máximas y mínimas.

Hidráulicos:

- Higroscopicidad.
- Condensación.
- Ascenso capilar.
- Lluvia.

Viento:

- Acciones mecánicas.
- Evaporación.
- Aporte de sales.

Composición del aire (natural):

- CO₂, NH₃, O₂

Contaminación atmosférica:

- Anhídrido sulfuroso.
- Anhídrido carbónico.
- Óxidos de nitrógeno.
- Gases orgánicos.
- Amoniaco.
- Aerosoles.

Presencia de sales.**Otros.**

1.2.2. Factores biológicos

Microorganismos: bacterias quimioautótrofas (se nutren de comp inorg) aerobias implicadas en los ciclos del azufre y del nitrógeno; además, aportan la materia orgánica necesaria para el asentamiento de otros microorganismos heterótrofos (se nutren de otros que les proporcionan sust org) como hongos y líquenes.

Plantas superiores: acción mecánica de raíces; exudados ácidos.

Animales: palomas: guano contiene H_3PO_4 y HNO_3 y retiene humedad (sedal).

1.2.3. Factores de tensión

Al ser extraídas las piedras de las canteras sufren una descompresión que puede generar tensiones residuales que se sumen a las cargas que reciben en el edificio.

Cargas del edificio, empujes viento, taludes.

1.2.4. Factores de incompatibilidad

Interacciones físicas: diferentes coeficientes de expansión térmica, hinchamientos por oxidación de metales embutidos en la piedra, etc.

Interacciones químicas: migración de sales, cromatizaciones por migración de cationes, etc.

1.2.5. Factores de uso

Se engloban en este apartado desde los derivados del **proyecto** de ejecución, **situación geográfica**, diseño y orientación del edificio, hasta los **labrados** de la piedra, **tratamientos** de conservación, reparaciones, etc. En muchas ocasiones, los remedios han sido mucho peores que la enfermedad.

2. MECANISMOS DE ALTERACIÓN

2.1. Abrasión externa

Remoción de materia por rozamiento (*excoriaciones*), viento (*corrasiones*), chorros de agua (*excavaciones*).

2.2. Cambio de volumen de la piedra

Dilataciones diferenciales debido a la baja conductividad térmica o a coeficientes de dilatación diferenciales (*fisuras, fracturas, fragmentaciones, disyunciones*).

2.3. Cambio de volumen en capilares e intersticios

Gelivación, cristalización, hidratación, deshidratación (*eflorescencias, picado, alveolización, cavernas, arenización*).

2.4. *Disolución y cambio químico*

Humectación-secado (*costras, decohesiones, disyunciones*).

Carbonatación (*calcín*).

Hidrólisis de silicatos (*decohesiones, fisuras, fragmentaciones*).

Corrosión (*limonitización, sulfín, arenización*).

2.5. *Actividad biológica*

Bacterias, líquenes, hongos, algas, musgo, plantas, animales (*costra biológica, bioalteraciones*).

*Consolidantes e hidrófugos.
Productos para el tratamiento
de materiales pétreos*

ROSARIO VILLEGAS SÁNCHEZ

Profesora Titular de Universidad
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla

1. CRITERIOS GENERALES DE INTERVENCIÓN EN MATERIALES PÉTREOS

La intervención sobre la piedra de un monumento se contempla dentro del marco de la carta de Venecia (1968). Por lo tanto, todas las etapas y procedimientos empleados intentarán mantener la piedra en su aspecto original, no introduciendo variables que puedan trastocar el mensaje artístico y estético que sus autores pretendieron transmitir.

Llevar a la práctica esta teoría es, en la mayoría de las ocasiones, complejo desde el punto de vista técnico; sobre todo en los últimos años, ya que existe una fuerte agresión del ambiente. La piedra se halla en muchos casos en un avanzado estado de deterioro y al intervenir se pretende no sólo frenar este deterioro sino también dar soluciones de conservación que sean capaces de soportar las agresiones del ambiente durante un periodo de tiempo razonable.

Otro aspecto a considerar es el de las prioridades en las intervenciones de conservación. Como criterio general debe considerarse válido aquél que atiende a las causas del deterioro en primer lugar, actuando sobre ellas para erradicarlas o minimizarlas.

Posteriormente puede llevarse a cabo la intervención en la piedra propiamente dicha. En relación con ello debe recordarse que la piedra en un edificio es la capa más superficial del mismo y que en su deterioro y conservación pueden incidir otros materiales con los que está en íntimo contacto, como es el caso de los rellenos de muros, morteros, etc.

Los tratamientos existentes actualmente para la conservación de la piedra cumplen, en general, las prestaciones para las que han sido diseñados: consolidan, protegen, etc. Sin embargo, la mayoría están concebidos para ser aplicados a materiales homogéneos, con una composición, textura y porosidad uniformes (como el hormigón). Por el contrario, la piedra es un material extraordinariamente heterogéneo; entre sillares de la misma variedad litológica es frecuente que existan variaciones importantes en su textura, porosidad, etc., lo que condiciona un distinto grado de penetración y distribución de los productos de tratamiento en el seno de la piedra y, por tanto, una diferente durabilidad.

Ello obliga a que, cuando se plantea una intervención en la que se deben aplicar productos a una determinada piedra, se requiera siempre una experimentación previa, para ver cómo se comportan los sistemas piedra-tratamiento seleccionados. La realidad ha puesto en evidencia que los comportamientos obtenidos con un

producto de tratamiento aplicado a un determinado tipo de roca no pueden extrapolarse a otras variedades sin cometer errores considerables.

Por todo ello, es importante remarcar que, ante la falta de elementos de juicio que permitan seleccionar un tratamiento con unas garantías mínimas, es preferible no aplicar tratamientos o hacerlo sólo cuando sea absolutamente imprescindible.

1. 1. Etapas de la intervención

Con ocasión de la reunión en Bolonia (octubre 1971) del Grupo de Trabajo para Tratamiento de la Piedra (ICOR, ICOMOS, ICR-Roma) se decidió clasificar los procesos de conservación de la piedra en tres grupos principales:

- Limpieza.
- Consolidación.
- Protección.

De esta forma, se contempla el tratamiento de la piedra como una secuencia ordenada de operaciones adecuadas a las diferentes necesidades, en lugar de un proceso único. Una conservación efectiva requiere en primer lugar la identificación del mecanismo de deterioro, a continuación un proceso de limpieza (que puede incluir preconsolidación, desalinización y un tratamiento biocida) y cuando sea necesaria, una consolidación. Posteriormente, si el ambiente agresivo no ha cambiado, hace falta una protección que evite un nuevo deterioro. Además de estas etapas principales cabría considerar otras actuaciones.

- Preconsolidación: debe abordarse antes de la limpieza, cuando la piedra en la que se debe intervenir presenta un grado de decohesión que lo aconseje. Se lleva a cabo, sobre todo, en objetos labrados, esculturas, escudos o en paramentos con policromía, es decir, partes con un valor artístico significativo.
- Desalinización.
- Reintegración de elementos con pérdidas.
- Mantenimiento y conservación preventiva.

2. CONSOLIDACIÓN

Por consolidación se entiende la aplicación de un material que, al penetrar en profundidad en la piedra, mejora su cohesión, sus características mecánicas y la adhesión de las capas alteradas al sustrato sano. La aplicación de un producto consolidante es necesaria únicamente cuando la piedra ha perdido cohesión y debe introducirse un material que consiga la unión entre los granos minerales que la forman y que han quedado sueltos y la adherencia entre la capa alterada y la sana.

Los tratamientos efectuados hace más de tres o cuatro décadas aportan escasa información acerca del comportamiento de los productos utilizados, ya que existe poca documentación sobre sus características, sus técnicas de aplicación, el estado de la piedra antes de la misma, etc. Aunque en la actualidad los tratamientos son descritos en profundidad y su evolución seguida detalladamente a lo largo de los años, la lentitud de los procesos de alteración hace que, en la mayoría de los casos, no exista la adecuada información sobre el comportamiento de los productos usados, y que haya que seguir recurriendo a los ensayos acelerados de laboratorio para llegar a la elección de los más apropiados.

Los principales métodos de consolidación se basan fundamentalmente en tres procesos:

- 1) Reemplazar aquellos constituyentes de la piedra que son propensos al ataque atmosférico, y precipitar materiales químicamente resistentes en sus poros, para consolidar los granos sueltos. Éstos serían los tratamientos con soluciones de compuestos inorgánicos.
- 2) Precipitar sílice, procedente de ésteres de silicona, en los poros de la piedra. Los productos organosilícicos consisten en monómeros, oligómeros o polímeros de dicha familia y su efecto final es producir un depósito de sílice que une los granos sueltos.
- 3) Impregnar la piedra con productos orgánicos con objeto de cementar los granos que han quedado sueltos a causa de la alteración, e impermeabilizar y proteger la piedra de posteriores ataques. Los productos orgánicos rodean los granos de la piedra de una red de un polímero orgánico que, teóricamente, no debe llenar los poros.

Los consolidantes inorgánicos parecen los más apropiados, por su similitud con los componentes de la piedra, y resisten mejor, en general, la acción de la intemperie. Sin embargo, sus características mecánicas son claramente inferiores a las de los orgánicos, y es difícil lograr una buena penetración del tratamiento, uno de los aspectos fundamentales de la consolidación. Los polímeros orgánicos, además de su mayor alterabilidad, poseen ciertas características muy diferentes de aquéllas de la piedra; por ejemplo, sus coeficientes de expansión térmica son mayores que los de la piedra, originándose tensiones entre el consolidante y el sustrato al variar la temperatura. Los organosilícicos pueden considerarse intermedios entre los anteriores; una vez polimerizados su esqueleto está formado por átomos de oxígeno y de silicio, de naturaleza inorgánica, mientras que su origen y mecanismo de polimerización guardan relación con los productos orgánicos, pudiendo alcanzar profundidades de penetración y características mecánicas similares a las de éstos.

2.1. Características de los consolidantes

Las características que deben reunir los consolidantes son las siguientes:

- a) Valor consolidante, ya que la función de un consolidante es restablecer la cohesión de los granos de la piedra deteriorada. Para obtener una medida cuantitativa del

valor de la consolidación se usan las medidas de la resistencia a la compresión, a la tracción, de la dureza superficial o de la resistencia a la abrasión.

- b) Alterabilidad de la piedra consolidada, debe ser inferior a la de la piedra sin tratar, ya que de lo contrario sería preferible no tratarla y sustituirla. Depende tanto de las características del producto como de las de la piedra y también de los factores de alteración. Se determina con la ayuda de ensayos de alteración acelerada.
- c) Profundidad de penetración. Un consolidante debe restablecer la cohesión entre la zona externa alterada y el sustrato interno sin alterar. La interfase entre la zona tratada y la sin tratar marca un cambio de propiedades tales como porosidad o permeabilidad al agua líquida y vapor; si este cambio es muy brusco, puede llegarse al desprendimiento de la capa tratada. La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la viscosidad del producto y al ángulo de contacto con la piedra.
- d) Modificación de la porosidad y porometría. La alterabilidad de una piedra está muy relacionada con su contenido de agua y con las posibilidades de movimiento de ésta en su interior, función de la cantidad de poros y del tamaño de éstos. Si un tratamiento produce una disminución de porosidad muy acusada o un aumento en los microporos, la alterabilidad de la piedra se verá incrementada.
- e) Capacidad de transferencia de humedad. Los consolidantes deben permitir el paso de humedad a través de la piedra, para impedir la acumulación de agua y sales en determinadas zonas.
- f) Compatibilidad con la piedra. En el aspecto químico, esto significa que no deben formarse compuestos que puedan reaccionar con los componentes de la piedra o que puedan afectar a la estructura cristalina. Desde el punto de vista físico, las propiedades de la piedra consolidada deben ser similares a las de la piedra sin alterar, a fin de que no se creen tensiones entre la capa tratada y el sustrato interno.
- g) Efecto en el aspecto. La piedra no debe sufrir cambios de color o de brillo a causa de un tratamiento. Además, el aspecto superficial no debe alterarse significativamente con el paso del tiempo por efecto de los agentes ambientales, especialmente la radiación UV.

2.2. Consolidantes inorgánicos

La utilización de compuestos inorgánicos con fines de consolidación data de varios siglos y alcanzó su máximo desarrollo en el XIX. Estos compuestos, de naturaleza semejante a la de los componentes de la piedra, parecerían, en principio, los más idóneos para su restauración. Sin embargo, esta similitud hace que la piedra se siga alterando de la misma forma en que lo ha hecho antes de la consolidación.

Sus ventajas son su mayor duración y una gran inercia frente a la radiación UV. Entre sus inconvenientes se encuentran su mayor fragilidad y menor elasticidad, la dificultad

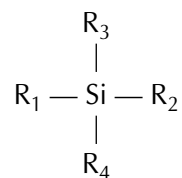
de conseguir una buena penetración lo que produce la formación de costras delgadas y duras, el cambio de color de la superficie, la formación de sales solubles como subproducto, el crecimiento de cristales que puede generar tensiones en el interior de los poros, y su baja acción consolidante.

Entre ellos se encuentran los siguientes:

- a) Hidróxido cálcico en forma de soluciones o suspensiones acuosas. El consolidante es el carbonato cálcico que se forma por reacción con el anhídrido carbónico atmosférico.
- b) Hidróxido de bario. Los otros hidróxidos alcalinotérreos reaccionan igual con el anhídrido carbónico atmosférico, con la ventaja de que los carbonatos que se forman son menos solubles que el cálcico y, por tanto, más resistentes a la alteración.
- c) Silicatos alcalinos. Con ellos se obtiene la precipitación de sílice. Su principal problema es la formación de sales solubles como subproducto y su bajísima penetración.
- d) Derivados del Flúor. El ácido fluorhídrico reacciona en las piedras calizas dando fluoruro cálcico, y en las areniscas dando fluosilicato, en ambos casos en costras muy finas. Con el ácido fluosilícico y los fluosilicatos se obtienen fluoruro cálcico y sílice, pero se forma una costra muy fina y de distinta composición que el sustrato, que normalmente termina desprendiéndose.
- e) Anhídrido carbónico y carbonato. Empleando estos compuestos se pretende reconvertir el yeso formado como consecuencia de la alteración en carbonato cálcico.
- f) Otros: estearato de cinc y aluminio, sulfato de aluminio, ácido fosfórico, fosfatos, aluminato potásico, etc.

2.3. Consolidantes organosilícicos

Su acción consolidante consiste en la formación de una estructura reticular semejante a la de la sílice. Inicialmente se usaron en el tratamiento de piedras silíceas, pero su aplicación se ha extendido, con muy buenos resultados, a materiales calizos. Su composición se basa en moléculas del tipo



donde R_i son radicales de dos tipos: $-O-C_nH_m$ alcoxi
 $-C_nH_m$ alquilo

El nombre que reciben es el de alquilalcoxisilanos, con prefijos que indiquen el número de radicales de cada tipo que existen en la molécula. Estos productos pueden

utilizarse en forma de monómeros de los tipos anteriores o de material parcial o totalmente polimerizado.

El proceso de polimerización en el interior de la piedra cuando se utilizan monómeros comienza por la hidrólisis del grupo alcoxi, formándose un alcohol que se evapora y continúa con la polimerización propiamente dicha, hasta que todos los grupos alcoxi han reaccionado y se han eliminado.

Los grupos alquilo permanecen sin reaccionar y son los que caracterizan el tipo de polímero formado:

- Si se parte de un tetraalcoxilano se obtiene una estructura análoga a la de la sílice y tiene sólo efecto consolidante.
- Si se parte de un alquiltrialcoxilano queda un polímero tridimensional con grupos orgánicos, por lo que tiene propiedades consolidantes e hidrófugas.
- Si se parte de un dialquildialcoxilano resulta un polímero lineal con dos grupos orgánicos en cada átomo de silicio, por lo que tiene sólo efecto hidrófugo.

2.4. Consolidantes orgánicos. Polímeros sintéticos

Entre los productos consolidantes orgánicos se utilizan algunos de origen natural, si bien son los compuestos sintéticos los más empleados, especialmente a partir de los años sesenta. Prácticamente todos estos productos tienen, además de su carácter consolidante, efecto hidrófugo, debido a su composición orgánica. Pueden aplicarse en forma de polímeros, disueltos en un diluyente apropiado, o en forma de monómeros, líquidos o disueltos, que después polimericen en el interior de la piedra.

De forma general, los grandes problemas de la consolidación con productos orgánicos son la penetración y la resistencia a la radiación solar.

La penetración de un producto líquido viene condicionada por su viscosidad; las macromoléculas de un polímero, de elevada viscosidad, tienen una penetración pequeña si no se diluyen a concentraciones muy bajas. Por otra parte, la evaporación del solvente en la superficie de la piedra provoca la migración de la solución desde el interior hacia la superficie, con el resultado de que el polímero se deposita en una zona muy estrecha.

Si se utilizan monómeros y se polimerizan en el interior de la piedra, los problemas relacionados con la penetración se reducen considerablemente. Sin embargo, aparecen otros debidos a las dificultades para que esta polimerización se produzca correctamente en el interior de la piedra.

El efecto de la radiación UV depende de los enlaces sobre los que actúa; prácticamente todos los polímeros orgánicos absorben radiación, pero las resinas epoxi se alteran con mayor rapidez y en mayor medida.

Los distintos tipos de productos pertenecen a los siguientes grupos:

- a) Ceras. Las ceras naturales se encuentran entre los primeros productos empleados para proteger la piedra. Las sintéticas son derivados del petróleo y destaca especialmente la microcristalina. Pueden aplicarse fundidas o disueltas, y su principal inconveniente es el ablandamiento a altas temperaturas y la retención de polvo en este caso.
- b) Polímeros acrílicos. Los monómeros más utilizados son derivados de los ácidos metacrílico y acrílico, produciéndose los polimetacrilatos o los poliácridatos. En los productos comerciales son muy frecuentes las mezclas de distintos monómeros. También se emplean en combinación con los productos organosilícicos, dando polímeros acril-silicónicos.
- c) Resinas epoxi. Su principal campo de aplicación es como adhesivos y morteros. Se utilizan en forma de dos componentes que se mezclan junto con un catalizador para proceder a su aplicación.
- d) Resinas de estireno poliéster. Son copolímeros formados por la combinación de varios monómeros, que se aplican disueltos y con un catalizador.
- e) Polímeros vinílicos, poliuretanos, nylon, resinas fluoradas, etc.

2.5. Aplicación de los tratamientos: disolventes y emulsiones

El modo de aplicar los tratamientos es un aspecto muy importante, ya que puede condicionar de forma decisiva la evolución de la piedra tratada. El éxito de un tratamiento depende, en primer lugar de la profundidad de penetración y de la distribución del producto en el interior de la piedra. Los principales factores que influyen en la penetración de los productos de tratamiento en la piedra porosa son:

- La naturaleza del consolidante y del disolvente.
- La concentración, viscosidad y tensión superficial de la solución.
- El tiempo de contacto entre la piedra y la solución.
- Las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente.
- La porosidad de la piedra.

Las firmas comerciales que suministran los productos de tratamiento suelen facilitar datos sobre los factores que se acaban de mencionar.

La aplicación de los productos pueden hacerse con nebulizador, pincel, apósitos y gota a gota. Los dos primeros procedimientos son los más ampliamente utilizados; el resto suele reservarse para zonas concretas, con problemas más específicos.

En laboratorio los productos suelen aplicarse por: capilaridad, inmersión total, inmersión total al vacío, gota a gota, en autoclave, por nebulización, etc. Cuando se hacen pruebas experimentales en el laboratorio para valorar la idoneidad de los tratamientos, conviene aplicar éstos con los mismos procedimientos que se van a emplear en la obra.

En trabajos de investigación, cuando se pretende estudiar las propiedades y durabilidad de diferentes sistemas piedra-tratamiento, es conveniente utilizar varios procedimientos de aplicación, a fin de disponer de los correspondientes patrones de comportamiento como referencia.

Los disolventes más frecuentemente utilizados son: agua, alcohol, acetona, white spirit, tricloroetano, tolueno y xileno. Algunos de ellos son peligrosos para el hombre y el medio ambiente, por lo que deben emplearse con las debidas precauciones. Las empresas productoras están diseñando una nueva generación de productos denominados emulsiones, en base acuosa.

Las emulsiones son productos de dos fases, el producto activo y el agua en la cual dicho producto viene emulsionado. Antes de aplicarlas suelen diluirse nuevamente en agua para facilitar su penetración. Su ventaja es que no son tóxicas ni contaminantes, pero presentan el inconveniente de que suelen tener una caducidad más corta que el resto de los productos, por lo que deben aplicarse lo antes posible (antes de tres meses) después de su preparación. El comportamiento del producto polimerizado es similar al resto de los productos con idénticos principios activos. Sin embargo, hasta la actualidad la experimentación de estos productos aplicados a la piedra es escasa.

3. HIDROFUGACIÓN

La humedad es un factor de esencial importancia en el proceso de deterioro de los materiales de construcción. Los hidrófugos son productos incoloros utilizados para reducir la absorción de agua a través de la superficie de los materiales, sin afectar sensiblemente a su aspecto.

La hidrofugación, también llamada protección, se basa en la aplicación de un tratamiento que impida la entrada de agua líquida en la piedra pero que permita la salida del agua en forma de vapor, es decir, que mantenga la "respiración" del material. Este tipo de tratamiento debe utilizarse siempre que el agua sea un factor de alteración importante y complementándolo con medidas que impidan la entrada de agua por otros frentes: resane de cornisas, canalizaciones de los desagües de las cubiertas, etc.

Dado que la entrada de agua líquida se produce normalmente por la superficie, la penetración de estos tratamientos no es necesario que sea muy grande, aunque sí es conveniente que no se limite a una capa superficial de poco espesor. La alterabilidad frente a los agentes atmosféricos es muy importante, ya que deben permanecer eficaces en la superficie de la piedra, y sin afectar al aspecto de la misma.

Esta protección puede conseguirse por medio de:

- 1) Taponamiento de los poros y capilares; en este grupo podrían incluirse los llamados tratamientos de “impregnación total”, cuyo objetivo es rellenar completamente todos los huecos del material. De esta forma, la piedra se conserva impidiendo el desarrollo de mecanismos de alteración. Este procedimiento ha sido utilizado con productos acrílicos y sólo es aplicable a objetos pequeños, en los que, sometiéndolos previamente a vacío puede asegurarse el llenado total de los poros. Este sistema presenta el inconveniente de que un fallo en una pequeña zona puede permitir que comience la alteración.
- 2) Creación de una película más o menos adherida a la superficie del material, con productos filmógenos o semifilmógenos, la cual aísla a la piedra de los agentes agresivos presentes en el medio ambiente. Por tratarse de un tratamiento superficial sólo en casos contados se podría lograr el aislamiento de todas las caras del material, de forma que los agentes agresivos tendrían la posibilidad de acceder a su interior con el problema adicional de que no podrían salir. Como en el caso anterior, sólo es aplicable a objetos pequeños, y también un fallo en la película puede tener efectos contraproducentes.
- 3) Aumento de la tensión superficial entre el agua y el soporte, con lo que el agua no moja al sustrato al aumentar su ángulo de contacto. Se permite la respiración del material y el intercambio de vapor de agua con el ambiente. Si el agua líquida accede al interior del material por una superficie no tratada puede salir al exterior en forma de vapor.

3.1. Características de los hidrófugos

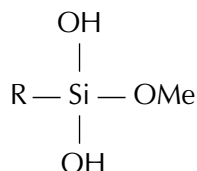
Un tratamiento hidrófugo debe reunir las siguientes características:

- a) Impermeabilidad al agua líquida, para impedir la entrada de agua desde la superficie exterior, procedente de lluvia, condensación o escurrido.
- b) Permeabilidad al agua vapor, de forma que si el agua consigue penetrar pueda evaporarse de la piedra y el material no permanezca mojado durante mucho tiempo.
- c) Estabilidad frente a los agentes de alteración y frente a la radiación UV.
- d) Reversibilidad o posibilidad de aplicar un nuevo tratamiento encima.
- e) Buena adhesión al material para que no pueda ser eliminado por la lluvia.
- f) Suficiente profundidad de penetración.

Para conseguir todo ello, las moléculas hidrófugas deben tener un lado hidrofílico por el que se adhieren a la piedra y un lado hidrofóbico que repela la humedad. De esta manera, se forma una red de moléculas que recubren los granos del material pero sin obturar los poros y capilares.

3.2. Siliconatos

Son compuestos basados en monómeros del tipo



donde R es un radical alquilo (orgánico) y Me un metal alcalino.

La reacción que tiene lugar en la piedra comienza con la hidrólisis, continuando con la polimerización, quedando un radical alquilo unido a cada átomo de silicio. La polimerización es bastante lenta y sólo se produce bien en materiales muy porosos. Tienen el inconveniente de la formación de carbonatos alcalinos, muy solubles.

3.3. Productos organosilícicos

Pertencen al mismo grupo de los vistos como consolidantes. Serían aquellos compuestos basados en monómeros en los cuales existen radicales alquilo.

3.4. Productos organometálicos

Son sales de ácidos grasos superiores y de iones metálicos, fundamentalmente sodio, potasio, magnesio, cinc y aluminio. Se han utilizado para el tratamiento de edificios modernos, pero su aplicación a monumentos es escasa. El más empleado es el estearato de aluminio. Pueden aplicarse en solución acuosa o en solventes orgánicos, obteniéndose una hidrofugación más marcada en este último caso.

3.5. Polímeros orgánicos

Se trata de los mismos productos utilizados como consolidantes, si bien como hidrófugos se emplean más diluidos. Los más adecuados para su uso como hidrorrepelentes son aquéllos más estables frente a los agentes de alteración, ya que deben permanecer eficaces especialmente en la superficie.

BIBLIOGRAFÍA

Atti del 11 corso di informazione ASSIRCCO Perugia 6-7-8 novembre 1979. La Conservazione dei Monumenti: metodologie di ricerca e tecniche di consolidamento contro il degrado. Casa Editrice KAPPA srl. p. 25-40.

LAZZARINI L.; LAURENZI-TABASSO, M. Il restauro della pietra. CEDAN. Ed. Dott. Antonio Milani, 1986.

LAZZARINI, L. Studi preliminari sui materiali lapidei della Basilica di S. Marco a Venezia. Conservazione dei monumenti, ATI, Firenze, 1974, pp. 77-88.

LAZZARINI, L. Treatment card of Venecian monuments and sculptures. Preprints of the 3rd. Int. Cong. of Detedoration and Conservation of Stones, Vecencia, 1979.

LEWIN, S.Z. The preservation of natural stones, 1893-1935, an annotated bibliography. AATA, 1981, Vol. 6, n. 1, pp. 185-272.

LEWIN, S.Z.; BAER, N.S. Rationale of the banum hidroxíde-urea treatment of decayed stone. Studies in Conservation, 1974, Vol. 19, pp. 24-35.

LÓPEZ DE AZCONA, M.C. Métodos de aplicación de productos utilizados en obras de restauración: casos prácticos, V Congreso de Geoquímica de España, 1993.

LÓPEZ, J. Utilización de consolidantes e hidrofugantes en la conservación de la piedra natural. Características técnicas de algunos de los productos más utilizados actualmente. V Congreso de Geoquímica de España, 1993.

MARCOS, R.M. Valoración de propiedades en rocas carbonatadas cuando se someten a tratamientos de consolidación. V Congreso de Geoquímica de España, 1993.

MARCOS, R.M. Tratamientos de conservación aplicados a zonas carbonatadas: Catedral de León. (Tesis Doctoral), Área de Petrología y Geoquímica, Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo, 1992.

PAVIA, S.; CARO, S.; PÉREZ, F.; LÓPEZ, F. Protection of the stone of San Bartotomé church in Logroño (La RiM), Spain. 7th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisboa, 1992. pp. 1335-1340.

PRICE, C.A. Stone conservation. An Over new of Current Research. The Getty Conservation Institute, 1996.

ROSSI MANARESSI, R. Stone protection from antiquity to the beginning of the industrial revolution. Science and Technology for Cultural Heritage, 1993, Vol. 2, pp. 149-159.

RUIZ-VILLAR, L. Criterios y problemática de la selección y uso de consolidantes e hidrofugantes. V Congreso de Geoquímica de España, 1993, 3 p.

RUIZ-VILLAR, L. La presencia del color. Catálogo técnico divulgativo de la restauración de la fachada de Sto. Domingo de Soña (Coresal), Junta de Castilla y León, 1994. p. 114.

VILLEGAS, R.; VALE, J.F. Evaluation of the behaviour of water repellent treatment for stone. 7th Int. Cong. on Deterioration and conservation of stone, Lisboa, 1992 pp. 123-1263.

VILLEGAS, R. Estudio de la alterabilidad y respuesta a tratamientos de conservación de los principales tipos de piedra utilizados en catedrales andaluzas. Tesis Doctoral. Univ. Sevilla. 1989.

VILLEGAS, R. Efecto de la contaminación atmosférica sobre los materiales pétreos. La alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla. Estudio de tratamientos de conservación. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Univ. Sevilla. 1985.

VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; VALE, J. F. ; MARTÍN, A. Diagnóstico y tratamiento de la piedra. I. La alteración de la piedra en monumentos. II. Consolidantes e hidrófugos. Productos para el tratamiento de materiales pétreos. I. C. Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Monografía nº 400. Madrid. 1990.

*Ensayos y técnicas
para evaluar la eficacia
de los tratamientos*

ROSARIO VILLEGAS SÁNCHEZ

Profesora Titular de Universidad
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla

1. INTRODUCCIÓN

Toda obra del Patrimonio Histórico está sometida a la acción de una serie de agentes externos, que determinan su evolución a lo largo del tiempo. Estos agentes son conocidos como factores extrínsecos de alteración, ya que condicionan en gran medida las transformaciones que sufren los materiales que constituyen la obra. La propia estructura y los materiales de la pieza conforman los factores intrínsecos de alteración, dado que sus características definen su evolución natural.

Cualquier material que se introduzca en la obra o cualquier actuación que se realice sobre ella en una intervención de restauración van a modificar su relación con el ambiente, de forma que su comportamiento futuro puede verse alterado. Cuando se interviene una pieza el objetivo es lograr que su comportamiento mejore, es decir, que su alterabilidad disminuya, pero puede darse el caso de que se consiga el efecto contrario.

Cuando se aplican tratamientos experimentados a materiales cuya respuesta ante los factores extrínsecos también se conoce, se puede garantizar que el objetivo antes mencionado se conseguirá. En los casos en que se van a utilizar técnicas o productos nuevos para materiales de los que no se poseen datos, es conveniente llevar a cabo una investigación previa para poder determinar, al menos de forma cualitativa, cuál será su evolución en el futuro. Con mayor motivo debe realizarse este tipo de estudios cuando, durante la intervención, se aplican diferentes tratamientos que inciden sobre la misma obra.

En el caso de los bienes inmuebles o arqueológicos aparecen dos circunstancias que hacen necesario el estudio previo de los tratamientos. En primer lugar, las condiciones externas que afectan a cada obra son muy diferentes, tanto climáticas, como de uso, de contaminación atmosférica, etc., por lo que los factores de alteración presentes van a ser muy diferentes en cada caso. En segundo lugar, los materiales empleados, especialmente la piedra, varían de un edificio a otro, de forma que su estado de conservación va a ser totalmente distinto.

Adicionalmente se encuentra otro problema, que es el gran número de productos de tratamiento que se fabrican y comercializan y sobre los cuales hay muy poca experiencia en cuanto a los resultados que proporcionan a medio plazo.

Es decir, coinciden dos hechos, el entorno y el material, que varían por completo de un caso a otro. Esto hace que un tratamiento pueda comportarse de distinta forma cuando se utilice en obras diferentes tanto por el sustrato al que se aplica (la piedra) como por

los agentes de alteración que actúan. Ello pone de manifiesto la necesidad de recurrir a la evaluación previa de estos tratamientos.

En esta ponencia se va a presentar la metodología que puede aplicarse para realizar el estudio previo de distintos tipos de tratamientos: limpieza y extracción de sales, consolidantes e hidrófugos. Esta metodología se ha puesto a punto en el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico aplicándola en diversos proyectos, y es muy semejante a la que se emplea en otros organismos (ICR, Normal).

2. METODOLOGÍA GENERAL DE EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS

La metodología general a aplicar para determinar la idoneidad de cualquier tipo de técnica y producto de tratamiento es independiente del tipo de obra que se esté estudiando, y debe centrarse en evaluar los siguientes aspectos:

- Compatibilidad de los productos y técnicas empleados con los materiales originales de la obra o con otros productos o técnicas de tratamiento que se vayan a utilizar.
- Eficacia del tratamiento, es decir, que con él se consiga el fin que se persigue.
- Resistencia a los agentes de alteración que actuarán sobre la obra una vez restaurada.

En general, los métodos y técnicas de análisis y ensayo que podrían utilizarse para determinar estos tres puntos son los mismos que sirven para medir las diferentes características del material, si bien enfocados desde otro punto de vista. Tan sólo hay un grupo de técnicas cuya finalidad principal es determinar la alterabilidad de las muestras, que son los ensayos de alteración acelerada.

El estudio de estos tres aspectos se lleva a la práctica de la siguiente forma:

- Aplicación del tratamiento a probetas adecuadamente preparadas, de características semejantes a las de la obra a tratar (materiales, uniones, estado de conservación, etc.).
- Estudio de la compatibilidad de unos tratamientos con otros: normalmente se aplican varios tratamientos al mismo material, especialmente de limpieza y biocidas y posteriormente de consolidación y/o hidrofugación. Aunque los primeros se eliminan tras su empleo, debería estudiarse el efecto de esta aplicación sucesiva de productos, tratando de la misma manera las probetas.
- Evaluación de la eficacia del tratamiento: en función del tipo de tratamiento, se determinarán distintas características que se pretenden mejorar. Del efecto de los

consolidantes son significativas las propiedades mecánicas, que pueden medirse directa o indirectamente. En el caso de los hidrófugos, se determinarán las propiedades relacionadas con la absorción de agua.

- Determinación de la resistencia a los agentes de alteración: se someten las probetas ya tratadas a ensayos que reproduzcan el efecto de los agentes y mecanismos de alteración que actúen sobre la obra. Normalmente se efectúan ensayos de alteración acelerada, para obtener resultados en plazos cortos.

3. APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Antes de proceder a la evaluación de los tratamientos estrictamente hablando, una etapa muy importante es la preparación de las muestras, de la que puede obtenerse información muy útil para programar la aplicación a la obra.

Dado que la piedra es un material normalmente heterogéneo, si se quiere obtener resultados significativos es necesario utilizar un número relativamente alto de probetas, de distintas formas y dimensiones, que normalmente es difícil obtener del edificio; en ocasiones es posible encontrar restos de intervenciones anteriores en las que se hayan sustituido bloques o piezas, pero casi siempre deberá recurrirse a material de la cantera o de una formación geológica semejante.

Las probetas que normalmente se utilizan son paralelepípedos o cilindros de dimensiones muy variadas; las más frecuentemente empleadas son las cúbicas y, entre ellas, las de 5 cm de arista.

Cuando se usan muestras de cantera debe de tenerse en cuenta que el estado de la piedra es muy diferente del que presenta la del monumento. Sin embargo, como la evaluación del comportamiento de los productos se realiza normalmente de forma comparativa, se opta habitualmente por utilizar dichas probetas sin ningún tipo de acondicionamiento previo.

Las probetas deben caracterizarse previamente a la realización de los tratamientos, para determinar cómo se modifican sus propiedades tras dicha aplicación. En función del tratamiento se medirán diferentes características: propiedades mecánicas, hídricas, color, adherencia, etc.

La aplicación de los tratamientos de limpieza y de extracción de sales puede llevarse a cabo in situ en pequeñas zonas de muestra, cuando el objetivo es determinar su eficacia y las mejores condiciones de utilización. De estos testigos se extraerán las muestras oportunas para evaluar el resultado de la limpieza. Para estudiar la compatibilidad con el material o con los tratamientos posteriores o bien la alterabilidad futura de la piedra, la aplicación puede efectuarse en probetas que se someterán después a diversos ensayos.

Los tratamientos consolidantes e hidrofugantes pueden aplicarse a las probetas por todas o alguna(s) cara(s), impregnando el material completamente o sólo hasta cierta profundidad. La aplicación puede realizarse de diversas formas: por absorción capilar de las probetas; por inmersión de las probetas en el producto; por pulverización o con brocha, que serían los métodos más semejantes a los usados en la intervención en el edificio.

Durante la aplicación de un tratamiento a las probetas pueden medirse datos útiles para la intervención en la obra: consumo unitario de producto, tiempo de aplicación, secado o curado, condiciones ambientales (temperatura y humedad) más favorables, activación del tratamiento con algún tipo de energía (calor o radiación), etc.

Tras la aplicación de consolidantes o hidrófugos debe dejarse el tiempo suficiente para el secado de los tratamientos, con objeto de que tenga lugar la evaporación del disolvente y la polimerización del producto activo, cuando se empleen tratamientos en forma de monómeros u oligómeros. La duración de esta etapa depende en parte de la volatilidad del disolvente que se emplee, la cual no debe ser excesiva para que el producto activo tenga tiempo de precipitar y fijarse sobre los granos de la piedra y no retorne hacia la superficie. El curado puede realizarse en condiciones de temperatura y humedad relativa controladas y constantes, de forma que se pueda reproducir el proceso, o simplemente en un recinto con ventilación para eliminar los productos que se vayan evaporando. Es conveniente que la temperatura no sea muy elevada para que el secado no sea excesivamente rápido.

El control de este proceso se realiza siguiendo la evolución del peso de las probetas; los productos que se aplican en forma de monómeros tardan como mínimo 15 días en curarse y bastante menos, unos 5 días, los que se utilizan como polímeros. Hay que tener en cuenta también que estos datos pueden variar bastante en función de la volatilidad del disolvente que se emplee.

Figura 1. Aplicación de tratamientos

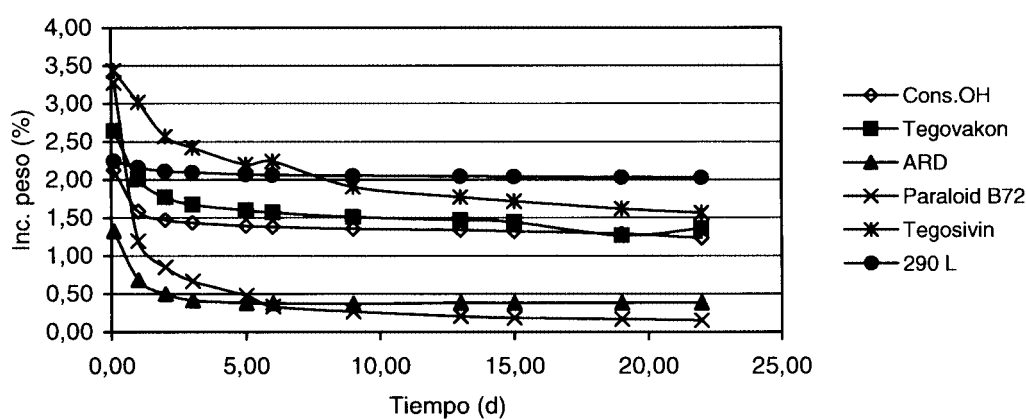
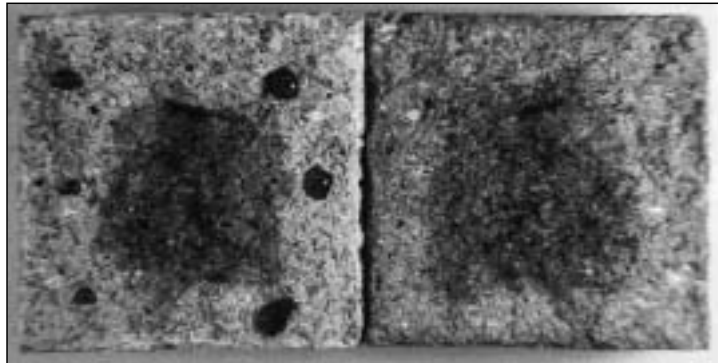


Figura 2. Penetración tratamiento.



Después de finalizada la aplicación de los tratamientos se pueden estudiar diversas características de las probetas, que proporcionan información sobre lo que ocurrirá en la aplicación real y sobre el comportamiento futuro del material; entre ellas las más interesantes serían:

- profundidad de penetración de consolidantes o hidrófugos.
- incremento de peso de la probeta en estos casos.
- morfología de la película del producto depositado sobre la piedra.

La profundidad de penetración de un tratamiento consolidante o hidrófugo se determina cortando las probetas por su zona media y estudiándola después con diversos métodos: microscopía electrónica, calcinación de la probeta, absorción de agua, etc. Este dato puede servir para determinar varios factores: la idoneidad del disolvente utilizado (si es muy volátil el producto penetrará poco), la concentración de la disolución (si es muy alta en relación a la porosidad de la piedra la penetración será baja), o el tiempo de contacto entre el tratamiento y el soporte (penetración más baja cuanto menor sea el tiempo de contacto). Todos estos datos son útiles para definir la técnica de aplicación. En ocasiones puede ser conveniente utilizar el tratamiento diluido y aplicarlo varias veces hasta conseguir la profundidad deseada.

El incremento de peso de las probetas tras el tratamiento está relacionado por una parte con la porosidad de las mismas y por otra con las características del producto: contenido de materia activa y forma en que se encuentra ésta, monómero, oligómero o polímero.

La morfología de la película de producto se estudia al SEM. Un producto de tratamiento, ya sea hidrófugo o consolidante, debe formar una película que recubra los granos constituyentes de la piedra de la forma más continua posible, pero sin obturar

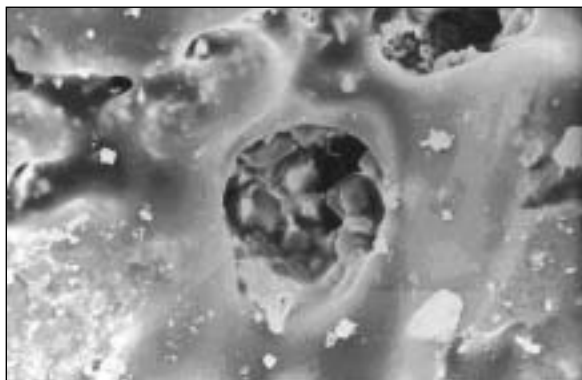


Figura 3. Piedra tratada con producto acrílico (SEM).

por completo los poros y capilares, ya que impediría la “respiración” del material. También es posible observar si la película de producto presenta fisuras o grietas, o si se forman poros en ella, todo lo cual contribuiría a disminuir su efectividad, ya que quedarían abiertos caminos para que los agentes de alteración llegasen hasta los granos de la piedra.

4. COMPATIBILIDAD CON EL MATERIAL: MODIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

El primer paso en la evaluación de los tratamientos, propiamente dicha, sería determinar cómo se modifican algunas características intrínsecas del material.

El color y el aspecto superficial de la piedra pueden verse modificados al cambiar la forma en que se refleja la luz. Este cambio puede cuantificarse de forma instrumental, por ejemplo, con un colorímetro o un espectrofotómetro UV-Vis con el dispositivo adecuado para medir en muestras sólidas, y también puede hacerse con ayuda de alguna carta de patrones de color, por ejemplo, la carta Munsell para medida de colores de suelos.

Esta característica puede variar con cualquiera de los tratamientos mencionados. Con los tratamientos de consolidación o hidrofugación el cambio se debe a la permanencia del producto en el interior de la piedra, lo cual normalmente se traduce en oscurecimiento y aparición de brillo. Estos cambios generalmente se atenúan rápidamente con el tiempo.

La colorimetría puede aplicarse tanto para llevar a cabo el seguimiento del color a lo largo del tiempo en los tratamientos aplicados in situ, como para estudiar los cambios que sufren las probetas tratadas tras la realización de los diferentes ensayos.

Tabla 1. Color (coordenadas CIE). Probetas de Guadix

Tratamiento	Y	x	y
Sin tratar	37.06	0.3554	0.3662
Tegovakon	37.48	0.3518	0.3627
Tegosivin HL100	36.11	0.3545	0.3648
Consolidante OH	40.20	0.3475	0.3615
BS 28	37.06	0.3532	0.3647
ARD 55050	32.04	0.3563	0.3676
Paraloid B72	26.31	0.3659	0.3707

Otras propiedades que pueden proporcionar una información importante son las físicas: porosidad, porometría, superficie específica, permeabilidad a gases y vapores.

Las variaciones más importantes se producirán por la aplicación de tratamientos consolidantes o hidrófugos, ya que su aplicación implica la introducción de una sustancia que va a permanecer en los poros de la piedra y que, además, interactúa de forma diferente con el agua y los gases atmosféricos.

Normalmente la variación de porosidad del material está directamente relacionada con la cantidad de producto que permanece en el mismo y depende de la porosidad original de la piedra y de las características del tratamiento. Más importante que esta variación es la que sufre la distribución de tamaños de poros; los poros por debajo de 1 μ m (microporos) son los más susceptibles a la alteración por mecanismos de cristalización de sales o heladicidad, por lo que si un tratamiento llena parcialmente los poros grandes y los convierte en microporos, posiblemente aumentará la alterabilidad del material.

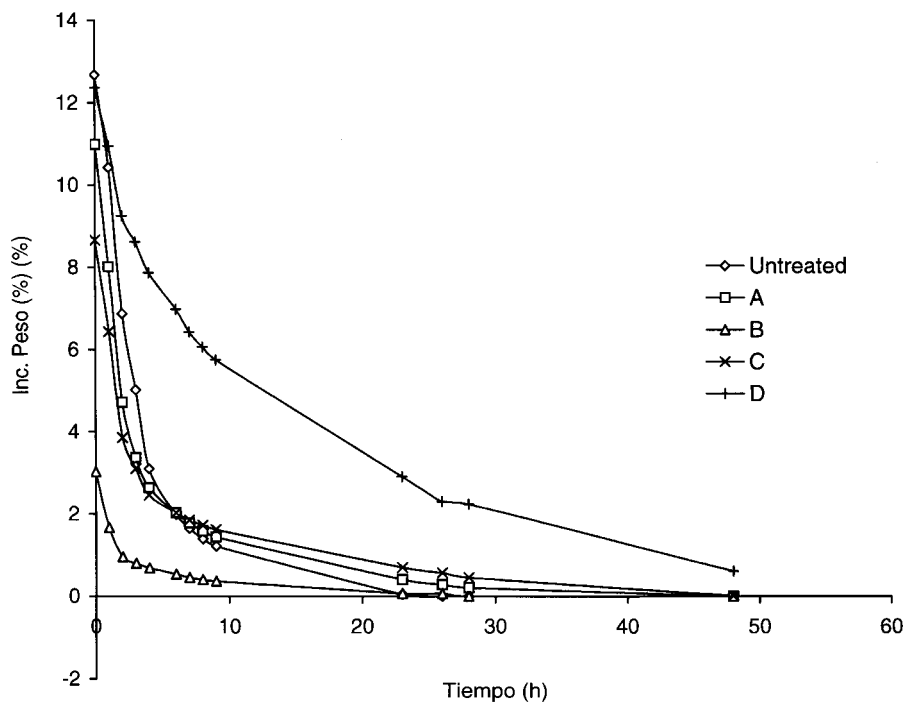
La superficie específica es un índice del área expuesta al ambiente y se puede obtener a partir de los datos de tamaños de poros. Si se produce una disminución acusada indica que el tratamiento ha rellenado los poros, lo cual afectará a la capacidad de respiración del material.

La velocidad de evaporación de agua es una de las características hídricas más importantes, no sólo en el caso de productos hidrófugos sino también para los consolidantes. Esta medida se lleva a cabo con las probetas saturadas de agua, lo cual, en el caso de las probetas tratadas, debe realizarse por absorción a vacío. Las probetas se colocan en atmósfera con temperatura y humedad relativa controladas y se pesan periódicamente hasta peso constante. Durante el secado de un material como la piedra se observan dos fases. En la primera, al estar la probeta saturada de

agua, ésta puede moverse en el interior del sistema poroso de la piedra en forma líquida y la evaporación se produce desde el agua líquida que llega a la superficie de la piedra; de esta forma, la velocidad de secado es constante y característica de cada tipo de piedra. Cuando el contenido de agua es menor de cierto valor, se producen discontinuidades en la película líquida y la salida del agua tiene lugar como vapor desde el interior de la probeta; éste es el contenido de agua crítico, característico de cada material. A partir de este momento, la velocidad de secado se hace mucho más baja.

Por tanto, en este ensayo se determinan dos características muy importantes: la velocidad de secado inicial y el contenido crítico de agua. Los tratamientos pueden modificar (normalmente disminuir) la velocidad de secado —con lo cual el material permanece húmedo más tiempo— y también el contenido crítico (normalmente aumentarlo) —con lo que la piedra queda con un contenido residual de humedad más elevado— favoreciéndose todos los mecanismos de alteración relacionados con la presencia de agua.

Figura 4. Evaporación de agua



5. EFICACIA DEL TRATAMIENTO

La eficacia de cualquier tipo de tratamiento se determinará a través de la medida de alguna característica que sea significativa del objetivo que se quiere conseguir.

Por otro lado, también debe tenerse en cuenta que el comportamiento de un determinado tratamiento puede variar en función de las condiciones ambientales que se hayan dado durante el tiempo de aplicación. Por lo tanto, se puede aprovechar esta fase del estudio para determinar las condiciones de aplicación más adecuadas: condiciones de temperatura y humedad ambientales, aplicación de radiación, estado del soporte (seco o con contenido de humedad en equilibrio con el aire), presencia de sales solubles, existencia de fisuras macroscópicas, etc. Por ejemplo, algunos tratamientos, como los organosilícicos, necesitan una pequeña cantidad de agua para polimerizar; los consolidantes no son capaces de rellenar fisuras grandes, etc.

La eficacia de un tratamiento de limpieza o de extracción de sales ha de determinarse mediante medidas en puntos de ensayo en el edificio. Después de finalizado el tratamiento en todas sus fases (cuando sea necesario un lavado final con agua, o la eliminación de los restos de suciedad por medios mecánicos, etc.) se tomarán muestras que se analizarán o estudiarán para determinar el grado de eliminación de los productos extraños a la piedra: sulfatos, oxalatos, sales solubles, restos orgánicos, etc. Para comparar distintos tratamientos se podrá realizar un análisis cuantitativo de la capa superficial.

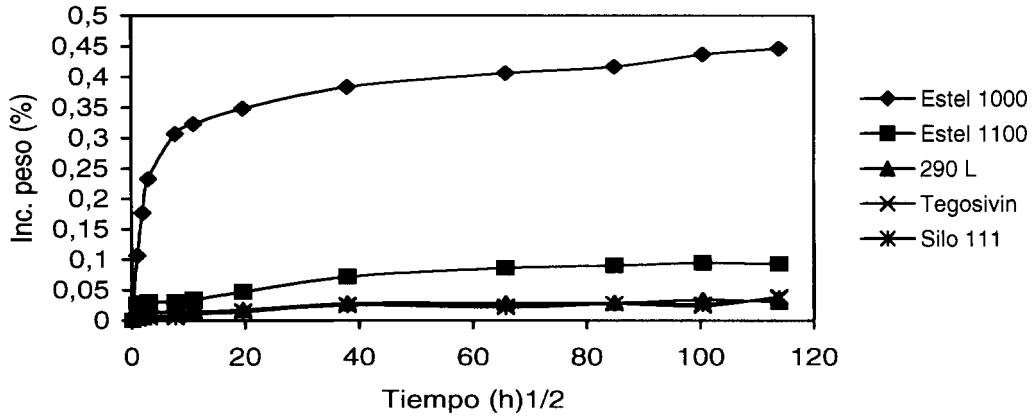
La aplicación de los productos hidrófugos proteger el material de la acción del principal factor de alteración, el agua; para ello se debe disminuir la entrada de agua líquida a través de la superficie tratada, pero procurando que la salida de agua en forma de vapor no se vea afectada significativamente, para que la humedad que pueda penetrar por otras zonas no se acumule en el interior del material. Para medir la eficacia de este tipo de tratamientos se recurre, por tanto, a la determinación de las propiedades relacionadas con el movimiento de agua, fundamentalmente la absorción.

La absorción de agua puede medirse por inmersión (a presión atmosférica, a vacío, a presión, a ebullición) o por capilaridad. El peso de las probetas se controla periódicamente hasta alcanzar valor constante, o bien se fija previamente una duración del ensayo. A partir de los datos del ensayo se calculan los coeficientes de absorción (capilar, por inmersión) y los contenidos de agua máximos.

Otras medidas relacionadas son la velocidad de absorción de gotas y el ángulo de contacto agua-piedra, que informan sobre la hidrofugación superficial. Cuanto mayor sea el ángulo de contacto más tiempo tardará el agua en penetrar en el material.

La aplicación de un consolidante tiene como finalidad devolver o aumentar la cohesión del material. Por ello su eficacia deberá evaluarse viendo cómo se modifican las características mecánicas del mismo.

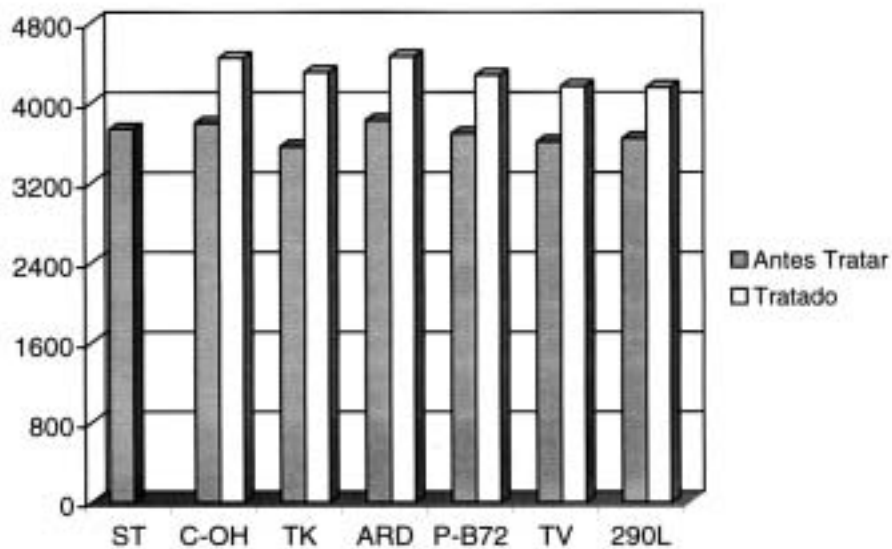
Figura 5. Absorción por capilaridad



Las propiedades mecánicas globales pueden medirse por métodos directos o por métodos indirectos. Las principales medidas directas son la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión. Sin embargo, estos ensayos no son de empleo muy general por su carácter destructivo y por requerir probetas relativamente grandes y en número elevado.

Los ensayos indirectos serían fundamentalmente la velocidad de propagación del sonido y la medida del módulo de resonancia. La velocidad del sonido es tanto más elevada cuanto mejor sea la calidad mecánica del material, de forma que los tratamientos

Figura 6. Velocidad de ultrasonidos



deben provocar un aumento en dicho valor. Esta determinación tiene la ventaja de que puede llevarse a cabo in situ.

Otro tipo de propiedades mecánicas que pueden proporcionar información sobre el comportamiento de los tratamientos consolidantes son las propiedades mecánicas superficiales. Se puede considerar que esta información es más significativa del efecto del tratamiento, ya que la zona impregnada se reduce, incluso en el mejor caso, a pocos centímetros. Las más empleadas serían: dureza al rayado, dureza a la abrasión, dureza a la penetración estática o dinámica. Esta última puede medirse in situ, por ejemplo, con un esclerómetro.

6. RESISTENCIA A LOS AGENTES DE DETERIORO: ENSAYOS DE ALTERACIÓN ACELERADA

Una vez tratadas las probetas y medidas todas sus características, el siguiente paso sería determinar la resistencia a la alteración de la piedra tratada, sometiendo las probetas a ensayos de alteración, eligiendo aquéllos que mejor reproduzcan las condiciones reales de exposición y los mecanismos de alteración que tengan lugar en el caso que se estudie.

Existen pocas referencias sobre ensayos a la intemperie con piedras, debido a su larga duración por la lenta alteración de estos materiales. En la mayoría de los casos, los ensayos a la intemperie se efectúan fundamentalmente para realizar el seguimiento del comportamiento de tratamientos aplicados sobre probetas o elementos preparados a propósito. Normalmente el grado de alteración alcanzado es pequeño, y numerosos tratamientos no pierden sus características. Para obtener información en plazos más breves, es necesario recurrir a los ensayos de alteración acelerada.

Uno de los inconvenientes que se les atribuyen a los ensayos que se indican a continuación es que son demasiado simplificados y sólo consideran el efecto de un único factor de alteración, sin tener en cuenta que pueden existir efectos sinérgicos entre las distintas variables. Por ello no existen garantías de que actúen los mismos mecanismos de alteración y de que se puedan comparar sus resultados con los obtenidos en la exposición real. Para paliar esto, numerosos autores recurren a la realización de combinaciones de ensayos, que, normalmente, consisten en ciclos en los que se van alternando los distintos factores de alteración.

Existen cinco tipos básicos de ensayos acelerados:

- Heladicidad.
- Cristalización de sales.
- Ciclos termohigrométricos.

- Ensayos de radiación UV.
- Ataque químico con soluciones o atmósferas contaminadas.

6.1. Heladicidad

Los objetivos del ensayo de heladicidad son reproducir el clima al que está sometido el material, o crear condiciones más severas, para obtener resultados en un menor intervalo de tiempo y, de esta forma, estudiar los daños originados por el hielo.

Este tipo de ensayos consiste, en líneas generales, en una serie de ciclos que incluyen una fase de hielo y otra de deshielo; en la primera, que generalmente se lleva a cabo al aire, la muestra saturada de agua se somete durante unas horas a temperaturas del orden de -1° a -25° C. La fase de deshielo puede tener lugar bien en aire, bien en agua y la temperatura varía entre 1° y temperatura ambiente. Las probetas deben secarse previamente y saturarse por inmersión en agua antes de comenzar la secuencia de ciclos.

La duración del ensayo es función de que se adopte el criterio de lograr alteraciones macroscópicas o de seguir la evolución de ciertas propiedades, controladas después de cada cierto número de ciclos. En muchas ocasiones, después de un número relativamente elevado de ciclos no se manifiestan alteraciones macroscópicas, debiendo medirse posteriormente diversas características del material para determinar el efecto del ensayo.

Para evaluar los resultados se efectúan diversas medidas, siendo las más frecuentes la pérdida de peso y la observación, a simple vista o con microscopio, de la aparición de fisuras o grietas. También pueden determinarse las propiedades físicas, hídricas y mecánicas y determinar las variaciones sufridas.

6.2. Cristalización de sales

Este ensayo tiene como objetivo simular las tensiones que se producen en el interior de los poros del material cuando cristalizan o se hidratan sales; ambos hechos implican un aumento de volumen considerable, de forma que puede llegarse a la ruptura del material.

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

La sal más frecuentemente utilizada es el sulfato sódico (SO_4Na_2), pero también lo son cloruro sódico (ClNa), sulfato cálcico (SO_4Ca), sulfato magnésico (SO_4Mg),

sulfato amónico ($\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$), bisulfato amónico ($\text{SO}_4\text{H}\text{NH}_4$), etc. Todos los sulfatos pueden cristalizar con distinto número de moléculas de agua. En especial el sulfato sódico puede cristalizar hasta con 10 moléculas de agua por cada molécula de sal ($\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), con lo que se produce un aumento de volumen del 308% con respecto a la sal anhidra, por lo que está particularmente indicado para simular las tensiones que se crean en el interior de la piedra como consecuencia de la cristalización e hidratación de sales.



Figura 7. Probetas tras ensayo de cristalización de sales.

La concentración de las soluciones no influye en la severidad del ensayo. Las concentraciones más frecuentes son el 10% y el 14%. La temperatura de la solución es una variable importante, ya que a temperatura baja se produce la cristalización del sulfato sódico en forma hidratada y el consiguiente aumento de volumen acelera la desintegración de las probetas. La impregnación con la solución salina puede efectuarse por inmersión, capilaridad o niebla salina.

La fase de secado se realiza a 65° o 105° C. Con 65° C existe el problema de que aumenta el tiempo necesario para lograr un secado completo y es difícil conseguir que la duración del ciclo sea igual o inferior a un día; por otra parte, cuando se estudian muestras con tratamientos orgánicos, la adopción de temperaturas elevadas puede degradarlos. Es posible acelerar el proceso utilizando vacío. Conseguir una eliminación total del agua de la muestra es primordial, ya que afecta a los resultados relativos. La fase de secado incluye enfriamiento en desecador antes de abordar el siguiente ciclo.

La evaluación del ensayo suele hacerse por examen visual de las alteraciones, comprobación de la pérdida de peso y de la variación de porosidad o porometría. También pueden medirse las propiedades hídricas y mecánicas y determinar las variaciones sufridas.

6.3. Ciclos termohigrométricos

Los ensayos termohigrométricos estudian los efectos que las variaciones de temperatura y humedad tienen en los materiales pétreos.

Las condiciones de humedad se pueden lograr fundamentalmente de tres formas:

- Por exposición a una atmósfera con humedad relativa elevada (cerca de la saturación) lo cual se consigue normalmente utilizando una cámara climática.

- Por inmersión en agua normalmente a temperatura ambiente.
- Con niebla, manteniendo las proximidades de la muestra y ésta misma a una temperatura inferior a la del resto del ambiente, para provocar condensaciones.

Normalmente se establecen ciclos con condiciones variables que tengan la duración suficiente para que la muestra llegue al equilibrio. Estos ensayos, muy poco severos y por tanto de gran duración, son aplicables sólo a la evaluación de tratamientos, ya que la gran mayoría de las piedras prácticamente no se alteran en estas condiciones.

Normalmente no se producen alteraciones macroscópicas, por lo que para evaluar los resultados debe recurrirse a determinar las propiedades físicas, hídricas y mecánicas y ver las variaciones sufridas.

6.4. Ensayos de radiación UV

Los ensayos de radiación están orientados a determinar el efecto de la radiación UV sobre los materiales, especialmente los tratamientos de tipo orgánico. La radiación utilizada es exclusivamente la ultravioleta, con energía suficiente para alterar sólo determinados enlaces químicos presentes en los compuestos orgánicos; los compuestos inorgánicos componentes de las rocas no se ven afectados por esta radiación.

En numerosos casos el ensayo consiste sólo en someter las muestras a radiación UV durante períodos prolongados de tiempo, oscilando desde pocos días hasta un mes. En algunas ocasiones se combina el efecto de la radiación con los ciclos termohigrométricos.

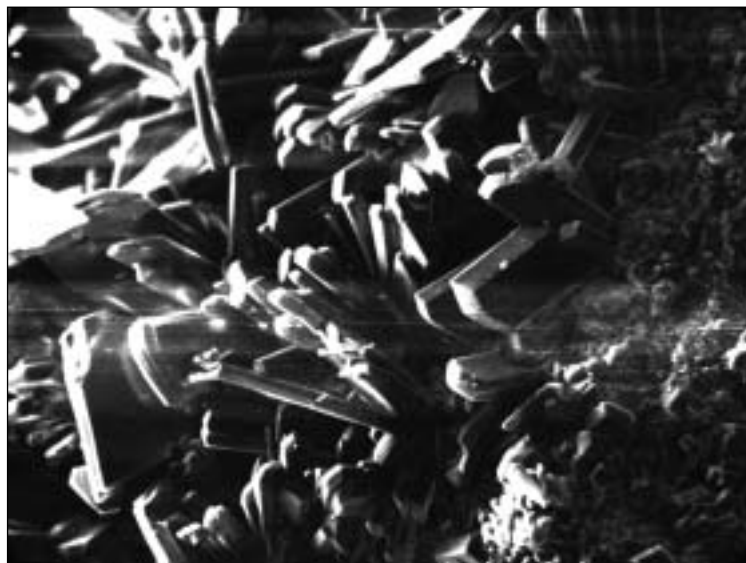
La evaluación de los resultados se realiza determinando las variaciones en las propiedades de las muestras, ya que no aparecen alteraciones macroscópicas.

6.5. Ataque químico. Ensayos en atmósferas simuladas

Es bien conocida la importancia de la contaminación atmosférica en la alteración de los materiales pétreos, con efectos que vienen a sumarse a los de los agentes meteorológicos, multiplicando enormemente la velocidad de deterioro. Los contaminantes más peligrosos desde este punto de vista son gases ácidos capaces de reaccionar con los componentes de la piedra.

Inicialmente la investigación se centró casi exclusivamente en el anhídrido sulfuroso que, bien en la atmósfera, bien sobre la piedra, puede transformarse en ácidos sulfuroso o sulfúrico, que reaccionan con el carbonato cálcico. Sin embargo, más recientemente se han llevado a cabo algunas experiencias en las que se estudia el efecto de otros contaminantes (como los óxidos y ácidos del nitrógeno y otros). El efecto de estos compuestos sobre la piedra es el que se intenta reproducir por medio de este tipo de ensayos.

Figura 8. Cristales de yeso formados en ataque con anhídrido sulfuroso.



Una primera aproximación para reproducir en el laboratorio los mecanismos implicados en estas reacciones consiste en simular el ataque químico con **soluciones**, que contienen en la mayoría de los casos ácido sulfúrico en distintas concentraciones. El contacto entre la solución ácida y las muestras puede conseguirse por inmersión o capilaridad, produciéndose un ataque muy activo. Sin considerar el grado de severidad del ataque, está claro que los mecanismos de reacción en fase líquida serán diferentes a los que tienen lugar en fase gaseosa.

Una mayor aproximación a los mecanismos reales se consigue con la utilización de **niebla o lluvia ácidas**, normalmente de ácido sulfúrico, en otras ocasiones acompañado de otros compuestos: cloruro sódico, ácido nítrico.

Evidentemente, los ensayos en **atmósferas contaminadas** están más próximos a la realidad que el ataque con soluciones. La mayoría de los ensayos de los que se tienen referencias usan atmósferas contaminadas con anhídrido sulfuroso, aunque en pocos casos se introducen otros contaminantes: ácido fluorhídrico, óxidos de nitrógeno o hidrocarburos, amoníaco, ácido nítrico. Las concentraciones de anhídrido sulfuroso utilizadas oscilan entre pocas partes por millón hasta 10.000, en función del grado de aceleración deseado.

La humedad de las muestras es un factor decisivo en los mecanismos y velocidades de alteración con anhídrido sulfuroso. La mayoría de los ensayos se desarrollan a humedades relativas altas y simulando lluvia con pulverización de agua.

En los últimos años se han desarrollado numerosas instalaciones de simulación ambiental que permiten la generación de atmósferas contaminadas, controlando

además todas las variables ambientales —temperatura, humedad relativa, concentración de los gases contaminantes— y permitiendo también el empleo de radiación UV y la simulación de lluvia o niebla (con agua o soluciones de distinto tipo). En este tipo de cámaras es posible simular la acción de todos los factores de alteración, pudiendo desarrollarse todos los tipos de ensayos anteriormente mencionados, tanto de forma separada como combinados. Los ensayos que se desarrollan en estas instalaciones son los que mejor pueden reproducir las condiciones reales de exposición.

7. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los datos obtenidos sobre los distintos aspectos que determinan el comportamiento de un producto de tratamiento puede seleccionarse el que mejor responda a las necesidades que presenta la obra a restaurar.

No puede concluirse que los resultados obtenidos por estos medios vayan a proporcionar una garantía total acerca del tratamiento adoptado. Lo que sí parece comúnmente aceptado es que esta metodología es muy útil para descartar aquellos tratamientos inadecuados. A pesar de ello, se tienen suficientes elementos de seguridad para evitar, en lo posible, actuaciones desafortunadas.

BIBLIOGRAFÍA

ESPINOSA, J.; VILLEGAS, R. La Puerta de Córdoba. La investigación científica aplicada a la caracterización de materiales y la selección de tratamientos de conservación. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 33, 120-130, 2000. ISSN1136-1867.

HONEYBORNE, D.B., et al.: Comments on the tests proposed in Doc. RILEM 25 PEM 73/10. Microporosity Doc. RILEM 25 PEM 73/15, 1973.

MAMILLAN, M.; BOUINEAU, A.: Essais de gel. Doc. RILEM 58 VTP, 81/17.

ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; SEBASTIÁN, E. Programa de Normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 15, 60-61, 1996 ISSN1136-1867.

ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades Hídricas. 1ª Parte. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 22, 45-49, 1998 ISSN1136-1867.

ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades Hídricas. 2ª Parte. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 23, 40-45, 1998 ISSN1136-1867.

VILLEGAS, R.; ONTIVEROS, E. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades mecánicas. 1ª Parte. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 28, 73-78, 1999 ISSN1136-1867.

ONTIVEROS, E.; VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Propiedades mecánicas. 2ª Parte. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 32, 121-129, 2000 ISSN1136-1867.

RILEM 6-PAN. Méthodes d'essai des pierres naturelles et artificielles. *Materiaux et Constructions* 5 (28), 231-257, 1972.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M. Artificial ageing tests on stones, marbles and bricks. *L'Ingegnere* 45 (6), 483-502, 1971.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M. Un sistema di invecchiamento artificiales di materiale lapideo: risultati preliminari. *Problemi di conservazione*, parte II, 359-374, 1973.

ROSSI-MANARESI, R. Salt crystallization test. Doc. RILEM 58 VTP 81/16.

TABASSO, M.; ROSSI-DORIA, P. Proposal for a method to control the conservation treatments on stones. *L'Ingegnere* 4 (Ap. 1974) Doc. RILEM-PEM 74/34.

VILLEGAS, R. Efecto de la contaminación atmosférica sobre los materiales pétreos. La alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla. Estudio de tratamientos de conservación. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Univ. Sevilla. 1985.

VILLEGAS, R. Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: Ensayos de alteración de materiales pétreos. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 31, 78-88, 2000 ISSN1136-1867.

VILLEGAS, R.; ALCALDE, M.; VALE, J. F.; MARTÍN, A. Diagnósis y tratamiento de la piedra. I. La alteración de la piedra en monumentos. II. Consolidantes e hidrófugos. Productos para el tratamiento de materiales pétreos. I. C. Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Monografía nº 400. Madrid. 1990.

VOS, B.H. Hygric methods for the determination of the behaviour of stones. Deterioration and protection of stone monuments. Proc. Int. Symp. Paris, 1978, 3.8.

ORGANIZA



JUNTA DE EXTREMADURA
Consejería de Infraestructuras y Desarrollo Tecnológico

PATROCINA

