

T. STAMBOLOV
J. R. J. VAN ASPEREN DE BOER

**EL DETERIORO
Y LA CONSERVACION
DE MATERIALES POROSOS
DE CONSTRUCCION
EN MONUMENTOS**

UNA REVISION BIBLIOGRAFICA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

EL INTERIOR Y LA CIUDAD
DE MATERIALES PULSOS
DE CONSTRUCCION EN MONUMENTOS

UNA LECCION DE HISTORIA

W. Stanley Rice

EL DETERIORO Y LA CONSERVACIÓN
DE MATERIALES POROSOS
DE CONSTRUCCIÓN EN MONUMENTOS

UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

EL DETERIORO
Y LA CONSERVACIÓN
DE MATERIALES POROSOS
DE CONSTRUCCIÓN
EN MONUMENTOS

UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

ELABORADO POR DR. JOSÉ GUILLERMO



INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA

SECRETARÍA DE CULTURA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLÓGICAS

ICOMOS-MEXICANO

(Bibliografía / Técnica)

Serie Antropológica: 37

T. STAMBOLOV
J. R. J. VAN ASPEREN DE BOER

EL DETERIORO Y LA CONSERVACIÓN DE MATERIALES POROSOS DE CONSTRUCCIÓN EN MONUMENTOS

UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Traducción de : LUIS TORRES M.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

México 1984

EL DETERIORO
Y LA CONSERVACIÓN
DE MATERIALES POROSOS
DE CONSTRUCCIÓN
EN MONUMENTOS

UNA REVISTA BIBLIOGRÁFICA

Traducción de: José Toranzo

Primera edición: 1984

DR © 1984. Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria. 04510 México, D. F.

DIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES

Impreso y hecho en México

ISBN 968-58-0518-0

PRÓLOGO DEL TRADUCTOR

Durante la dominación española en América Latina se desarrolló una gran actividad constructiva en edificios antiguos. Casi siempre se trataba de reconstrucciones, ampliaciones hechas con fines utilitarios, sin pretender explícitamente la preservación de los valores culturales. Si éstos llegaron a perdurar fue sólo por accidente.

Al realizarse la Independencia, los nuevos gobiernos sintieron la necesidad de consolidar la nacionalidad y afirmar la conciencia ciudadana. Uno de los caminos escogidos consistió en apoyarse en el pasado. De esta manera se inicia la salvaguardia del patrimonio histórico, comienza la restauración de edificios significativos —elevados a la categoría de monumentos—, y con el tiempo llegan a establecerse dependencias encargadas de conservar esta herencia. Sin embargo, con fines de prestigio regionalista, prevalecieron primero criterios estéticos para dejar “bonitos” los edificios; posteriormente los intereses turísticos y económicos son los que han prevalecido como normas en no pocas “restauraciones”.

En Latinoamérica la buena restauración actual se caracteriza por la aplicación, cada vez más atinada, de los criterios expresados en dos documentos internacionales —la mayor parte de las veces como consecuencia directa de ellos—: la *Carta internacional de la restauración*, o *Carta de Venecia*, y las *Normas de Quito*. Pero, no obstante, todavía coexisten tales restauraciones con intervenciones de mala factura. Los aspectos arquitectónicos y los que dependen de la historia del arte, generalmente han sido bien resueltos; pero el control de los agentes agresores y el tratamiento de materiales deteriorados apenas si se ha iniciado. En consecuencia las

publicaciones en este campo son prácticamente inexistentes.

Así, cuando Stambolov y Van Asperen de Boer expresan la opinión de que es muy deficiente su información acerca de lo que ha producido América Latina en este campo, están prácticamente en un error, pues poco hay que valga la pena de incluirse en su revisión bibliográfica.

La importancia de publicar la traducción de *El deterioro y la conservación de materiales porosos de construcción en monumentos*, radica en su carácter de revisión, ya que presenta un panorama muy completo del tema enunciado. Si el lector recuerda que, con posterioridad a la edición de este trabajo, han existido aportaciones como las publicadas en la revista *Lithodastia*; si piensa, también, que esta obra no es un tratado que solucione todos los problemas de conservación de materiales a los que se enfrenta el arquitecto restaurador; y, por último, si toma en consideración las advertencias de los autores, tendrá entonces una fuente utilísima de información primaria que, si es necesario, puede conducirlo a los mismos trabajos originales.

La traducción se realizó en la 1ª edición de 1972; sin embargo, se verificó con la segunda edición de 1976 y se incluyen: el suplemento de 1975 y el de 1978, presentados por los autores en la 4ª y 5ª reuniones trianuales del Comité de Conservación del ICOM en Venecia y Sagreb respectivamente.

Deseamos que este campo se desarrolle en nuestros países, y creemos que la información presentada aquí en español estimulará la búsqueda de solución a los problemas específicos que se nos presenten.

La traducción no estuvo exenta de problemas para encontrar un vocabulario correcto, ya que el castellano no dispone de todos los tecnicismos requeridos. Además, las escasas publicaciones en este idioma cubren pocos de los tópicos mencionados. Esperamos que las diferencias regionales no sean un obstáculo para la comprensión. El doctor Luis González R., editor del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, revisó la traducción para la cual ambos procuramos siempre el máximo apego al texto original inglés.

Agradecemos al ICCROM International Center for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural

Property, con sede en Roma, la autorización que nos otorgó para publicar este texto en español, en especial a su director señor arquitecto Bernard M. Feilden.

Agradecemos también a Rocío Jiménez Díaz, pasante en restauración y conservación, su apoyo técnico en la transcripción de todas las fórmulas de este libro.

Luis Torres Montes

1. INTRODUCCIÓN

Una versión de la Nomenclatura, propia de un conjunto de las terminaciones de la lengua y de las palabras que se usan en ella, es también un instrumento de trabajo. Aunque esta es la primera parte de la Nomenclatura, es también una herramienta de trabajo, una herramienta que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto.

La parte de la Nomenclatura que se refiere a la información es la que se refiere a la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto.

La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto. La Nomenclatura es un instrumento de trabajo que se usa para la información, como es el caso de los diccionarios, y para la comunicación, como es el caso de los libros de texto.

1. INTRODUCCIÓN

Esta revisión de la bibliografía, presenta un panorama de los fenómenos de deterioro y de los métodos de conservación en relación con monumentos antiguos. Aunque sólo un pequeño porcentaje de la literatura técnica utilizada está directamente relacionada con monumentos, gran parte de la información contenida en tales publicaciones puede aplicarse a la preservación de monumentos, bien sea directamente o con modificaciones. Es necesaria una selección de la extensa bibliografía sobre investigación de la construcción, porque el principal interés de este campo se enfoca a materiales modernos, como el concreto, que aún presentan poco interés en relación a la preservación de monumentos.

Se puede seguir el progreso de la investigación sobre la construcción en los *Building Science Abstracts*, publicado por la Building Research Station (50). Los aspectos técnicos de la preservación de monumentos se resumen en los *IIC Abstracts* (133).^{*} Las publicaciones periódicas que informan sobre restauración de monumentos en diversos países (1) comprenden poco que pueda considerarse información técnica de acuerdo con el sentido estricto de esta revisión, y se refieren principalmente a problemas históricos y arquitectónicos. También se han publicado libros generales sobre restauración de monumentos (20, 180). Los problemas estéticos generales relativos a la restauración de monumen-

^{*} Los *IIC Abstracts* fueron publicados por el IIC (International Institute for conservation) hasta 1967; terminan con el volumen núm. v. A partir del núm. vi, cambian de nombre, saliendo actualmente bajo el título de *AATA (Art and Archaeology Technical Abstracts)*. Los "Freer Gallery of Art ABSTRACTS", de R. J. Gettens y Bertha Ulsiltov, anteceden a los *IIC Abstracts*. (N. del T.)

tos han sido tratados ocasionalmente en la bibliografía (39, 145, 241). Los problemas relacionados con la ingeniería civil no han sido tratados en esta revisión. Se recomiendan al lector publicaciones generales como la de Johnson (138), para la reparación y reforzamiento de estructuras, y como la de Kollbrunner (169) en relación a cimientos y consolidación de edificios. En la bibliografía se han mencionado algunas aplicaciones en preservación de monumentos (6, 106, 332, 333).

De la presente revisión se han excluido la madera y otros materiales orgánicos, y para la preservación de polines de construcción se remite al lector a la bibliografía (63, 125, 184). Aunque se mencionan textos de Europa oriental, los autores creen que las contribuciones y los problemas de Asia, África y Latinoamérica han recibido escasa atención.

Debe enfatizarse que esta recopilación no es crítica, al igual que toda revisión bibliográfica, en el sentido que los autores no han probado los métodos y las fórmulas dadas. De ninguna manera los diferentes procesos de tratamiento deben considerarse como recomendación de los autores.

No se han incluido fotografías, tablas u otras ilustraciones. Para consultar ese material adicional se remite al lector a las obras originales. Este libro es el resultado de la combinación de dos revisiones preliminares presentadas al Comité para Laboratorios de Museo del ICOM, en su reunión de 1967 en Bruselas, y al Comité para Conservación del ICOM, en su reunión de Amsterdam en 1969. Sin embargo estos informes no se publicaron formalmente y por ello permanecieron inaccesibles al público en general.

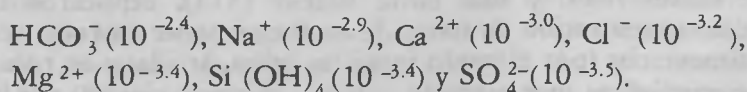
2. INTEMPERISMO POR HUMEDAD Y SALES

2.1. *Generalidades*

Las piedras de construcción, los ladrillos, los morteros y las argamasas, son materiales porosos permeables al agua y al vapor de agua en un grado que depende de su estructura capilar. El vapor de agua, que casi siempre está presente en el aire, penetra de una manera compleja (92, 288) dentro de los poros, y una cantidad específica es retenida en el material poroso en equilibrio con la humedad relativa del

aire. Una disminución suficiente en la temperatura o un aumento en la concentración de vapor de agua pueden provocar la condensación. La humedad en los materiales de construcción es el tema de la sección 3.

Debido a la respiración de los organismos, el agua que se filtra en el suelo contiene algunos cientos de veces más dióxido de carbono que el aire húmedo, y por esto reacciona como una solución diluida de ácido carbónico (285). Como consecuencia de esto se produce una disolución gradual de los siguientes minerales: feldespato sódico, feldespato cálcico, montmorillonita cálcica, caolinita y calcita. En particular con la calcita, la disolución se efectúa rápidamente hasta que se alcanza el equilibrio entre el carbonato de calcio, el ácido carbónico y el bicarbonato de calcio. Cualquier disolución posterior de la calcita está determinada por la entrada de más dióxido de carbono a este sistema en equilibrio (14). No obstante, los otros minerales sufren una disolución incongruente, esto es, su disolución va acompañada por un cambio de fase. Después de que los constituyentes han sido convertidos a carbonato se descomponen y, por medio de hidrólisis, forman un hidróxido menos soluble. Stamm y Leckie (285), mencionan los siguientes constituyentes principales y su concentración molar media en aguas terrestres:



El agua de lluvia también presenta reacción ácida, gracias a los contaminantes atmosféricos gaseosos disueltos en ella. En el aire de una ciudad grande, la concentración del dióxido de azufre varía entre 0.1 y 10 mg/m³, mientras que el contenido del dióxido de carbono no excede de 10 g/m³ (143). Una cantidad considerable de dióxido de azufre es oxidada por la luz del sol (143) o por contaminantes como pentóxido de vanadio (116) u óxido (III) de hierro (235) convirtiéndose en trióxido de azufre, de manera que el ácido sulfúrico resultante por su disolución, puede aumentar grandemente la acidez del agua de lluvia.

En los materiales de construcción el agua es transportada a través de los capilares. En el curso de este movimiento, las sales solubles se extraen de los materiales de construc-

ción y se someten a difusión, hidrólisis o precipitación. En presencia de un gradiente térmico los iones de estas sales disueltas migran hacia las partes más calientes, mientras que el agua se mueve hacia las partes más frías (298). Entonces algunas de las sales solubles pueden ser hidrolizadas o reaccionar con otros compuestos disueltos, y así dan lugar a depósitos insolubles y voluminosos (147).

La evaporación del agua en los materiales porosos tiene lugar en la superficie y depende de la humedad suministrada del interior (92, 288). Cuando el agua enriquecida con sales solubles fluye hacia la superficie, la evaporación aumenta la concentración salina. La precipitación y la cristalización pueden observarse en diferentes puntos de los poros, según la solubilidad de las sales y la velocidad de evaporación del agua (298). Esto ocurre en la superficie cuando ésta recibe regularmente agua (eflorescencia), y abajo de la superficie cuando el frente del líquido retrocede hacia el interior, lo cual sucede cuando los poros superficiales grandes se vacían (subflorescencia) (112, 147, 165, 166, 197, 198, 298, 315). Ambos tipos de deposición salina pueden existir juntos y están frecuentemente conectados entre sí (165). El origen de las sales precipitadas puede hallarse en el material de construcción mismo (73, 198).

Kaiser (144) y más tarde Weber (317), explicaron la alta concentración de iones de azufre presente en rocas sedimentarias (por ejemplo arenisca, caliza, arcilla) y en rocas metamórficas (por ejemplo cuarcita, mármol, pizarra) por la lenta desintegración de la piritita (Fe S_2) y de la marcasita, que se encuentran en esas rocas y forman hidróxido de hierro (III) y ácido sulfúrico. No obstante, la contaminación atmosférica es la fuente más importante de sales solubles (40, 57, 144, 256, 257).

Grün (116) estableció que el tetraetilo de plomo, un aditivo antidetonante para el combustible de motores, el alquitrán, el betún, el dióxido de carbono, el dióxido y el trióxido de azufre, son los contaminantes atmosféricos más importantes que penetran dentro de los materiales de construcción. No obstante, la sal común, el cemento y el *humus* deben también agregarse a esta lista (218).

2.2. Formación de costra

El movimiento del agua en los materiales porosos tiende a empobrecer el medio cementante. Las rocas sedimentarias, los morteros y las argamasas pierden algo de sus adhesivos, los cuales al disolverse son transportados a la superficie. Durante la evaporación del agua, se precipitan en el siguiente orden: carbonato de calcio, carbonato de magnesio, sulfato de calcio y diversos cloruros. Consecuentemente, cerca de la superficie, los poros se van llenando gradualmente a expensas del debilitamiento interno, y de esta manera se va formando una costra que contiene material calcáreo, yeso, cloruros, etcétera. Esta costra es únicamente la capa superior de una corrosión estructurada en las siguientes zonas, descritas a partir de la superficie hacia el interior:

1. Costra; 2. Estrato de adhesivo empobrecido, el cual puede consistir de varios sustratos, y 3. Núcleo sólido del material (16, 166, 244, 249, 265, 277, 297). Si las sales productoras de la costra son muy poco solubles, el material adquiere una cubierta protectora (pátina de la piedra, calcín). Este es, particularmente, el caso con costras que consisten de hidróxidos de hierro, aluminio y magnesio o de fosfatos (166). Por otro lado, el yeso, los cloruros, los nitratos (29, 82, 112, 117, 123) y las sales de ácidos orgánicos (198, 305) depositados en el frente de evaporación, o bajo él, son causa de graves deterioros (71). Los cloruros son muy higroscópicos y son las sales las que se redisuelven primero durante la condensación del agua presente en el aire circundante. Una vez en solución son muy activas en relación a tres aspectos: son muy móviles y por ello penetran y rompen muchas estructuras cristalinas; peptizan, es decir suspenden en agua grandes conglomerados de moléculas; y por último aumentan la no estequiometría de los cristales. Estas propiedades de los cloruros explican la peligrosa lixiviación del medio cementante observada en piedras que contienen estas sales. De allí que tales materiales de construcción tiendan a pulverizarse. Los nitratos y las sales de los ácidos orgánicos son igualmente peligrosos.

La acción de los sulfatos solubles sobre los materiales de construcción es muy diferente (222).

Estas sales (Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4) se precipitan en

los poros, a partir de sus soluciones sobresaturadas en forma de hidratos ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y conforme se efectúa la evaporación del agua, los depósitos de estos hidratos se secan. Las sales anhidras así formadas son agregados microcristalinos y, debido a su fina estructura porosa, promueven el flujo de mayores cantidades de solución del interior de los poros a la superficie (212, 215), lo que puede causar que se llene gradualmente el espacio poroso detrás de la zona de evaporación. El aumento de la humedad relativa del aire (durante enfriamientos, rocío, niebla o lluvia) hidratará las sales anhidras que se han secado previamente, con la consecuente expansión volumétrica, y por ello presionarán sobre las paredes de los poros (presión de hidratación) (212). La formación de sales anhidras e hidratadas, así como la conversión de una en otra, dependerá de su presión de vapor y su temperatura. Similarmente, una sal hidratada pierde agua si su presión de vapor es más alta que la presión parcial de vapor de agua en el aire. Por el contrario, una presión parcial de vapor de agua en el aire, que sea mayor a la presión parcial de una sal anhidra, producirá la hidratación de ésta. Por ejemplo, en el caso de una solución de sulfato de sodio a temperaturas abajo de 32.4°C el sulfato de sodio se precipita como el compuesto hidratado $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ pero a temperaturas arriba de 32.4°C se convierte en la sal anhidra Na_2SO_4 . El aumento de la humedad relativa lo convertirá nuevamente en un hidrato, pero el que la conversión sea completa o parcial estará determinado por el grado de diferencia entre la presión parcial de vapor del agua y la presión de vapor de la sal en cuestión, a una temperatura definida. De allí que la cantidad de daño resultante por esta contracción y presión rítmicas sobre las paredes de los poros, no está determinada por el máximo aumento volumétrico que una sal es capaz de producir, sino por la presión de hidratación que pueda desarrollar en las circunstancias dadas. En otras palabras, no es la presión total de hidratación la que es importante en el deterioro de los poros por expansión volumétrica de las sales, sino la presión proporcional a la relación entre la presión de vapor del hidrato y la del agua pura a una temperatura determinada (212). Cuando la presión de hidratación sobrepasa la resistencia de las paredes de los poros, éstos se rompen y en conse-

cuencia dejan más espacio disponible para la precipitación de sales (242). Los materiales así alterados son muy permeables al aire, y con ello, más vulnerables a la expansión volumétrica.

En dirección paralela respecto a la pared de los poros, el aumento de volumen sobre la superficie puede ser consumido por la atmósfera, pero en dirección perpendicular a la pared no sucede lo mismo. La superficie entonces se corruga y muy probablemente aparecerá una costra arrugada, oscurecida y sucia (265). Si los cloruros están presentes (pulverizan una superficie corroída debido a la actividad mencionada anteriormente), la exfoliación se hace muy intensa porque el escamado se ayuda por la habilidad de estas sales para destruir las estructuras cristalinas. Las costras de corrosión pueden exhibir varios colores (199, 270), pero en la práctica, tales decoloraciones son dominadas por el color negro grisáceo del hollín.

Las soluciones muy diluídas de los sulfatos solubles, por ejemplo los sulfatos de sódio y de magnesio, son capaces de producir deterioros graves. Según Butterworth (55) esto se debe a que la mayoría de los poros presentan secciones transversales elípticas. La evaporación de soluciones en un tubo capilar de vidrio (de sección transversal circular) conduce a un retiro uniforme del menisco en el interior del capilar, y la concentración de la solución obtenida bajo el menisco se mueve por difusión hacia el interior. En el caso de un poro de sección transversal elíptica (o de cualquier sección transversal irregular que comprenda una curvatura elíptica), el menisco no se desplaza hacia el interior en los sitios donde termina el eje mayor; allí la pérdida de la solución por evaporación se compensa por un suministro lateral. Esto resulta en una sobresaturación local y ello produce eflorescencias en los puntos donde el poro es estrecho, en cuyo caso la expansión por hidratación causa deterioro aunque el poro no esté lleno de sal. Las soluciones que contienen más de 0.1% de sulfato se consideran peligrosas para materiales porosos (56, 85).

2.3. Intemperismo de diversos materiales de construcción

Los principales agentes de intemperismo han sido discutidos extensamente por Winkler (328). El dióxido de car-

bono (procedente de la desintegración de materiales orgánicos, de la fotosíntesis, o de las fuentes industriales), el dióxido de azufre, el trióxido de azufre, los cloruros, los nitratos, el smog, el agua de lluvia, el agua freática, las plantas y los animales, etcétera, influyen en la desintegración de la piedra (19) de edificios y monumentos (87) de diferentes maneras. Entre ellos, los compuestos del azufre y especialmente los sulfatos, se consideran como los más corrosivos (282).

2.3.1. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias son severamente atacadas por el agua ya que son lo suficientemente porosas para permitir el movimiento frecuente de soluciones salinas (148, 196). En diversas especies de calizas se producen costras que consisten de gran número de hojuelas. La costra es al principio blanda, porosa, y de color gris, blanco o amarillo, pero después de algún tiempo se hace dura, por la cementación causada por el flujo continuo hacia la superficie del carbonato de calcio disuelto, y su color cambia a amarillo-café-rojizo (249). La uniformidad de la costra es destruida por fracturas que aparecen en las inclusiones de pirita de la estructura pétreas (151, 317), o por conversión en yeso (124, 244, 265). La contaminación atmosférica (244), así como los sulfatos en el agua del suelo (56, 85, 114, 151), pueden ser responsables de las costras de yeso. En las rocas calizas, las áreas que permanecen húmedas por un largo periodo de tiempo, son las que primero desarrollan costras de yeso (82), y rápidamente se ennegrecen con el polvo y la suciedad (168).

Tales costras se desprenden eventualmente (265). Los bloques de caliza que contienen sales de hierro se vuelven de color café-rojizo después de que quedan expuestos al aire húmedo y, debido al aumento de volumen que acompaña a la hidrólisis de los compuestos de hierro, tienden a desintegrarse (17). Lo mismo ocurre, aunque en grado mayor, con el mármol (151, 317).

De Henau (77), en un artículo que trata de la estructura cristalina de las rocas calizas, ha sugerido que el grado y distribución de la cristalización de calcita son importantes

para entender el intemperismo. Después de estudiar microscópicamente 40 tipos de caliza, De Henau concluye que en el caso de los oolitos embebidos en una matriz microcristalina, el contacto con sulfatos conduce a una desintegración considerable, ya que la presión de expansión característica de la conversión de carbonato de calcio a yeso no puede ser absorbida por la masa cristalina compacta. Por otro lado, los tipos de caliza, que consisten de oolitos conectados entre sí por materia cementante, porosa y suelta, pudieron absorber tal presión y por ello soportar la acción de las soluciones de sulfatos.

La aparición en las rocas de una florescencia escasa, blanquecina o amarillenta, la cual ha sido llamada "leche de luna" (*Mond milch*), parece ser el resultado de un proceso complejo sobre las inclusiones calcáreas, dolomíticas o de fosfatos de calcio, que comprende la acción de microfloras amonificantes y reductoras de hierro. Una forma criptocristalina de calcita, la lublinita, se ha sugerido como representativa de la "leche de luna", pero la presencia de arcillas y cuarzo pueden modificar notablemente su constitución (137).

La "leche de luna" no es generalmente deletérea para las rocas, pero puede oscurecer los cortes de los relieves esculpidos como en Borobudur (313), o borrar los perfiles de murales como en las cuevas de Lascaux (137).

En las areniscas cuyo adhesivo consiste de material calcáreo, el patrón de corrosión no difiere del de las calizas (13, 40, 119). Un fenómeno notable del deterioro de areniscas es la disolución del constituyente silíceo del adhesivo como ácido silícico coloidal (73, 124).

Como material de construcción, las areniscas se intemperizan en gran escala en un ambiente desfavorable. Un estudio extensivo de la erosión y la formación de costra en las areniscas de los monumentos de Cambodia, ha sido publicada por Delvert (79).

En Alemania, los exámenes de piedras naturales de construcción, mostraron que la corrosión debida a ácido carbónico (dióxido de carbono en agua), aparece en paredes expuestas a la lluvia, mientras que la desintegración por sulfatos (costras de yeso, eflorescencia), se confirmó en áreas protegidas de los efectos directos de la lluvia (115).

2.3.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas, por ser producto del enfriamiento de la lava, son coherentes, firmes y no porosas, siendo en consecuencia estables al contacto con el agua. No obstante, su estabilidad disminuye con los cambios de temperatura. La erosión resultante de las expansiones y contracciones alternadas e irregulares, hace porosas, a partir de la superficie hacia el interior, a las rocas ígneas, de manera que se vuelven accesibles al agua. El granito y el basalto son marcadamente vulnerables a esta clase de deterioro (22, 40, 283), porque después del relajamiento mecánico de su superficie, el agua penetra y disuelve al feldespato en su interior (198).

Aunque las rocas ígneas no contienen piritas, ésta puede contaminarlas de varias maneras y luego atacarlas con los productos de su oxidación e hidrólisis (317). Las rocas ígneas que se han hecho porosas por la erosión son también atacadas por soluciones acuosas. Esta clase de intemperismo ha sido observado en Londres (54) y en bloques andesíticos de Borobudur en Java (313).

2.3.3. Los ladrillos

Los ladrillos porosos de arcilla amasada se deterioran mucho por eflorescencias y subeflorescencias (25, 55, 56, 58, 85, 233, 270). El mecanismo de formación de eflorescencias en ladrillos, no está claro aún (37), pero se ha considerado que se debe a las sales solubles de las juntas de mortero (119, 260). El origen de las sales depositadas en los ladrillos puede ser el barro mismo (56, 251) o el combustible usado durante la cocción (126), pero muy frecuentemente estas sales dañinas entran a los ladrillos desde el exterior (agua del suelo, juntas de mortero, contaminación atmosférica) (110, 114). Según Schmidt (260), las juntas de mortero son en particular la fuente principal de sales solubles dañinas, y se cree que el daño a los ladrillos, que resulta de su actividad, corresponde a la facilidad de transferencia de estas sales desde el mortero hacia los ladrillos. Se han sugerido dos posibilidades para explicar la formación de eflorescencias:

1. Los hidróxidos alcalinos disueltos del mortero, junto con el ácido carbónico del aire húmedo, convierten el yeso incluido en los ladrillos, en sales fácilmente solubles, por ejemplo sulfato de magnesio.
2. El hidróxido de calcio del mortero transforma por reacción de intercambio, a los compuestos de metales alcalinos y de magnesio de los ladrillos, de otra forma insolubles, en sales solubles (260).

No obstante, se ha observado (51) que en ciertos casos el agua filtrada transporta sulfatos solubles de los ladrillos a las juntas de mortero en donde dan origen a las eflorescencias. Si el mortero contiene cemento Portland, tales soluciones de sulfato conducen a la formación de sulfoaluminato de calcio. Este proceso es acompañado por expansiones que causan una desintegración progresiva de las juntas de mortero. Mayor información sobre el daño de las eflorescencias de varios edificios puede encontrarse en el trabajo de Moritz (210).

Las manchas en los ladrillos pueden también deberse a las eflorescencias (156, 289). El deterioro causado por fluctuaciones térmicas en mampostería de ladrillos, es similar al que se observa en mampostería de piedra, y es tratado en detalle por Kieslinger (154).

2.3.4. Morteros y argamasas

Los morteros y las argamasas consisten de mezclas tales como arena, grava o ladrillos pulverizados, cementados con una masa compacta de cal o cemento. La durabilidad de los morteros y de las argamasas depende de la distribución de los diferentes tamaños de partícula de sus agregados (123, 225, 226). La siguiente tabla presenta composiciones adecuadas de agregados para morteros y argamasas (84).

Tamaño de partículas de los agregados (mm)

	3-7	1-3	0.2-1	0-0.2	total
Bueno para todos los morteros y argamasas	40%	36%	12%	12%	100%

Bueno para mortero y argamasas de cal	25%	35%	22%	18%	100%
Bueno para mortero y argamasas de cemento	0	30%	45%	25%	100%
No debe usarse	0	0	65%	35%	100%

Un agregado de granos pequeños y de igual tamaño posee una gran superficie que no puede ser cubierta por la cantidad de adhesivos prescrita en fórmulas de uso común y esto debilita las propiedades mecánicas del mortero (141). Además, un exceso de granos finos en la composición del agregado, puede conducir a la solidificación parcial del adhesivo: esto es, a la formación de una capa delgada y densa en áreas de exposición al aire, bajo la cual el mortero queda como una pasta suave. Tal barrera obstruye la absorción de dióxido de carbono por el mortero, así como la evaporación del agua. En consecuencia, no se cumple el requisito para la deposición eficiente del carbonato de calcio producido por la cal apagada [contenido de humedad del mortero de 0.6 al 1.2% (122)], y el mortero no se endurece (123). La relación usual de agregado al adhesivo es 3:1, pero pueden también usarse cantidades más grandes de adhesivos en caso de que se trate de aplanados finos, encalados, murales, etcétera (99, 123, 134).

Las paredes secas deben humedecerse antes de aplicar la argamasa porque, de otra manera, la pared extraería el agua de la argamasa aplicada sobre ellas. Esto generalmente debilita la unión entre pared y argamasa (321) y se cree que es causa de muchos fenómenos de deterioro de las argamasas (123, 176). Las eflorescencias son particularmente dañinas para las argamasas (176), porque debido a la migración de soluciones salinas extraídas de las paredes atrás de ellas, sus poros se llenan de preferencia con sulfatos y cloruros. Consecuentemente, después de cierto número de ciclos de evaporación-hidratación, no pueden tolerarse ya las eflorescencias y se observa un colapso de las argamasas (110, 300). Los sulfatos solubles en las argamasas reaccionan con el adhesivo calcáreo y forman yeso que, por disolución y expansión lentas, tiende a destruir el aplanado por com-

pleto (21). La adición de caseína a la argamasa no previene la formación de yeso (146). Las sales solubles distintas a los sulfatos, aunque no produzcan daños mecánicos, con frecuencia producen manchas amarillentas, verdosas o parduscas (21).

Además, cuando los compuestos de hierro o de magnesio encuentran accesos a los poros de la argamasa, es probable la aparición de diversas formas de decoloración (189).

En el cemento, el concreto o morteros que contienen cemento, las eflorescencias se deben a la presencia de óxido de calcio sin combinarse en el cemento (15). En cantidades que exceden al 5%, la magnesia no combinada puede ser también responsable de las eflorescencias (16). Pueden ocurrir deterioros particularmente serios cuando los sulfatos de suelos sulfatados o del agua freática, entran en contacto con tales cementos (52). Ya que las eflorescencias y la formación de yeso destruyen gradualmente a los aplanados se recomienda, en la bibliografía antigua sobre el tema, agregar a las argamasas adhesivos orgánicos tales como huevo, leche, sangre de buey etcétera, antes de su aplicación (34). Sin embargo estos materiales interfieren con el fraguado de las argamasas y por ello no se encuentran en uso.

3. HUMEDAD EN MATERIALES POROSOS DE CONSTRUCCIÓN

3.1. *Introducción*

Los aspectos higrométricos de la humedad en monumentos se discutieron durante un simposium organizado por el ICOMOS en 1967 (204, 310). Vos (311) ha realizado una revisión de las propiedades higrícas y de su medición y ha sugerido que, para materiales de construcción empleados en monumentos, deben recolectarse datos del contenido de humedad higroscópica, el coeficiente de absorción de agua, el contenido crítico de agua, el contenido máximo de agua y la conductividad del vapor. Mamillan (193) ha sugerido métodos para medir los parámetros físicos y mecánicos de piedras empleadas en monumentos, y Pochon y Jatón (229)

han revisado las técnicas para el estudio del deterioro biológico de tales piedras.

Las ventajas de tal enfoque sistemático para la preservación de monumentos han sido discutidas (10).

Pacquet (219) revisó los métodos de medición de humedad en monumentos. La influencia de la humedad en el deterioro de monumentos, ha sido considerada por cierto número de autores. Plenderleith (228) traza un panorama de los problemas de la humedad en el deterioro de monumentos, y los datos colectados por Coremans (72) sobre cierto número de monumentos en o cerca de los trópicos, incluyen información sobre condiciones climáticas. En muchos casos, la densa precipitación pluvial de los trópicos y las grandes variaciones de temperatura, se encuentran como causas importantes de la degradación de la piedra. Los sistemas efectivos de drenado para prevenir la acumulación de agua son, en los trópicos, un elemento importante para la preservación de monumentos (102, 103, 313). Kidder (150) ha discutido los efectos de la humedad sobre los monumentos localizados en regiones desérticas. A pesar de lo anterior, es necesaria mayor investigación sobre los efectos de la impregnación y la consolidación (295) en regiones desérticas y tropicales, tomando en cuenta las fluctuaciones extremas de humedad relativa y temperaturas superficiales. Parece que sólo puede progresarse en la preservación de monumentos por medio de la colaboración efectiva de especialistas de muchas disciplinas diferentes, trabajando juntos como un equipo (313).

La mayoría de las publicaciones sobre humedad en materiales de construcción no tratan de preservación de monumentos; por ello en los puntos que siguen se da un breve resumen de algunos aspectos teóricos como base para los problemas relacionados con monumentos.

3.2. Aspectos hídricos

La humedad tiene una importancia máxima en el deterioro de materiales silíceos de construcción.

Los daños por congelación (ver sección 4.2.) son, como es natural, improbables sin humedad. El deterioro biológico depende de la presencia de humedad (132). Los con-

taminantes atmosféricos reaccionan con el agua para formar soluciones aciduladas, las cuales atacan la piedra y materiales similares (ver sección 2). La mayoría de los fenómenos de deterioro pueden explicarse por cambios cíclicos de la humedad en presencia de sales solubles (ver sección 2.2). En tales casos, el daño es proporcional al número de ciclos y no a la concentración de sales hidratadas (55, 212).

La humedad se presenta como vapor, líquido y hielo. La humedad absoluta, o sea la concentración de vapor de agua (c) es la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire seco y depende de la temperatura. A cada temperatura corresponde una concentración máxima de vapor de agua. Conforme decrece la temperatura del aire que contiene vapor de agua, se alcanza el punto de saturación y se comienza a formar agua. La temperatura a la cual ocurre esto se llama punto de rocío. La humedad relativa (φ) es la relación entre la concentración del vapor de agua (c) en el aire y la concentración máxima (c') posible (de vapor de agua) a la misma temperatura. Se expresa en %. Se han publicado tablas de temperatura versus c' (185, 288, 322).

El contenido de humedad de un material poroso normalmente es definido como:

$$\psi = \frac{100m_{H_2O}}{m_{seco} + m_{H_2O}} (\%) \quad (F1)$$

donde m_{seco} es la masa del material seco (185, 322).

Esta definición incluye al hielo y al agua de hidratación (ver sección 2.2). El contenido de humedad de un material poroso puede cambiar por transferencia de vapor de agua y de agua.

La porosidad se define como la relación entre el volumen de los poros (V_p) y el volumen total del material poroso (V).

Si ρ_s es la densidad de la parte sólida del material poroso y ρ es la densidad total, la porosidad será (94):

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{V_p}{V} \quad (F2)$$

Los materiales de construcción con una alta porosidad, tienen mucho espacio para el agua y, si sus poros están co-

municados entre sí, podrán retener un alto contenido de humedad cuando se saturan. No obstante, la porosidad no es una medida directa de permeabilidad a los líquidos o de la succión (ref. sec. 3.2.2.).

3.2.1. Difusión del vapor de agua

Si un material seco se coloca en una atmósfera que contiene vapor de agua, el aire húmedo se difundirá dentro del material. Para cada material existe una relación entre humedad relativa del aire circundante y la cantidad de vapor de agua retenida por el material.

A esta cantidad se le llama contenido de humedad higroscópica (ψ_H).

Las curvas de ψ_H graficadas contra humedad relativa dependen de la temperatura. Se les llama frecuentemente isothermas de sorción y han sido medidas para muchos materiales porosos (92, 185).

Ellas muestran una ligera histéresis que puede explicarse, para bajas humedades relativas, por la absorción de moléculas de agua en las paredes de los capilares; y a altas humedades relativas, por condensación capilar (92, 288). La condensación capilar ocurre únicamente en capilares muy estrechos [$r < 5 \times 10^{-8}$ m (288)] porque la máxima concentración del vapor de agua disminuye en los microcapilares mencionados.

Materiales como el ladrillo, con bajo contenido de humedad higroscópica a 95% de humedad relativa se llaman no higroscópicos. Por otro lado, la madera es muy higroscópica ($\psi = 22\%$ a $\varphi = 95\%$) (288).

La cantidad g de vapor de agua que se difunde unidireccionalmente a través de una capa de grosor d puede describirse como sigue (61, 288):

$$g = \frac{\delta}{d} (C_1 - C_2) = \frac{C_1 - C_2}{Z} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (\text{F3})$$

donde C_1 y C_2 son las concentraciones de vapor de agua [kg/m^3] en las superficies. δ es la conductividad de vapor de agua. Esta cantidad depende de la temperatura y del contenido de humedad del material poroso. Valores de δ han

sido publicados por varios autores (175, 184, 288). Z es la resistencia a la difusión [s/m].

Los repelentes de vapor tienen una alta resistencia a la difusión y por esto poseen bajos valores de δ . Las cantidades de vapor de agua que se difunden a través de una pared particular pueden calcularse a partir de la fórmula F3.

3.2.2. Transferencia de agua líquida

3.2.2.1. Transferencia horizontal de agua

La transferencia de agua a través de materiales porosos depende de la estructura capilar. La transferencia horizontal de un líquido por medio de fuerzas capilares puede formularse como sigue (92, 118, 288).

$$x = A \sqrt{t} \quad (F4)$$

Donde x es el desplazamiento del frente del líquido después de un tiempo t . La constante A es indicativa de la permeabilidad del material poroso con respecto al líquido. Hisschemöller (127) encontró para la transferencia de agua en el ladrillo:

$$A = 0.3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5}$$

y en mortero (formado por 1 parte de cemento, 3 partes de arena y 1/8 partes de cal): $A = 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5}$

Para piedras areniscas: $A = 3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5}$, de acuerdo con medidas efectuadas (213). De los experimentos sobre penetración de la lluvia efectuados por Mamillan (191) en paredes de prueba de caliza, pueden calcularse los siguientes valores aproximados:

$$\begin{aligned} &3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5} \text{ (Gerberie)} \\ &2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5} \text{ (Fontvieille)} \\ &0.8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{0.5} \text{ (Tervoux)} \end{aligned}$$

El factor A está relacionado con la distribución del tamaño del poro; tal distribución ha sido medida, por ejemplo, para calizas (191) y ladrillos (129, 316).

Usando un modelo de capilar simplificado, recto, horizontal y uniforme, el factor A puede escribirse así (119, 288):

$$A = \sqrt{\frac{\sigma r}{2\eta}} \quad (F5)$$

donde σ es la tensión superficial [N/m], η es la viscosidad dinámica [Ns/m²] y r el radio de los capilares.

Por ello la medición del factor A permite una estimación del tamaño promedio del poro y un cálculo del tiempo necesario para la penetración del agua en una pared.

Esta medida también puede emplearse para calcular el tiempo necesario para lograr una impregnación satisfactoria con diversos fijativos de un material de construcción deteriorado (ref. sec. 5.3) (213). El agua penetrará a través de una pared de grosor d después de un tiempo:

$$t = \frac{d^2}{A^2} [s] \quad (F6)$$

Vos y Tammes (88) mostraron que para paredes de ladrillo de 33 cm de grueso $t = 8$ horas, tales paredes no se consideran como a prueba de humedad.

Mamillan (191) probó la penetración del agua a tres diferentes calizas, en paredes de 35 cm. Él encontró que $t = 3.15$ horas (Gerberie), $t = 8$ hs. (Fontevieille) y $t = 50$ horas (Tervoux), pero llegó a la conclusión de que una pared no penetrada después de una hora podría tenerse como satisfactoria. Tal juicio depende obviamente de la intensidad impulsora prevista de la lluvia (ref. sec. 3.2.2.2.). Mamillan (191) mostró, además, que la penetración del agua a través de paredes de caliza se rige principalmente por la permeabilidad de la piedra; pero en paredes de ladrillo, la permeabilidad es aproximadamente de 4 a 10 veces mayor en las juntas que en los ladrillos.

3.2.2.2. Penetración de la lluvia

Ritchie y Plewes (239), y Birkeland (238, sec. 3-0) han revisado el mecanismo de penetración de la lluvia en los

edificios. Depende de la construcción y de las condiciones de la superficie expuesta. Generalmente se forma una película de agua sobre la superficie, la cual es forzada dentro de la pared por la presión del viento y la succión capilar.

Se han efectuado experimentos para estudiar la penetración de lluvia, tanto en el exterior como con la lluvia artificial (62, 100, 191, 238, sec. 3-2, 240).

El viento provoca presiones diferenciales del aire alrededor de un edificio, dependiendo de la velocidad del viento y de la altura y forma de la estructura (32, 263). El viento hace que la lluvia golpee la pared y esto puede conducir a la formación de diferencias de presión del aire a través de la pared. Ambos factores pueden incrementar la penetración de la lluvia.

Aunque la influencia de la presión del viento sobre la transferencia horizontal del agua a través de la piedra y el mortero sea insignificante (288), puede volverse importante en presencia de grietas, fisuras y otras aberturas (32). Esto pone de relieve la importancia del mantenimiento regular de las juntas en los monumentos, especialmente cuando en el interior existan murales que deban preservarse.

La penetración de la lluvia depende, además, de la dirección predominante del viento. Esto no es únicamente debido a la presión con que actúa, sino también porque las partes del edificio colocadas a sotavento, reciben menor cantidad de lluvia.

Kieslinger (151) introdujo una gráfica de la intensidad del impulso de la lluvia, contra la dirección del viento, para un edificio particular. Tales gráficas son útiles porque la orientación y condiciones de exposición de un monumento pueden influir en los fenómenos de deterioro.

También existen mapas de la dirección de la lluvia para grandes áreas geográficas. Lacy (238, sec. 3-4) revisó los métodos usados para trazar esos mapas.

Las mediciones de la distribución de la humedad en las paredes muestran marcadas diferencias de acuerdo con la orientación de sus superficies expuestas (268, 269, 270).

La influencia de las fuerzas gravitacionales en la transferencia horizontal de agua en una pared es pequeña, pero no puede despreciarse para paredes gruesas (288). Así, la penetración de la lluvia ocurre primero en las partes bajas de

la pared. Esto debe tenerse en mente cuando se juzgan los efectos de elevación del agua del suelo (ref. sec. 5.1.1.).

3.2.2.3. Transferencia vertical del agua

La transferencia del agua en la dirección vertical, ocurre cuando el agua se eleva en las paredes a partir del suelo o entra a la pared desde arriba por goteras, etcétera (ref. sec. 5.1).

Cuando no están presentes fuerzas externas, la velocidad de transferencia del agua en la dirección vertical puede calcularse aproximadamente usando un modelo de capilar recto, vertical, con radio r (173, 288):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{r^2}{8\eta x} \left(\rho g x \cos \alpha + \frac{2\sigma}{r} \right) \quad (F7)$$

donde η es la viscosidad del líquido, ρ la densidad del líquido, σ la tensión superficial, g la aceleración gravitacional y α el ángulo entre el capilar y la vertical.

Para la elevación vertical del agua, el coseno de α es igual a -1 y (F7) se convierte en:

$$v = \frac{r^2}{8\eta x} \left(-\frac{2\sigma}{r} - \rho g x \right) \quad (F8)$$

Cuando el equilibrio es alcanzado $v = 0$ y la altura máxima del frente del líquido es:

$$X_{\max} = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (F9)$$

Para agua (F9) se transforma en (290, 295):

$$X_{\max} = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{r} \text{ [m]} \quad (F10)$$

Para ladrillos, las mediciones de distribución de tamaño de poros (129, 316), dan promedios de 1 a 10 micras, lo que produce valores para $X_{\max}$ entre 15 y 1.5 metros. Al derivar la fórmula (F9), se supone que no se efectúa ninguna evaporación. Se ha observado, en efecto, que el agua puede subir muy alto en las paredes (151, 153) donde la evaporación es impedida. No obstante, normalmente el equilibrio se obtiene por evaporación del agua de la pared, y la $X_{\max}$ no es alcanzada.

Las paredes están generalmente construidas con mortero, y este material debe tomarse en consideración para evaluar la elevación por capilaridad (200, 288). Las columnas y las paredes de los monumentos se construyen frecuentemente con diversos materiales y están rellenas con cascajo. Dichas estructuras no homogéneas dificultan los cálculos. Debe recordarse que el modelo de capilares rectos con radio uniforme es demasiado simplificado. En la práctica, el flujo de humedad requiere descripciones más complicadas. No obstante, el concepto de máxima elevación de agua por capilaridad puede usarse aún, con la restricción de que el contenido de humedad disminuya con el aumento de altura (288).

Schofield (264) * escribió (F9) como sigue:

$$pF = \log_{10} X_{\max} = \log \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (F11)$$

Lo cual se llama “deficiencia de presión” o “succión”. Las relaciones de succión-contenido de agua, han sido usadas como una medida de la durabilidad de la piedra (129). La succión de agua puede usarse también para clasificar diversos materiales de construcción de acuerdo con su estructura capilar (59, 60, 92).

Las paredes pueden humedecerse no únicamente si entran en contacto real con el nivel del frente de agua, sino también por succión del suelo. La elevación máxima por capilaridad del nivel del frente de agua en suelos se da por (288, 290):

* En el libro original la referencia de Schofield tiene el número 264; sin embargo en el texto se anota el número 198, que corresponde a un trabajo de Maspero. El error ha sido aquí corregido. (N. del T.)

$$X'_{\max} = \frac{60 \cdot 10^{-6}}{D} \text{ [m]} \quad (\text{F12})$$

donde D es el diámetro de grano de las partículas más pequeñas que aún abundan en el suelo.

Los valores de D varían de 0.1×10^{-3} a 2×10^{-3} [m] para arena, y para arcillas de $1 \cdot 10^{-6}$ a $10 \cdot 10^{-6}$ [m] correspondiendo a una elevación capilar máxima de 0.06 a 60.0 metros (288).

Por esto, sin tomar en cuenta el posible flujo lateral del agua (ref. sec. 5.1.1.4.), la distancia del nivel de agua al cimientto de la pared debe exceder $X'_{\max}$ para evitar que el agua en elevación llegue a la estructura. Por consiguiente, con el abatimiento del nivel de agua del suelo se previene el acceso a las paredes del agua en elevación (ref. sec. 5.1.1.4.).

La ley de Darcy describe el movimiento del agua a través del suelo:

$$v = -kJ \quad (\text{F13})$$

donde v es la velocidad de flujo y J el gradiente hidráulico, k es el coeficiente de permeabilidad, y en la hidrología de agua de suelos tiene las dimensiones de una velocidad (288). Así pues, el agua puede manar de varias fuentes en las proximidades de la pared, y allí es donde la succión puede empezar.

3.3. *Fenómenos de secado en materiales porosos*

En el proceso de secado de una estructura homogénea, el agua se transporta, a través del sistema capilar, a la superficie donde ocurre la evaporación. La velocidad de secado es casi constante hasta el punto en que la humedad cercana a la superficie haya disminuido tanto que la intercomunicación del sistema de agua ya no sea completa. Cuando los capilares más grandes en la superficie ya no están llenos de agua, el frente de agua retrocede hacia adentro de la pared, y hay una disminución rápida de la velocidad de secado (173, 174, 309). El contenido de humedad correspondiente

a esta discontinuidad se llama contenido crítico de humedad (ψ_k).

La velocidad de secado puede formularse así (288):

$$G = \beta (C_s - C) \quad (F14)$$

β es el coeficiente superficial de transferencia de vapor de agua [m/s], C_s es la concentración del vapor de agua en la superficie, y C la concentración de vapor de agua a cierta distancia de la pared.

La velocidad de secado depende de la ventilación. Si pasa aire no saturado a lo largo de la pared, éste impide la saturación local y así, estimula la evaporación. El contenido crítico de humedad puede deducirse a partir de gráficas de velocidad de secado contra promedio residual de contenido de agua (% Vol.) en la estructura. Tales gráficas han sido publicadas para cierto número de materiales de construcción (92, 173, 174, 288). La cristalización de sales disueltas (eflorescencias) en la superficie de la pared empieza cuando se ha alcanzado el contenido crítico de humedad y el frente de agua retrocede. Así pues, ciclos frecuentes de secado y humectación causarán una oscilación del frente, acompañada de cristalización y disolución periódicas de sales. A este proceso se debe la mayoría de los fenómenos de intemperismo.

En aire estancado, la humedad cercana a una pared donde ocurre la evaporación puede ser muy alta (149). Por esto, paredes y murales sin ventilación con contenidos de humedad $\varphi > \varphi_k$ no se deterioran mucho, aunque es posible el ataque por microorganismos. Cuando la circulación del aire comienza, por ejemplo, al abrir una tumba, el deterioro por eflorescencias puede ocurrir rápidamente.

Diversos autores han publicado medidas de los cambios de contenido de humedad en paredes que se están secando (92, 267, 268, 269, 308).

3.4. Aspectos térmicos

La transferencia de calor en materiales porosos se efectúa por conducción, radiación y convección. La transferencia de calor unidireccional en una pared homogénea de grosor d puede formularse como sigue (288, 307):

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (F15)$$

donde λ es la conductividad térmica y T_1 y T_2 son las temperaturas superficiales límites. R es la resistencia al calor. Las conductividades térmicas han sido medidas para muchos materiales de construcción (7, 318). La conductividad térmica aumenta con el contenido de humedad, y ésta influye así en el aislamiento térmico de la estructura. La transferencia de calor de las superficies de la pared al aire circundante es dada por (288):

$$q = \frac{T_i - T_1}{R_i} \quad (F16)$$

$$q = \frac{T_2 - T_e}{R_e} \quad (F17)$$

donde R_i y R_e son las resistencias a la transferencia de calor y T_i y T_e son las temperaturas del aire del interior y del exterior. La resistencia a la transferencia de calor depende de la velocidad del aire. R_i tiene un valor aproximado de $0.15 [m^2 h ^\circ C/Kcal]$ y R_e de 0.05 . R_e es menor que R_i porque el viento provoca convección (170, 288, 318).

Cuando la pared está formada por n capas, la resistencia al calor se encuentra por la suma de los valores individuales.

$$R = R_1 + R_2 + \dots R_n \quad (F18)$$

A este valor deben agregarse las resistencias a la transferencia de calor.

La temperatura T_s de la pared en la superficie interior está dada por (170, 288):

$$T_s = T_i - \frac{R_i}{R_i + R + R_e} (T_i - T_e) = T_i - \frac{R_i}{R_e} (T_i - T_e) \quad (F19)$$

Esta fórmula puede emplearse para calcular el riesgo de condensación superficial (ref. sec. 3.5.1.).

Las paredes deben tener una capacidad calorífica suficiente para evitar cambios rápidos de temperatura (170). De otra manera pueden ocurrir condensaciones cuando la calefacción se desconecta o se reduce durante la noche.

Un aislamiento térmico insuficiente puede causar condensaciones superficiales, las cuales pueden también ocurrir localmente en las áreas más frías, tales como las esquinas (234). La suciedad y el polvo se acumulan más rápidamente en los lugares fríos que en las superficies calientes, y la forma de deposición de la suciedad puede mostrar la estructura interna de la pared (67, 176).

3.5. Condensación (41, 92, 288, 309)

La condensación ocurre cuando la concentración del vapor de agua alcanza la concentración máxima posible a una temperatura dada. Por esto, el vapor de agua se condensa cuando llega a áreas donde la temperatura es más baja que el punto de rocío del aire que contiene vapor de agua. La condensación puede ocurrir sobre la superficie de la pared o dentro de la construcción.

3.5.1. Condensación superficial

La condensación superficial se estimula por altas humedades relativas y bajas temperaturas superficiales. Estas últimas pueden ser provocadas por insuficiente aislamiento térmico de paredes y techos (178), y por bajas temperaturas o ventilación excesiva en el exterior. Las altas humedades relativas son resultado de la introducción o producción de humedad y de bajas temperaturas o insuficiente ventilación en el interior del edificio (216). Un ser humano produce entre 50 y 100 litros de vapor de agua por hora (92, 98). Por esto, los visitantes pueden elevar considerablemente la humedad relativa de un edificio. La calefacción con gas, que en ocasiones se usa en monumentos, produce también mucho vapor de agua (92) (1 m³ de gas produce aproximadamente 1 200 litros de vapor de agua por hora).

Las temperaturas superficiales de las paredes pueden estimarse con la fórmula (F19) sec. 3.4.

La condensación ocurrirá cuando la temperatura superficial sea menor que el punto de rocío del vapor de agua en el aire cercano a la superficie.

La cantidad de humedad que se condensa está dada por la siguiente fórmula (288):

$$g = (C_i - C'_s) [\text{kg/m}^2\text{h}] \quad (\text{F20})$$

donde C_i es la concentración del vapor de agua cercano a la pared y C'_s es la concentración máxima posible en una superficie con temperatura T_s .

3.5.2. Condensación intersticial

El vapor de agua puede condensarse intersticialmente si en algún lugar del interior de la pared la temperatura alcanza el punto de rocío.

Diferencias de temperatura entre el interior y el exterior ocasionan gradientes de temperatura a través de la pared.

Así por ejemplo, el aire más caliente del interior se difunde dentro de la pared y allí puede condensarse el vapor de agua del aire. Para calcular el riesgo de condensación en un punto X del interior de la pared, la temperatura T_x y la concentración C_x de vapor de agua deben compararse (170):

$$T_x = T_i - \frac{R_{ix}}{R} (T_i - T_e) \quad (\text{F21})$$

$$C_x = C_i - \frac{Z_{ix}}{Z} (C_i - C_e) \quad (\text{F22})$$

donde R_{ix} y Z_{ix} son la resistencia al calor y la resistencia a la difusión del vapor de agua de la capa desde la superficie interior hasta X.

La condensación ocurre cuando $C_x \geq C_{\max}$ a la temperatura T_x . Generalmente se usan soluciones gráficas para una

pared particular (28, 92, 170). La significación física de tales soluciones gráficas ha sido criticada y discutida recientemente por Vos y Tammes (288) y Vos (309). De ordinario, la condensación intersticial requiere altas humedades relativas y se detiene después de algún tiempo.

Los repelentes al vapor de agua no deben colocarse en el exterior, porque aumentan los riesgos de condensación cuando las temperaturas internas son más altas que las externas.

La condensación intersticial puede incluir la transferencia de sales solubles a áreas cercanas a la superficie, porque el agua será transportada a áreas con un menor contenido de humedad. Más aún, el agua condensada puede causar daños por congelación en el interior de la pared.

En situaciones prácticas, serán indispensables algunas mediciones para obtener un diagnóstico adecuado sobre la ocurrencia de humedad, porque en las paredes heterogéneas, tan frecuentemente encontradas en monumentos, el agua de elevación, condensación y penetración deberá cuidadosamente separarse. No obstante, los cálculos aproximados pueden ayudar a estimar el aporte de la condensación.

3.6. *Determinación de humedad*

Se debe distinguir entre la medición de humedad en el aire y la determinación del contenido de humedad del material poroso. Ambos tipos de mediciones han sido tratados ampliamente por Lück (185). Avances más recientes pueden encontrarse en Wexler (322) y los *Proceedings of the RILEM Helsinki Symposium* de 1965 (238).

En la práctica, frecuentemente se necesita saber si la deterioración se debe a la elevación del agua del suelo, a infiltración o a condensación. Con este fin, es utilísimo hacer unas cuantas mediciones en un área representativa de la pared (200, 201). No es destructivo el método para determinar el contenido de humedad de la superficie y del aire circundante. Las mediciones del contenido de humedad en el interior de la pared requieren una muestra pequeña. Por ello, si se van a hacer mediciones repetidas en monumentos donde no es posible tomar muestras grandes, por ejemplo

en los murales, se deben usar métodos continuos (44, 308). Las determinaciones continuas o repetidas de distribución de humedad están indicadas en relación con fenómenos de condensación (ref. sec. 3.5.2.). Los aspectos higrícos en edificios dedicados a museos no deben restringirse a la humedad relativa del aire. El riesgo de condensación de humedad atmosférica sobre pinturas colgadas en paredes frías se ha tomado en consideración (27) y se ha señalado que debe investigarse el comportamiento término e higríco de las paredes sobre las cuales se van a exhibir pinturas o tapices (301).

En la conservación de monumentos es sorprendente cuán poca atención se ha prestado a la importancia de las distribuciones de la temperatura y la humedad, no obstante que ellas frecuentemente contienen claves vitales para el diagnóstico de fenómenos de deterioro. La bibliografía es, consecuentemente muy escasa (200, 201).

4. OTROS FENÓMENOS DE DETERIORO

La desintegración de la piedra causada por cambios en la temperatura, incluyendo la congelación, ha sido discutida brevemente en un amplio artículo de Sneyers y De Henau sobre el deterioro y conservación de piedra (278).

4.1. *Insolación y daño por fuego*

Debido a su carácter heterogéneo, la estructura de un edificio sufre erosión como consecuencia de la diferente expansión volumétrica de los materiales comprendidos. Además, después de la expansión, una piedra no se contrae en la misma cantidad. Esto, llamado "deformación permanente", contribuye también a la erosión (315). De una manera similar, un aumento de temperatura debido al fuego, daña a la piedra, al ladrillo y al mortero (114, 151, 152, 154, 251). Kieslinger en distintas publicaciones en alemán da ejemplos del daño por fuego observado en varias piedras de construcción (159, 160, 161). El mismo material ha sido publicado en francés (157, 158).

4.2. Daño por congelación

La congelación es peligrosa para los materiales porosos, porque la solidificación aumenta el volumen del agua en los poros (el volumen del hielo es una décima parte más grande que el del agua, el hielo flota en ella). No obstante, el daño es también observado cuando un líquido, por ejemplo nitrobenzeno, se congela en los poros sin aumento de volumen (129). En un poro capilar lleno de agua, a una temperatura abajo del punto de congelación, se empiezan a formar depósitos laminados de hielo a partir del menisco hacia el interior. Así las moléculas de agua se inmovilizan en las lentes de hielo, lo cual conduce a una disminución en los movimientos moleculares debajo de estas lentes y, consecuentemente, a una diferencia de presión entre el frente de congelación y el resto del agua en el capilar. Para restaurar el equilibrio, el agua se mueve hacia la lente de hielo contribuyendo así a la inmovilización de mayor número de moléculas. De esa manera, la lente de hielo se engruesa con el agua empujada hacia ella a través del capilar. En piedras, ladrillos y morteros, los capilares están distribuidos entre las partículas, y la acumulación del hielo, como ha sido descrita, comienza de la superficie hacia el interior conforme la temperatura del aire cae abajo del punto de congelación del agua.

Después de la formación de hielo, la tensión superficial tiende a extender el agua remanente para cubrir la partícula sobre el área seca ocupada por el hielo. Normalmente la tensión superficial sobrepasa el peso del hielo y este último es levantado. Entonces el agua, que ha separado a la lente de hielo de la partícula, se congela otra vez y agrega láminas nuevas a la lente de hielo. El agua consumida por congelación drena a los capilares de los alrededores, y la lente de hielo puede crecer y presionar en todas direcciones. Esto causará destrucciones arriba de la lente de hielo; y abajo del mismo se producirá un abatimiento del punto de congelación del agua (251). En consecuencia, el agua podrá fluir y obtenerse sobre la lente de hielo, donde se congela, dependiendo su flujo y velocidad de la viscosidad y del tamaño del capilar (95, 109, 140, 195, 299, 322). Los materiales porosos que tienen un *coeficiente de satura-*

ción más pequeño de 0.8 * no son afectados por congelación (129), porque eso implica una estructura que contiene gran cantidad de poros grandes en los cuales la lente de hielo producida puede actuar sin el desarrollo de una presión destructiva. Estos poros grandes son raros en morteros y argamasas, y por ello en las paredes estos materiales son los primeros en ser atacados por la congelación. Según Moritz (51) el 90% del daño observado en tejas de techos durante los tres años siguientes a su colocación se debe a la congelación. Las tejas de losa de alta temperatura también sufren daños por congelación (91). Un tipo especial de deterioro por congelación ocurre cuando el agua del exterior entra en contacto con un azulejo o cerámica vidriada y se congela allí. El daño es característico: se presenta como hojuelas del vidriado con partículas del núcleo del azulejo adheridas a ellas. El estudio experimental efectuado por Mammillan (192) relaciona los daños por congelación en calizas y concreto con las teorías recientes de los mecanismos de expansión del agua que se congela en poros. Schäfer (255) ha estudiado la influencia de las sales solubles sobre la resistencia del concreto a la congelación.

4.3. *Erosión del viento*

La carga del viento sobre los edificios también contribuye a los procesos de corrosión (88, 110, 166). La presión del viento sobre un área de un edificio es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento. En el punto de contacto con el lado frontal de un edificio cúbico, el viento crea una sobrepresión (carga), mientras que principalmente en el lado opuesto pero también en los lados, se crea una caída de presión (succión). Además la carga del viento aumenta con la altura del edificio. La carga del viento depende del ángulo con el cual el viento golpea cualquier plano del edificio (263). Los vientos fuertes (64, 273) son muy dañinos, pero también los vientos moderados (con velocidad del aire de menos de 10 m/seg) son destructivos, especialmente cuando el aire está contaminado con partícu-

* La relación del volumen de agua absorbida por la inmersión por 24 hrs, al volumen total de los poros accesibles en el material.

las gruesas (71, 83, 166, 188, 212, 318). Kieslinger (151) expone los efectos de la erosión del viento sobre algunos monumentos griegos y austriacos.

4.4. *Contaminación con polvo*

La atmósfera de las ciudades industriales está grandemente contaminada con gases y partículas sólidas (hollín, arena, sales, etcétera). Debido a su tamaño tan pequeño, tales partículas son fácilmente suspendidas en el aire y producen polvo (tamaños de partícula entre 150 y 1 μ^*) o humo (que contiene partículas abajo de 0.5 μ de diámetro) (113). Los sistemas de polvo o de humo son termodinámicamente inestables y sus partículas sólidas tienden a la vez a asentarse y a adherirse unas con otras en grandes grumos. Ya que el polvo fino tiene una gran superficie externa, el vapor de agua del aire es absorbido en las partículas individuales y llevado al área de deposición. Así pues, el polvo puede contribuir a la acumulación de humedad. En las capas húmedas de polvo, los constituyentes disueltos presentan una reacción alcalina o ácida, y según el carácter del material poroso, puede producirse un ataque químico a los substratos porosos (112). Además, las partículas de polvo penetran en diferente proporción en los poros, ennegreciendo así permanentemente el exterior del edificio. Los ladrillos cocidos a una temperatura de alrededor de 900 °C adquieren fácilmente, en contacto con el aire húmedo contaminado, una superficie de color oscuro. Por el contrario, los ladrillos refractarios retienen por mucho tiempo su color original. Stenestad (281) supone que un sistema capilar submicroscópico mantiene húmeda la superficie de los ladrillos cocidos comunes y por esto el polvo es atraído, mientras que los refractarios se secan pronto después de mojarse, y carecen de la humedad necesaria para retener las partículas de polvo. Se observa una diferencia similar en la decoloración por polvo entre rocas sedimentarias, argamasas y morteros por un lado y rocas ígneas por otro (82, 151).

* 1 μ = micra = $\frac{1}{1000}$ mm.

La acción combinada de todos los contaminantes atmosféricos ennegrece a los edificios y los cubre de ampollas y escamas, las cuales son subsecuentemente removidas por los agentes de erosión o por limpieza intencional. En ambos casos, las capas más profundas del material de construcción (previamente empobrecido en adhesivo) quedan expuestas al mismo ataque que hizo posible su descubrimiento o exposición. No obstante, después de una limpieza intencional, se toman usualmente medidas para prevenir exfoliaciones posteriores (190, 265).

4.5. *Deterioro producido por agentes biológicos*

4.5.1. Árboles y plantas

Los árboles y las plantas pueden tener alguna importancia en el deterioro de monumentos si crecen sobre el edificio o en un lugar cercano al mismo. Los árboles y los arbustos que están en la cercanía de un edificio pueden entorpecer la evaporación de la humedad en las paredes (200, 267).

Los árboles y las plantas que crecen en un monumento, generalmente indican un alto contenido local de humedad en los materiales de construcción. Ellos son más bien inocuos, pero en algunos casos sus raíces pueden aumentar el deterioro de la mampostería (151).

Existe evidencia (328, 330) de que el mármol y las calizas que están en contacto con raíces, pueden desarrollar marcas debidas al efecto del ataque de la sabia ligeramente ácida de las células de la raíz. Las raíces putrefactas, a causa de la producción de sustancias húmicas, pueden también manchar las piedras calcáreas. No obstante, las plantas en los monumentos indican frecuentemente un mantenimiento muy pobre y más que la causa son el resultado del deterioro.

4.5.2. Algas y líquenes (42)

Frecuentemente los monumentos están localmente cubiertos de algas y organismos similares. Esto indica, invariablemente, un alto contenido de humedad en los sustra-

tos y, de hecho, frecuentemente se observa en las cercanías de los desagües y en las partes inferiores del edificio, humedecidas por la elevación capilar del agua del suelo. La presencia de algas puede por esto servir como una forma de estimación rápida de la distribución de humedad en el edificio.

Como se dijo en la sec. 2.2., el deterioro ocurre como resultado de la frecuente humidificación y secado de la piedra. Donde las algas cubren las paredes, se descubrirá con frecuencia que el contenido de humedad está continuamente arriba del nivel crítico ($\psi > \psi_k$, ref. sec. 3.3.). Así pues, la parte exterior de la pared en tales áreas estará bien preservada porque el número de ciclos de humidificación-secado es pequeño. No obstante, en las superficies adyacentes y en la superficie interior correspondiente, el deterioro del edificio será acelerado.

Aparte del daño mecánico producido por algas y líquenes, éstos pueden contribuir al deterioro químico de las calizas. Este tema ha sido reseñado por Degelius (76) y Hueck (132). Los líquenes (asociación simbiótica de algas y hongos) no pueden tolerar el hollín ni los sulfatos y por ello es poco probable que ataquen a los edificios o monumentos en áreas urbanas e industriales. En otras localidades, pueden tener un efecto destructivo sobre rocas calcáreas, areniscas e ígneas. Los procesos comprendidos son complejos (328). En climas tropicales el efecto de los líquenes es tan alarmante que su remoción constituye un elemento indispensable en cualquier programa de conservación (103).

4.5.3. Hongos y microorganismos

Cuando los hongos están presentes en los materiales porosos de construcción, desfiguran estos substratos y pueden causar daños a las películas de pintura en murales (294). Su papel en la degradación de materiales porosos es menos claro (132), pero la identificación de hongos ha sido usada para indicar altas humedades en las paredes (167, 234).

El papel de los microorganismos en el deterioro de los materiales de construcción ha sido revisado por Hueck (132). Plenderleith (228) también ha llamado la atención

hacia los procesos biológicos que contribuyen al deterioro de la piedra. Más aún, se ha sugerido (229, 230, 328) que la actividad de algunas bacterias puede también conducir al intemperismo de las rocas.

Las rocas silíceas que presentan contaminación bacteriana, tienden a desintegrarse, muy lentamente al principio. No obstante, este proceso se acelera después de cierto tiempo. Por esta razón, las rocas silíceas afectadas por bacterias no son recomendables para uso exterior, ya que se espera que el deterioro progrese muy rápidamente una vez que ha comenzado (328). Aunque se puede atribuir, con certeza, alguna contribución de los microorganismos al deterioro de la piedra, su influencia parece más bien dudosa desde un punto de vista cuantitativo (256, 257).

Se pueden usar varios fungicidas contra los hongos (42). Hueck (132) trata extensamente este problema.

4.5.4. Animales

El daño causado por los insectos se limita generalmente a los materiales orgánicos, tales como la madera, los cuales son ajenos al tema de esta reseña (ref. 63, 184).

Los pájaros ejercen alguna influencia, ya que sus excrementos contienen nitratos que contribuyen al deterioro de la piedra (151, 252). Los excrementos también desfiguran la superficie de los edificios afectados. Sharma informa de la intemperización de un templo monumental de piedra jabonosa, en la India (272). En este caso en particular, los responsables del deterioro fueron un grueso depósito de hollín, eflorescencias blancas y deyecciones de murciélago. En particular, las deyecciones iniciaron la acción bacteriana suministrando la materia orgánica. Como tal acción produce ácidos orgánicos, el agua de lluvia que caía sobre el monumento se hizo más ácida y por lo mismo más agresiva, y esto contribuyó a la desintegración de la piedra jabonosa (talco) transformándola en arcilla.

4.6. *Calidad de la piedra de construcción*

Algunos materiales pétreos de construcción deben cumplir ciertos requisitos, si su coherencia durante el uso es

necesaria para tener una larga duración. Las piedras de origen ígneo, con excepción del granito que, por el feldespato que contiene se *hidroliza* fácilmente, son muy resistentes a la corrosión. No obstante, las rocas sedimentarias y el mármol formado metamórficamente se descomponen con facilidad. Las calizas y el mármol que contienen compuestos de hierro muestran, después de algún tiempo, decoloraciones café-amarillentas y eventualmente se desintegrarán, en cuanto los compuestos de hierro entren en contacto con la humedad, se *hidrolicen* y aumenten de volumen (17).

El mismo efecto se observa si estas piedras están contaminadas con pirita (151, 317). Rupp (248) ha advertido los inconvenientes de emplear calizas que tienen un “enjambré” de puntos negros (pirita), así como bloques de piedra con vetas; mientras menor número de intersecciones de vetas coloridas presente una piedra, permanecerá más tiempo como una sólida unidad de construcción.

Las rocas sedimentarias cortadas en tal forma que no permitan la colocación paralela de sus estratos con respecto al nivel del suelo, se degradan rápidamente (en general debido a la penetración del agua del suelo, pero también durante la lluvia a causa de la gravitación) (75, 155). Las rocas sedimentarias con cantidades considerables de sulfatos y cloruros solubles o con un coeficiente de saturación menor de 0.8, también se consideran de mala calidad (40, 129).

4.7. Corrosión metálica

El hierro en contacto con materiales de construcción se corroerá de acuerdo a los valores de PH en el ambiente inmediato. Normalmente la corrosión severa tiene lugar en condiciones ácidas (143), pero también se ha observado corrosión substancial en un medio ambiente alcalino y especialmente cuando está presente el cloruro de sodio (142) o el cloruro de magnesio (53). Como el volumen de orín es de 6 a 8 veces más grande que el del hierro consumido para producirlo (151), es comprensible la aparición de fisuras y otras fallas (217) en el material que rodea a las partes de hierro. Como medida para evitar tales daños, el hierro es frecuentemente envuelto en lámina de plomo; pero en contacto con calizas, morteros (329) o maderas (69), el plomo

mismo es atacado, de manera que en tales casos no puede esperarse ninguna protección contra la corrosión del hierro.

El cobre y sus aleaciones también se corroen (136, 304, 324), pero generalmente sólo se observa una decoloración azul-verdosa de los materiales de construcción.

4.8. *Agrietamiento* (48)

El agrietamiento en los edificios puede resultar de la expansión y contracción ocasionadas por los cambios de temperatura, sobrecargas, grandes cambios en el contenido de humedad, movimiento del suelo, vibraciones por tráfico (182), aeroplanos o campanas (172), y por el daño en los cimientos, como por ejemplo la putrefacción o corrosión de los pilotes. También los metales en contacto con la piedra o la mampostería pueden causar grietas (v. sec. 4.7.). Las raíces de árboles y plantas pueden promover la formación de fisuras y grietas.

4.9. *Explosión sónica*

Los efectos del *boom* sónico sobre los edificios ha recibido creciente atención (187, 326). En Francia, Parent (220) ha informado de los daños causados sobre monumentos por tales choques sónicos. Coene y Stigter (68) han revisado la bibliografía sobre varios aspectos de la "explosión" sónica, incluyendo el daño de los edificios.

5. CONSERVACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

5.1. *Medidas curativas contra la humedad*

En esta sección se describen diversos remedios para prevenir o disminuir la humedad en las construcciones. En muchos países existen firmas comerciales que ejecutan varios métodos relacionados con la práctica normal de la

construcción. Ocasionalmente estos métodos se han usado en la preservación de monumentos.

Según parece, la aplicación más frecuente y sistemática de remedios contra la humedad aumentará la efectividad de la restauración de monumentos (36). Las referencias a aplicaciones representativas en conservación de monumentos y obras de arte similares, tales como murales, han sido incluidas bajo los encabezados apropiados. La mayoría de los ejemplos son dados por Massari (200). Philippot y Mora (223) incluyen un capítulo que trata de la preservación de murales en condiciones húmedas. Debe recordarse que en relación a la humedad y a las sales solubles, las pinturas murales se comportan esencialmente como argamasas. El practicar la remoción de un mural, es indicado frecuentemente cuando la pared soporte es mecánicamente inestable y se agrieta. No obstante, por lo general se presta muy poca atención a un diagnóstico adecuado del deterioro. En tales casos, sería muy importante investigar primero la distribución de la humedad por un cierto período, como una función de las condiciones climáticas en el interior y el exterior del monumento. Puede muy bien suceder en muchos casos que medidas adecuadas contra la humedad y un mantenimiento regular basten para preservar los murales (139).

Se han mencionado experimentos para medir el contenido de humedad en materiales de construcción que contienen varias sales (312). Los resultados preliminares indican que los ladrillos que contienen 20 mg de Na Cl por cm^3 pueden tener un contenido de humedad del 10 al 15% en volumen a 90% de H. R., aunque los ladrillos sin sales casi no absorben humedad higroscópica. De ninguna manera es cierto que el deterioro por eflorescencias cesará cuando las paredes que contienen sales se secan. Puede esperarse que continúe la hidratación cíclica de estas sales. Es importante investigar el número y magnitud de las variaciones en la humedad relativa como una función de la cantidad de daño causado en argamasas y piedras por las sales que se hidratan.

Una historia de la prevención del acceso de humedad, en la antigüedad, se encuentra en Varlan (302).

5.1.1. Remedios contra la elevación del agua del suelo y filtraciones

5.1.1.1. Métodos de impermeabilización

Los impermeabilizantes se usan para prevenir el movimiento de agua en dirección vertical. Pueden aplicarse en paredes y pisos para prevenir la elevación del agua y pueden también usarse contra el movimiento descendente, por ejemplo en chimeneas, antepechos de ventanas y parapetos, y se han aplicado en monumentos (74, 200). Los métodos para aplicar impermeabilizantes pueden dividirse en dos clases: aquellos que requieren del corte horizontal de la pared, con la subsecuente inserción de un material impermeable, y los métodos en que se inyectan líquidos dentro de la pared. Los materiales usados en el primer grupo incluyen metales (5), mezclas bituminosas, láminas de plástico (3), mezclas de resinas epoxi con arena o polvo de mármol, mezclas semirígidas de mastique y asfalto, concreto, ladrillos densos y pizarras. Muchos de estos métodos están normalizados. Han sido reseñados, por ejemplo, para Gran Bretaña (4, 43, 46, 49) y Alemania (211, 236, 318).

La aplicación de impermeabilizante en edificios es obligatoria en Gran Bretaña desde 1875.

Se están aplicando varios métodos comercialmente, en los cuales se inyectan líquidos en agujeros taladrados en la pared. Las sustancias utilizadas son, por ejemplo: soluciones de silicón, mezclas de siliconato-látex, silicatos, cera fundida y resinas de termofraguado. La experiencia con tales métodos es aún limitada, pero las mezclas de siliconato-látex parecen las más satisfactorias (46).

La ejecución de tales métodos fue explicada por Moritz (211). Para la selección de un método el factor costo puede muy bien ser el criterio más importante.

5.1.1.2. Reducción de la sección transversal de la pared

Se puede obtener una disminución del agua ascendente reduciendo la sección transversal de la pared, porque entonces se tienen menos capilares disponibles para el transporte vertical. Massari (200) describe este método e in-

forma de una aplicación exitosa en relación con una pintura mural de Domenichino en la iglesia de *San Luigi de' Francesi* en Roma.

5.1.1.3. Métodos que usan repelentes de humedad verticalmente

La cantidad de agua del suelo que llega a la pared por filtración puede reducirse suministrando un repelente de humedad alrededor de las partes bajas exteriores de la pared, o bien haciendo una zanja. Tales métodos han sido descritos por Massari (200); las zanjas, además, aumentan la evaporación de la pared. A veces se insertan tubos porosos en la pared para favorecer la evaporación. Se afirma que tales dispositivos aumentan la velocidad de secado de una pared, pero esto es difícil de probar (46, 200, 211).

Los repelentes verticales de humedad, aplicados en la superficie interna de una pared húmeda, únicamente encubren los efectos de la humedad y las sales. Impiden la evaporación y pueden causar una elevación mayor del agua (ref. sec. 3.2.2.3.). Por esto su uso contra la condensación es indicado únicamente en aquellas paredes donde el contenido de humedad está abajo del valor crítico (ref. sec. 3.3.). Esto debe recordarse cuando grandes áreas de una pared van a ser cubiertas con murales desprendidos y colocados sobre soportes que tienen entelados de fibra de vidrio y poliéster (223). Si la pared está aún humedecida por la elevación del agua del suelo se debe suministrar suficiente ventilación entre el soporte y la pared.

5.1.1.4. Drenado

El drenado puede usarse para disminuir filtraciones laterales o para bajar el nivel del agua a una profundidad tal que el agua del suelo no pueda alcanzar la pared por elevación capilar (ref. sec. 3.2.2.3.). Una revisión de los métodos usados en drenados cae fuera del alcance del presente trabajo, pero puede encontrarse en manuales sobre mecánica de suelos y especialidades relativas (290, 293). Se ha propuesto el abatimiento del nivel de agua del suelo para la preservación de los

monumentos de Philae en Egipto (297) y de las ruinas de Mohenjo Daro en Paquistán (298), y ocasionalmente se ha aplicado en relación con la preservación de monumentos (152, 182). Una consecuencia del drenado es el aumento de la densidad del suelo; por esto se aplica en técnicas de cimentación y de consolidación del suelo (8, 47, 169, 290). No obstante, los cambios en la estructura del suelo pueden causar daño a los edificios. En Alemania Occidental se ha informado (186) de daños serios a monumentos, relacionados con el abatimiento del nivel de agua para propósitos de minería.*

En países con un alto nivel de agua en el suelo se han usado frecuentemente pilotes de madera como cimientos. El abatimiento del nivel de agua puede provocar la putrefacción de los pilotes, lo que causa daños frecuentes a cimientos y estructuras.

5.1.1.5. Electrólisis

Con frecuencia se usa la electrólisis en el drenado y consolidación de suelos (169, 290, 303). Cuando se utiliza para el secado de paredes y como una barrera contra la humedad, los electrodos se colocan en la pared y en el suelo. Se mantiene un voltaje entre ellos.

Aunque se ha informado de aplicaciones exitosas de este método en Rusia (334), Rumania (208), Austria (323), y por varios autores (9, 78, 128, 207), el uso de la electrólisis permanece como un tema muy controvertido. Algunos autores son verdaderamente escépticos al respecto (46, 70, 200). En vista de esta controversia, los principios implicados se exponen brevemente (101, 253, 290).

En los materiales inorgánicos porosos las paredes de los capilares llevan una carga negativa. Las moléculas de agua cercanas a la pared están cargadas positivamente, y los iones positivos se concentran cerca de las paredes. Cuando se aplica un voltaje, las cargas positivas son atraídas hacia el cátodo y si

* Daños similares han ocurrido en varios edificios de la ciudad de México, por ejemplo en la Catedral Metropolitana y el Palacio de Bellas Artes. Estos daños pueden atribuirse al abatimiento del nivel freático provocado al construir los canales y túneles para el Sistema de Transporte Colectivo (metro). (N. del T.)

los capilares son suficientemente estrechos, la columna de agua neutra incluida en el centro puede seguir este movimiento como resultado de su viscosidad. En un material poroso la ley de Darcy describe (ver sec. 3.2.2.3.) el flujo unidireccional del líquido:

$$V = -kJ$$

Cuando se aplica un campo eléctrico, se puede escoger un voltaje tal que el flujo de líquido sea exactamente compensado. En equilibrio, la velocidad total del flujo es, entonces, igual a cero:

$$V_T = -kJ + k_E E = -k \frac{H}{L} + k_E \frac{U}{L} = 0 \quad (F23)$$

Donde E es la fuerza del campo eléctrico y k_E es el coeficiente de permeabilidad electrosmótica ($\text{cm}^2/\text{Volt} \cdot \text{seg}$). H es la presión hidráulica y U es la diferencia de potencial por longitud L . Por esto:

$$H = \frac{k_E}{k} U \quad (F24)$$

Un criterio para la aplicación de la electrósmosis, que requiere de poros lo suficientemente estrechos en el material que va a tratarse, es dado por (101):

$$\frac{k_E}{k} \geq 10 [\text{cm/Volt}] \quad (F25)$$

Schaad y Haefeli (253) encuentran que para esquisito/arena:

$$\frac{k_E}{k} = \frac{8.7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Volt} \cdot \text{seg}}{10^{-7} \text{ cm/seg}} = 87 \text{ cm/Volt.}$$

Scheidegger (258) da los valores de k para algunos materiales de construcción:

Arenisca	5×10^{-7}	a	3×10^{-3}	cm/seg.
Caliza	2×10^{-6}	a	4×10^{-5}	cm/seg.
Ladrillo	4.8×10^{-6}	a	2.2×10^{-4}	cm/seg.

El último valor está de acuerdo con lo citado por Moraru, de 4.8×10^{-6} (207) quien da para areniscas 3×10^{-7} a 1×10^{-5} . Desafortunadamente ningún valor correspondiente de k_E pudo encontrarse en la bibliografía. Moraru (207) cita $k_E = 2.8 \times 10^{-6}$ cm²/seg., para ladrillo rojo; si se quiere por volt, dará:

$$\frac{k_E}{k} = 0.6 - 4.9 \ll 10$$

Para areniscas, utilizando la cifra de Moraru de 1.3×10^{-6} a 4.5×10^{-6} el valor es, en el mejor de los casos:

$$\frac{k_E}{k} = 2 - 9$$

Por ello, los poros en ladrillos y areniscas son demasiado grandes como para efectuar un secado electrosmótico exitosamente.

Los métodos para la medición de k y k_E han sido descritos por Schaad y Haefeli (253), y con cifras cuantitativas para diversos materiales de construcción utilizados en monumentos se pueden obtener resultados más precisos. No obstante, parece que en muchos casos no es posible aplicar la electrólisis.

Las aplicaciones exitosas que han sido citadas, pueden deberse hasta cierto punto a la reducción de la sección transversal en las paredes, producidas por la inserción de los electrodos metálicos.

Además, para el secado efectivo de una pared, el contenido de humedad debe estar abajo del valor crítico. Por ello, los ladrillos deben ser secados desde un valor de saturación de 25% en volumen, a abajo del 6% en volumen, requisito mucho más severo que el necesario para la consolidación del suelo, donde contenidos de humedad de 50% son tolerables (200).

Wieden (323) prefiere, para el secado de paredes en monumentos, los métodos que emplean electrodos para conectar a tierra la pared (electrósmosis pasiva).

No obstante, sus datos y experimentos no son convincentes y los resultados positivos pueden explicarse por la remoción de la argamasa de las paredes, al instalar los electrodos.

La electrósmosis parece haber sido empleada exitosamente en la remoción de sales de pinturas murales (224).

Se están efectuando (334) o planeando (312) actualmente, investigaciones sistemáticas y comparativas sobre los méritos del secado electrosmótico de paredes.

Depoorter (81) ha comparado el efecto de la electrósmosis y de la inyección de productos siliconados a base de silóxanos de polimetilo y resina de silicón como barreras contra la humedad ascendente. Él informa que los mejores resultados se han obtenido con el método de inyección.

Se han anunciado investigaciones similares usando mediciones continuas de contenido de humedad, tendientes también a examinar el efecto de los métodos de prevención de la penetración de lluvia (312). Se ha informado (202, 203) y anunciado (312) la investigación sistemática de la distribución de humedad en iglesias de Venecia.

5.1.2. Remedios contra la condensación

Las altas humedades relativas, que suelen causar condensaciones sobre las superficies frías en el interior de un edificio, pueden reducirse por ventilación especialmente cuando no se desea usar calefacción. La ventilación requerida puede calcularse a partir de (288):

$$nV = \frac{G}{C_i - C_e} \quad (F26)$$

Donde G es la producción total de humedad (Kg/hora) en un edificio cuyo volumen V es ventilado completamente n veces por hora, y C_i y C_e son las concentraciones de vapor de agua en el interior y el exterior del edificio. Es claro que la ventilación es útil únicamente cuando $C_i > C_e$, porque de otra manera la humedad se introduciría desde el exterior. La con-

densación se observa a menudo en aquellos países donde, durante la primavera, el aire húmedo y caliente entra a edificios de paredes gruesas y escasamente calentados (200).^{*} La condensación superficial puede evitarse si las paredes y los techos tienen una resistencia térmica y una capacidad calorífica suficientes. Los remedios incluyen entelados de calentamiento fácil (41, 98) y argamasas anticondensación (254). Las últimas únicamente acumulan humedad condensada y no impiden la condensación. Las paredes mismas pueden también calentarse para prevenir condensación, y en ocasiones se usan ductos de ventilación (200).

En la práctica moderna de construcción de edificios se usan repelentes de vapor en la superficie interna del edificio, tales como papeles de aluminio y laminados asfaltados (bitumen), para prevenir la condensación intersticial (92, 131).

En monumentos, tales remedios son posibles únicamente cuando las paredes no están cubiertas con murales (38), cuando la elevación e infiltraciones de agua han sido eliminadas, y cuando las temperaturas del interior del edificio son más altas durante el año que las del exterior. Frecuentemente, estas cuatro condiciones no se cumplen. Entonces, únicamente aquellas mediciones hechas para un periodo más largo de tiempo pueden suministrar las claves para aplicar los mejores remedios.

5.1.3. Secado por medio de calentamiento

La práctica de instalar sistemas de calefacción en monumentos, ha recibido recientemente alguna atención. Supper (287) discute el daño causado a los órganos por distintos sistemas de calefacción. En un artículo muy importante, Schlieder (259) publicó medidas de temperatura y humedad relativa en iglesias alemanas antes y durante la operación de sistemas de calefacción. Schlieder sugiere la utilización de sistemas de calefacción que puedan ser bien controlados y los cuales calienten continuamente con una temperatura máxima de 16 °C. Él también critica el secamiento de las paredes en aquellas iglesias que posteriormente van a calentarse. En tales casos las paredes, cuyo contenido de humedad se ha

^{*} En el libro original dice 155 pero debe ser la referencia 200. (N. del T.)

hecho menor que el contenido crítico, son incapaces de desprender humedad cuando la humedad relativa en el edificio disminuye. Schlieder ha encontrado que en iglesias con paredes secas, la humedad relativa del interior sigue rápidamente los cambios exteriores y que el calentamiento a 20 °C provoca una caída de humedad relativa al 40%.

En tales casos, se requiere un equipo de humidificación de gran capacidad para proteger órganos, esculturas de madera, pinturas sobre tabla, etcétera. Schlieder sugiere que en muchos casos un eficiente sistema de canales y tubos puede disminuir la presencia de eflorescencias en las partes bajas de la pared. Es claro que se necesitan más investigaciones sistemáticas sobre la climatología de monumentos.

El secado de paredes por aumento de evaporación (calentamiento) debe aplicarse a la superficie exterior cuando en la superficie interior hay murales o argamasas que deben preservarse; de otra manera, las sales solubles serán transportadas hacia el interior, promoviendo el subsecuente deterioro por hidratación de las sales cristalizadas (ref. sec. 2.). Aunque el secado frontal, al menos 2 metros abajo del mural, con chorros de gas de propano-butano se ha considerado suficientemente seguro (202), la aplicación de calor infrarrojo por atrás, ha probado ser más eficiente en la preservación de frescos florentinos (330).

Cuando el calentamiento por la parte posterior fue imposible, se encontró que la proyección de calor por el frente, a través de un laminado plástico fijado en los límites del mural, previno la formación de eflorescencias (330).

5.1.4. Remedios contra otras fuentes de humedad

La infiltración del agua desde la parte superior puede evitarse por el mantenimiento regular de techos, desagües, ventanas, etcétera.

La penetración del agua a través de las paredes puede prevenirse por el mantenimiento cuidadoso de las juntas de mortero (134, 276). La remoción mecánica del mortero de las juntas, antes de resanarlas, produce con frecuencia daños al ladrillo o a la piedra. Esto puede llevar a un aumento de la penetración del agua a través de la piedra.

En la preservación de monumentos, el resanado de juntas

en la mampostería es frecuentemente ejecutado con morteros de cal. Se debe entonces tomar en consideración la proporción óptima de distribución del tamaño de partícula, para obtener mezclas adecuadas de arena-cal (ref. sec. 2.3.4.). Se ha informado de varios aditivos para mejorar las cualidades de dichos morteros (117). Los enyesados requieren de precauciones similares. La aplicación de repelentes de humedad (ref. sec. 5.3.5.), puede contribuir a impedir la penetración de la lluvia. En paredes huecas los morteros pueden formar puentes de humedad (288). Una ejecución cuidadosa de la mampostería, es pues, importante.

5.2. *Limpieza*

La remoción de suciedad es un proceso químico de superficie. En el contacto entre un cuerpo sucio y el líquido de limpieza, la tensión superficial de este último determina si la limpieza es o no posible. Si la tensión superficial del líquido es alta en relación a la del sólido, se formarán pequeñas gotas esféricas y se observa un mínimo de contacto entre las dos fases, por ejemplo, agua sobre una superficie grasa. Por otro lado, una tensión superficial baja de un líquido con relación a un sólido produce el máximo de humedecimiento del último, por ejemplo agua sobre metal limpio (18, 218). La regla es entonces aplicar a un cuerpo sucio un líquido de limpieza que tenga una tensión superficial más baja que la suciedad que debe removerse. El agua o las soluciones acuosas limpian el polvo que contiene rebabas de metales, vidrio, cerámica, óxidos metálicos, silicatos y la mayoría de los minerales. Los aceites, las grasas y otros depósitos orgánicos se limpian con solventes orgánicos (292).

5.2.1. Agua pura

Se ha empleado agua pura para la limpieza de edificios (190, 232), con aplicaciones que comprenden la aspersión con unas boquillas finas movidas hacia arriba y hacia abajo en contra de la pared (de 1 a 3 días); chorros de agua con una presión desde 4Kg/cm^2 a 14Kg/cm^2 (de 4 horas a 3 días), o agua corriente a lo largo de las paredes (por una semana

aproximadamente). Durante estos tratamientos se remueven de la mugre los constituyentes solubles en agua, mientras que la parte remanente se reblandece y puede eliminarse posteriormente por cepillado. No obstante, la eliminación mecánica de la mugre insoluble es rara vez satisfactoria, y en ocasiones se intenta aumentar el humedecimiento de la superficie sucia, por medio de la adición de detergentes.

5.2.2. Detergentes (agentes de superficie activa)

Estas sustancias son hidrocarburos de cadena larga con grupos polares, y son solubles tanto en aceite como en agua. Así es que se absorben en la interfase de agua-aceite, proyectándose la cadena de hidrocarburos en la fase aceite mientras que el grupo polar se une a la fase agua. Por ello abaten la tensión interfacial, dando como resultado que una de las fases se disperse en la otra. Tomando en cuenta sus grupos polares, los detergentes se clasifican como aniónicos, no iónicos y catiónicos. Los agentes catiónicos se absorben rápidamente en la piedra y en la cerámica (ya que por lo general los materiales inorgánicos de construcción cuando están húmedos se cargan negativamente), de manera que no contribuyen a la remoción de suciedad de estos materiales. Los detergentes aniónicos son más adecuados, pero ellos pueden reaccionar con las calizas o dolomitas y formar jabones insolubles de calcio o magnesio, los cuales consolidarán la suciedad en vez de eliminarla. Los detergentes no iónicos no tienen las desventajas anteriores y además tienen una capacidad humectante más grande que los otros agentes de superficie activa (218).

Los agentes de superficie activa que tienen una cadena muy larga de hidrocarburos son buenos emulsificantes para aceites y grasas. Los detergentes con una cadena comparativamente corta (8 carbonos) son buenos agentes humectantes (279). La composición de los depósitos de suciedad determina la elección del agente de superficie activa. Los experimentos muestran (286) que el hexametáfosfato es efectivo para reblandecer los depósitos de carbón. Los alquilbencen-sulfonatos fueron buenos para la limpieza de piedra en general y las sales de dimetilamilbenzil-amonio fueron efectivas para remover suciedad en calizas.

5.2.3. Sopleteado con arena

Los chorros de mezcla de arena y agua son muy eficientes para remover escamas y suciedad de las calizas (190, 222) y otros materiales de construcción (areniscas, morteros, ladrillos, metales). La presión de los chorros de agua-arena varía generalmente de 1 a 3 Kg/cm²; y a una distancia de 30 cm de la pared, después de 15 seg., remueven una capa superficial de 0.2 mm a 0.6 mm de espesor. No obstante, las paredes heterogéneas se erosionan en conformidad con las diferentes durezas de los materiales que las forman. (El patrón del mortero sobresaldrá de una pared de ladrillo, las rocas ígneas mostrarán un perfil protuberante en relación a las rocas sedimentarias, ladrillos, etcétera). Las esculturas sometidas a un chorro de agua y arena pierden la agudeza de sus contornos (190). La limpieza con chorros de arena de placas de mármol manchadas con orín o compuestos de cobre, se recomienda ocasionalmente, pero requiere una aplicación cuidadosa. Para este propósito se utilizan arenas de mar libres de hierro, u otros abrasivos no contaminados, pero la presión no debe exceder de 2.7 Kg; la boquilla de la manguera se mantiene cuando menos a 7 cm de la piedra (2). No obstante, este procedimiento puede más bien ser peligroso, aun cuando se efectúe con la máxima precaución. La eliminación de manchas superficiales puede efectuarse, según las recomendaciones de Weber (317), por medio de frotación con agua y abrasivos. Las manchas de orín en el mármol, causadas por la oxidación de la pirita, son frecuentemente muy profundas y por esto es imposible removerlas completamente. El mármol de carrara es especialmente vulnerable a este tipo de decoloración causada por la degradación de la pirita (317).

5.2.4. Limpieza a vapor

La limpieza a vapor, únicamente con agua pura, es otra forma para la remoción de la suciedad de la piedra. El vapor se genera en una caldera pequeña, y mediante una manguera y una boquilla con un diámetro de 1 a 1.6 cm se dirige a la superficie de la piedra. La presión del vapor es de 68 Kg (para piedra antigua) y alrededor de 56 Kg (para piedra nueva) (89). La condensación de vapor en el interior del tubo, la fricción y

la expansión del vapor después de la salida del chorro, reducen la presión del vapor, de manera que ésta no es mayor que 0.5 Kg/cm^2 en el punto de contacto con la piedra (315). La limpieza a vapor se considera como el único método aplicable a la fecha, que permite la remoción de la suciedad de superficies muy irregulares sin causarles ningún daño mecánico. Con excepción de la caliza, otros tipos de piedra contaminada requieren, para lograr una limpieza eficiente con vapor, un tratamiento previo con ciertas sustancias para reblandecer la mugre (89, 315). Se debe evitar el empleo de sosa cáustica como un medio para el reblandecimiento de la suciedad, porque puede causar eflorescencias; pero la mezcla que contenga fosfatos complejos ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$; $\text{Na}_5\text{P}_2\text{O}_7$; $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$), silicato de potasio y un jabón aniónico pueden ser un buen sustituto (218). El ácido fosfórico diluido (5% en agua) puede también utilizarse. La limpieza a vapor del ladrillo, no desarrolla nubosidades blanquecinas o grisáceas, ni produce alteraciones en las juntas de morteros (315). Para lograr una limpieza a vapor efectiva, el mármol se cubre primero, alrededor de 15 minutos, con una suspensión de un limpiador alcalino y después se somete al chorro de vapor. Posteriormente es indispensable ejecutar un enjuague profundo del limpiador o de la suciedad suelta (2). La limpieza a vapor imparte a algunos mármoles una apariencia no natural, y posteriormente éstos son fácilmente atacados (130). De acuerdo con Przedpetski (231) para lograr una eficiente limpieza a vapor, la presión del vapor al salir de la boquilla debe estar entre 1.5 y 2 atm y el tratamiento debe durar de 6 a 10 minutos por metro cuadrado.

5.2.5. Crítica a la limpieza con agua

Los métodos de limpieza con agua pueden ser dañinos para varios materiales de construcción. La cantidad de agua absorbida por estos materiales, y el tiempo necesario para humedecerlos completamente varían mucho. Por ejemplo, el ladrillo absorbe alrededor de 3 veces más agua que la piedra arenisca cementada con cal. El agua penetra dentro de ellos con rapidez y muy pronto, tanto el núcleo como la superficie del ladrillo, están igualmente húmedos. Pero una vez que el contacto con el agua se termina, el agua absorbida se evapora

con igual rapidez. En las rocas sedimentarias esto sucede en forma diferente, ya que el agua se filtra con lentitud (a causa de la distribución irregular de los poros grandes y pequeños, y porque la velocidad de penetración es determinada por los poros estrechos), y también la evaporación del agua ocurre lentamente (92). Las paredes de los edificios, construidos con otro material que no sean ladrillos, retendrán después de la limpieza con agua, particularmente en la limpieza a vapor, la mayor parte del agua absorbida durante el tratamiento, que podrá producir un aumento de la humedad, eflorescencias, decoloración y exfoliación del yeso en el interior de las paredes del edificio.

5.2.6. Limpieza química

Las inconveniencias de la limpieza con agua pura pueden reducirse por el empleo de reactivos solubles en agua, los cuales pueden descomponer las capas de suciedad. Para disminuir aún más la penetración del agua dentro del material limpiado, los reactivos se mezclan con agua y un polvo absorbente, para formar una pasta que después de la aplicación absorba la suciedad. Los polvos absorbentes deben tener una gran superficie específica y una fina estructura porosa (113, 319).

Son polvos absorbentes comunes el almidón, la tiza, el talco, el maíz molido, la harina (205), la magnesia (319) o el silicato de magnesio. Las soluciones acuosas de los reactivos usados para limpieza pueden ser ácidas o alcalinas y las plastas hechas con ellos se aplican normalmente como una capa de 3 mm de espesor, colocada sobre la superficie que va a limpiarse (319). La concentración de los reactivos debe ser más bien suave que fuerte y la limpieza debe hacerse gradualmente (130). La limpieza debe efectuarse siempre desde abajo hacia arriba (26). Una práctica recomendada al remover las manchas y pegotes es primero humedecerlos con agua, evitando con esto que una concentración demasiado alta del reactivo de limpieza entre en contacto con el material y, además, que obstruya tanto como sea posible la difusión de la mancha durante el lavado (205). Las áreas lavadas con reactivos deben pacientemente enjuagarse con agua (130).

5.2.6.1. Limpiadores alcalinos

Los limpiadores alcalinos más comunes contienen sosa cáustica y no sirven para la limpieza de materiales inorgánicos de construcción, porque después de la limpieza pueden producir eflorescencias y degradación superficial (190, 135). No obstante el amoniaco cuando está mezclado con tiza (Whiting),* hace un buen emplasto para la remoción, en el mármol, de manchas de aceite o grasa (107).

En la piedra, las manchas y eflorescencias de compuestos de hierro, pueden removerse aplicando sobre ellas compresas de algodón impregnadas con una solución al 15% de citrato ácido de sodio ($\text{NaC}_6\text{O}_7\text{H}_7$) en agua. Las compresas son presionadas con placas de vidrio (para evitar una rápida evaporación), sobre las cuales se colocan pesos para lograr un mejor contacto entre las manchas y las fibras de algodón de la compresa. La adición de un poco de glicerina a la solución de $\text{NaC}_6\text{O}_7\text{H}_7$ es de gran ayuda, pues mantiene húmedas las compresas por mayor tiempo. Cada 3 o 4 días las compresas vuelven a impregnarse y el tratamiento se repite hasta que se obtiene una remoción satisfactoria de las manchas. Este método es adecuado para manchas que no tienen una periferia definida. Las manchas con un perfil preciso pueden removerse así:

Después de enjuagar la mancha con agua, una compresa de algodón, impregnada con una solución al 15% de $\text{NaC}_6\text{O}_7\text{H}_7$, se coloca sobre ella y se cubre la compresa con una pasta (tiza molida y agua).** Sobre esta capa se espolvorea una película delgada de tiosulfato de sodio cristalino ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), y se deja en ese lugar por una hora. Las superficies tratadas en esa forma pueden aparecer ligeramente atacadas y pueden necesitar pulimiento (231). Una fórmula especialmente adecuada para tratar manchas de hierro en mármol, es una pasta que contenga 1 parte de citrato de sodio, 6 partes de agua y 7 partes de glicerina y tiza. Se aplica muy espesa y se deja sobre la mancha por un par de días. Esto removerá también el orín del mármol. Las man-

* Whiting quiere decir tiza; esta puede ser: blanco de España yeso, etcétera. Los autores no especifican a cuál de estos materiales se refieren, pero posiblemente se refieren al carbonato de calcio. (N. del T.)

** Ground Chalk and Water, *sic*.

chas muy oscuras de hierro, de acuerdo con Edel, deben humedecerse con una solución de citrato de sodio (1:6) antes de este tratamiento (90). Otro procedimiento para limpiar manchas de orín es cubrirlas con una capa de 10 mm de grueso de una pasta que contenga 15% de tartrato doble de sodio y potasio ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), 35% de agua y 50% de glicerina, mezclada con tiza en una proporción de 1:4. El tratamiento tarda de 3 a 4 días y puede repetirse. Se obtienen mejores resultados si se le agrega a la mezcla una solución al 2% del ferrocianuro de potasio [$\text{K}_4\text{F}(\text{CN})_6$] (231).

Las decoloraciones provocadas por compuestos de cobre también se remueven con pastas alcalinas que contengan cianuro de potasio (90). Pero debido a que el cianuro de potasio es venenoso, tales manchas pueden quitarse también con aplicaciones repetidas de un emplasto hecho de los siguientes reactivos: 9 partes de solución Komplexon III (sal de sodio del ácido etilen diamino tetra acético, a razón de 37.2 gr por litro de agua), 1 parte de solución reguladora de $\text{Ph} = 10$ (70 gr de cloruro de amonio disuelto en 570 ml de hidróxido de amonio concentrado y aforado con agua a un litro) (93) y agregando suficiente polvo absorbente para hacer una pasta.

Las manchas de compuestos de cobre, se limpian igualmente con la siguiente pasta: cloruro de amonio y talco, en una relación de 1:4; se mezclan y agitan con amoniaco para formar una pasta. En lugar del cloruro de amonio, el hidróxido de aluminio también puede ser efectivo (231).

5.2.6.2. Limpiadores ácidos

El uso de los ácidos en limpieza de piedra no debe recomendarse porque los limpiadores ácidos disuelven la caliza y penetran profundamente dentro de las areniscas, donde son retenidos por muchos años (97, 315). Limpiezas con ácido fluorhídrico se efectúan ocasionalmente, y Sneyers (277) informa de limpiezas de piedras oscurecidas por ollín, sílice y yeso, con una solución del 3 al 10% de ácido fluorhídrico, aplicada durante un tiempo 20 a 30 minutos. No obstante, la limpieza con ácido fluorhídrico causa decoloración en las piedras, ya que este ácido reacciona con los compuestos de hierro que son generalmente de color café, y forma complejos incoloros de fluoruros de hierro (315). Después de haber

investigado varios limpiadores ácidos comerciales, que contienen fluoruro de hidrógeno amoniacal (NH_4HF_2), Mami-llan (190) señala con relación a la piedra caliza que:

1. No observó cambio en la dureza superficial después de la limpieza;
2. La superficie tratada permaneció permeable;
3. La permeabilidad a la lluvia fue igual en una superficie químicamente tratada que una limpiada con agua;
4. La evaporación no se obstruyó después de la limpieza química;
5. La caliza limpiada con una mezcla de NH_4HF_2 permaneció vulnerable a los aerosoles de ácido sulfúrico de la atmósfera industrial.
6. Se observaron algunas eflorescencias, y
7. La limpieza química no decoloró a la caliza más que la limpieza con agua.

Mientras que para las calizas, los limpiadores a base de NH_4HF_2 pueden considerarse como confiables; las areniscas y las piedras ígneas pueden desarrollar una decoloración blanquecina debido a una disolución parcial de ciertos silicatos y a la subsecuente precipitación de ácido silícico coloidal (235).

El ácido fluorhídrico ha sido propuesto para la limpieza de manchas de hierro (205), pero el fluoruro de sodio parece ser más efectivo (31). Las manchas de orín en el mármol pueden limpiarse satisfactoriamente con ácido fosfórico, siguiendo el tratamiento con un enjuague de amoniacal para neutralizar (317).

5.2.6.3. Limpiadores orgánicos

Para remover aceite y grasa de una superficie sucia, la tensión superficial del agente desplazante líquido debe ser más baja que la tensión superficial del "aceite" que va a ser desplazado (mientras más grande es la diferencia de tensiones superficiales, mejor es la limpieza). El agente desplazante debe ser, además, suficientemente soluble en aceite o grasa. Los perfluorocarburos (1-cloro-perfluorononano) y derivados del dimetil silicón, reemplazan vigorosamente al aceite,

pero los hidrocarburos alifáticos tales como el n-hexano y el n-decano son también fuertes agentes desplazantes (18).

Se ha informado que la suciedad que consiste de grasa y materia soluble en agua se limpia mejor con emulsiones de solventes orgánicos y agua. Dos partes de hidrocarburo alifático (solvente de Stoddard, con punto de inflamación 104° F) y una parte de solvente clorado (metil cloroformo), cuando se emulsifican con un agente de superficie activa, no iónico (1%), con agua (65%), formarán una emulsión capaz de limpiar residuos grasos muy persistentes (18). La emulsión puede aplicarse por aspersión (spray) o con un polvo absorbente. Las manchas de aceite en el mármol se limpian cubriéndolas con compresas de algodón, impregnadas antes de usarlas en un líquido de la siguiente composición: 6 partes de alcohol, 3 de acetato de butilo y una parte de acetato de amilo (26). Las compresas impregnadas con una mezcla de partes iguales de acetona y acetato de amilo ($\text{CH}_3 - \text{COO} - \text{C}_5\text{H}_{11}$) también limpian muy bien las manchas aceitosas. Para reducir la evaporación de estos solventes, las compresas deben presionarse con placas de vidrio, y el tratamiento debe repetirse de 3 a 4 veces cuando menos. Si después de este tratamiento, la mancha no se quita del todo, su limpieza puede llevarse más adelante con un emplasto hecho de tiza, cloruro de calcio y polvo de mármol, por partes iguales, todo ello mezclado con benceno para formar una pasta. No obstante, este tratamiento puede atacar la superficie limpiada (231). Los residuos grasos antiguos se quitan aplicando sobre ellos una capa de 10 mm de grueso de fibras de asbesto sumergidas en amil octano. Las compresas de asbesto se cubren entonces con una placa de mármol, sobre la cual se coloca un plato metálico caliente, ya que el aumento de temperatura promueve la disolución de la grasa (231).

Las manchas de origen orgánico pueden blanquearse ya sea con una solución al 3% de peróxido de hidrógeno (107, 205) o (para manchas obstinadas) con la misma solución a la cual se le agrega perborato de sodio (205) (una cucharada pequeña por litro de peróxido de hidrógeno al 3%). El mármol también puede blanquearse con una solución de permanganato de potasio al 0.5%. Esta solución se aplica sobre el área contaminada y, justamente antes de un secado completo, el área se humedece con amoniaco. Exactamente después sigue un tratamiento con hidrosulfito de sodio (90).

5.2.7. Limpieza de varios materiales de construcción, de estatuas y de murales

Las eflorescencias sobre edificios y estatuas se eliminan mejor cuando están secas (37). Se debe evitar el empleo de cepillos metálicos debido al riesgo de decoloración a causa de las partículas residuales de metal. No se recomienda el humedecimiento de las superficies para facilitar las limpiezas, ya que la presencia de agua generará otra vez los procesos químicos y físicos responsables de las eflorescencias (210).

Se ha intentado limpiar con migajón la suciedad de los murales. Se ha informado que el humedecimiento de los murales con etanol (wine spirit), antes de frotarlos, hace más fácil la limpieza (65). Se ha encontrado que la goma de borrar es mejor limpiador que el migajón, porque la elasticidad y porosidad de los borradores son superiores para remover o absorber la suciedad. Las superficies ligeramente humedecidas son más fáciles de limpiar con un borrador, porque una película de agua entre el mural y el borrador sirve como lubricante y como movilizador de suciedad. Los "anillos oscuros", que se desarrollan en los murales durante una limpieza previa con solventes orgánicos, también se pueden remover con un borrador (306). Algunas otras técnicas para limpieza de murales y los materiales correspondientes necesarios han sido revisadas por Philipot y Mora (224).

Algunas observaciones sobre la limpieza de murales en la India pueden encontrarse en las publicaciones de Bhardwaj (39).

En Londres han limpiado el granito, contaminado por la atmósfera urbana, restregándolo enérgicamente con cepillos de cerda, mientras se aplica simultáneamente agua que contiene un detergente no iónico, por ejemplo un condensado de óxido de etileno. Los depósitos alquitranados se reblandecieron con una emulsión de 9 partes de tetracloruro de carbono, 1 parte de bencina y 1 parte de solución acuosa de detergente. El frotamiento con esta emulsión se continuó hasta que la superficie del granito estuvo razonablemente limpia (54).

Los monumentos y las estatuas de mármol se limpian con mayor seguridad empleando agua dura en vez de agua destilada, ya que esta última puede disolver el mármol debido a la absorción de dióxido de carbono del aire. Pero si se debe

emplear agua destilada para la limpieza, es indispensable agregar una pequeña cantidad de vidrio soluble o de jabón (177).

Se han removido las manchas de plantas de las estatuas de mármol con cloruro de metileno y alcohol etílico. La mugre ordinaria en las estatuas se cubre con una pasta de silicato de magnesio y agua deionizada. Con esto, la suciedad se retira hacia la pasta y subsecuentemente ésta puede cepillarse (121). El hollín y el humo de las áreas labradas se remueve con amoniaco-alcohólico (272).

Los bustos de mármol se limpian con una decocción de jabón de coco (Soapnut) * a la cual se le agregan unas cuantas gotas de amoniaco antes de su uso. El busto se lava entonces con agua y se seca con una pieza de cuero suave. El color blanco en el mármol sucio, puede recuperarse por la aplicación de un recubrimiento que contenga vidrio soluble, óxido de zinc y caolín. Después del secado, este recubrimiento se escama y la mugre absorbida por él se remueve del mármol.

Las manchas de aceite en el mármol se impregnan primero con petróleo y luego se cubren con arcilla para pipa.** Después de que el petróleo y el aceite han sido extraídos de la piedra y transferidos a la arcilla, ésta se remueve. Las manchas obstinadas pueden requerir varias impregnaciones y extracciones antes de aparecer satisfactoriamente limpias. El mármol suave y poroso que muestra signos de opacamiento puede renovarse frotando suavemente su superficie con algodón previamente impregnado con una mezcla de alcohol y gasolina. A esto sigue la aplicación de un recubrimiento delgado de una pasta que contiene peróxido de hidrógeno y caolín fino. Después de secado, el recubrimiento se elimina cepillándolo (177). El mármol manchado por alquitrán u otros productos similares puede limpiarse con una mezcla de mantequilla y tiza diluida con un solvente adecuado, por ejemplo alcohol, acetona, tolueno, etcétera. La mezcla se frota en la piedra, permitiendo la movilización de la substan-

* Soapnut. El uso más común de esta palabra en inglés se refiere al jabón de coco, obtenido del aceite de coco; pero también puede referirse a un jabón natural obtenido de la fruta de las sapindáceas o de la acacia cocida. (N. del T.)

** La arcilla de pipa es un barro muy plástico, empleado tradicionalmente para manufactura de pipas de cerámica, así como para pulir o desmanchar pieles; no debe confundirse con la espuma de mar. (N. del T.)

cia alquitranada y después se elimina con una capa de arcilla de pipa (como ha sido descrito antes). Se informa que este tratamiento produce buenos resultados si se repite varias veces. La coloración obscura, dejada después de tal limpieza, puede removerse por blanqueado con pastas de caolín y peróxido de hidrógeno o permanganato de potasio caliente (60 °C) o cloruro de cal (261).

Las superficies intemperizadas o sucias de la piedra natural, se limpian con soluciones diluidas de fluorosilicatos, por ejemplo fluorosilicato de zinc. Después de la remoción mecánica del polvo suelto y de las exfoliaciones, la superficie se trata con un cepillo de cerdas sumergido regularmente en la solución de fluorosilicato. A esto debe seguir un lavado con agua pura. Para prevenir la formación de manchas por el fluorosilicato que no ha penetrado en la piedra, el exceso de agua se seca con una pieza de tela o una esponja (243).

Las algas, los líquenes y el musgo sobre edificios o estatuas, se remueven por frotación con una solución acuosa al 2% de fluorosilicato de zinc (228). Los crecimiento de hongos se tratan de una manera similar con soluciones fungicidas distintas a los fluorosilicatos; por ejemplo una solución acuosa de soda (carbonato de sodio) al 1%, una solución acuosa al 1% de cloruro de cal. Una solución acuosa al 0.5%, de vidrio soluble clorinado de sodio y potasio (Trosilinflüssig/BAYER) puede emplearse con efectos similares (210). Más aún, una solución de naftenato de cobre, en un solvente orgánico es también un buen fungicida (272). No obstante, como los crecimientos biológicos están relacionados estrechamente con la presencia de humedad, una limpieza exitosa no significa de ninguna manera resultados permanentes. La reaparición de algas, líquenes y musgo, depende del suministro de agua; únicamente la eliminación y control de esta fuente determina si el edificio o estatua permanece desinfectada, y por cuánto tiempo. Lo mismo es cierto para eflorescencias.

5.3. Consolidación y protección

Los materiales de construcción en desintegración se han tratado con preservativos orgánicos e inorgánicos, pero sin mucho éxito (183, 236). La dificultad es la penetración insuficiente de los fluidos consolidantes dentro de los materiales

porosos. En la mayoría de los caos, estos fluidos son soluciones verdaderas o coloidales. Una vez que han entrado a un material de construcción, deben reaccionar con un agente introducido más tarde o perder el solvente por evaporación para poder producir un depósito de material que cimente a las partículas sueltas. No obstante, las soluciones verdaderas tienden a precipitarse en el frente de evaporación, mientras que las dispersiones coloidales se rompen tan pronto como su fase sólida entre en contacto con las paredes de un poro o con contaminantes electrolíticos (floculación) (235). Además, debido a sus partículas de tamaño comparativamente grande, los coloides no tienen acceso a los microporos, un inconveniente real donde se requiera la conservación de piedra deleznable. Por otro lado, los solventes polares empleados para disolver los preservativos orgánicos se absorben de preferencia en el límite de la piedra, y esto conduce a la precipitación prematura del adhesivo disuelto. Como resultado, en ambos casos sólo se consigue una consolidación superficial. Tal endurecimiento superficial de un cuerpo poroso es inútil, ya que impide la evaporación de la humedad del interior y también atrae la suciedad y el polvo. En los pocos lugares en los que aún puede producirse la evaporación, las eflorescencias pueden conducir al desarrollo de ampollas y exfoliaciones. Los recubrimientos de aceite, cera y resinas naturales o sintéticas son particularmente dañinos en ese respecto (151). Esto, no obstante, no se aplica para esculturas o decoraciones mantenidas en interiores, ya que ellas permanecen generalmente secas. De allí que se recomienda, para el mármol que se mantiene en interiores (107), encerarlo después de un pulimento previo con cenizas de estaño (Putty Powder) (3 partes de óxido de estaño, 1 parte de ácido oxálico).

Puesto que la penetración de un fluido en un cuerpo poroso es inversamente proporcional a la viscosidad, la solución preservativa debe ser muy diluida y se debe aplicar repetidas veces antes de obtener un resultado satisfactorio. No obstante, parece que tal tratamiento ha dado como resultado, en general, después de varios años, ya sea fallas completas o no ha podido detener la degradación (66, 236, 284, 315). Por tal motivo, sólo se consideran aquí, brevemente, varios intentos para consolidar piedras con agua de cal, mezclas de cal (291) hidrato de bario (181, 315), sales metálicas de ácidos grasos, soluciones de goma laca, aceites vegetales, aceite (jabones

metálicos, ceras, gomo-resinas) en suspensiones acuosas etcétera (315).

La intemperización de la piedra se restringe frecuentemente por tratamiento con consolidantes orgánicos. Aunque la profundidad de penetración de tales reactivos en la piedra es bastante limitada y la preservación es dudosa, un número de ceras y resinas se emplea constantemente en la práctica de protección de piedra degradada. El granito del obelisco de Cleopatra en Londres, por ejemplo, fue impregnado con una parafina de bajo punto de fusión (alrededor de 50 °C). Una solución al 10% de esta cera en aguarrás mineral (white spirit) * se aplicó 2 veces sobre la estructura; se permitió la evaporación del solvente y la superficie se calentó con un soplete para fundir la cera e introducirla en las fisuras (54). Los elementos escultóricos que presentaban deterioro avanzado, a causa de la presencia de sales, se consolidaron con una mezcla de 2 partes de cera de abeja y 8 partes de parafina. La mezcla de ceras fundida se vació gota a gota sobre la piedra que se mantuvo caliente por irradiación constante de una lámpara infrarroja (278). Para la consolidación de murales sobre paredes secas, Church (65), ha recomendado una solución de cera (o cericina) en aguarrás mineral (white spirit). No obstante para consolidación de murales sobre una base húmeda o salina, debe emplearse una aspersion caliente de alrededor de 5% de gelatina pura, disuelta en un solvente muy suave. De acuerdo con el mismo autor pueden obtenerse también buenos resultados, si los murales con presencia de materiales húmedos y salinos, se tratan con una solución de caseína al 7%, en amoniaco muy diluido que contiene 1% de glicerina.

Las fisuras en la mampostería pueden llenarse inyectándoles cemento líquido. Se prefiere la escoria de cemento Portland (Portland-blast-furnace-Slag)** a otros cementos, porque es capaz de retener más humedad y, más aún, porque

* White spirit: este producto es una fracción del petróleo con rango de ebullición entre 115 y 210 °C, que contiene entre 16 y 20% de hidrocarburos aromáticos. Cumple la norma de calidad B. S. 245-1956 de los British Standards. En los países latinoamericanos puede llamarse natta, gasolvente o bencina, pero no contiene los hidrocarburos aromáticos que son importantes para su poder solvente. (N. del T.)

** Es el residuo que queda en los hornos de fabricación del cemento Portland.

los líquidos de inyección hechos con él son menos viscosos. Su pobre resistencia a la congelación se mejora adicionándole polvo de ladrillo o cal. Las fisuras de la mampostería se rehumedecen bien y después se tratan, dependiendo del tamaño de la abertura, de una de las siguientes maneras:

1. Fisuras de 1.5 a 2 mm de ancho pueden inyectarse con cemento líquido al cual se le agrega de 0.02 a 0.25% de un retardador, por ejemplo un sulfito hidrofílico alcalino, y 10% de un plastificante, por ejemplo una emulsión de acetato de polivinilo (59%).

2. Fisuras de 3 a 10 mm de ancho pueden ser inyectadas con cemento líquido que contenga detergente de abietato de sodio y una carga, por ejemplo, de ladrillo molido o cal.

3. Las fisuras profundas pueden inyectarse con cemento líquido que contenga 20% de ladrillo molido y 0.02 a 0.03% de abietato de sodio o 10% de emulsión de acetato de polivinilo.

4. El cemento líquido que contiene de 0.2 a 0.3% de abietato de sodio, es adecuado para la consolidación de elementos constructivos (columnas, parapetos, etcétera) que deben soportar congelación rápida. Con respecto al tipo de fisura la razón de agua a cemento varía de 1:6 a 1:0.7.

En la práctica, el punto de inyección se marca con un pegote de yeso en el cual se perfora una abertura para la trompa del dispositivo de inyección. El cemento líquido se inyecta dentro de la fisura a través de este orificio bajo una presión de 0.5 a 1 atm. En algunos casos la presión puede alcanzar hasta 4 atm. Se efectúa la inyección repetida con intervalos de 20 a 30 min (335).

Se puede preparar mortero repelente al agua agregando 0.3 – 0.5% de peso, de estearato de calcio a la mezcla seca antes del mezclado. Una cantidad más grande que el 0.5% baja la resistencia del producto (171).

5.3.1. Silicatos de sodio y potasio

Estos reactivos se obtienen comercialmente como líquidos ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ peso esp. 1.34 – 1.38, $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, peso esp. 1.26 a 1.30) (314) y se consideran como soles de ácido silícico estabilizados con hidróxidos alcalinos. Expuestas al aire, estas dispersiones coloidales absorben dióxido de car-

bono, con el cual reaccionan los álcalis estabilizadores formando carbonatos, y consecuentemente el ácido silícico se precipita como un gel blando transparente. Las piedras consolidadas con los silicatos alcalinos adquieren por ello una capa superficial de gel de sílice, y desarrollan eflorescencias producidas por los carbonatos alcalinos. No obstante se ha informado que si se aplica como una solución diluida (1 parte de silicato comercial, 3 partes de agua) sobre fragmentos de piedra muy deteriorados, produce una buena consolidación (83).

Una desventaja de la deposición de ácido silícico por la acción del dióxido de carbono es que ello ocurre a partir de la periferia del material tratado hacia el interior del mismo, y debido al acceso limitado de gas a través del gel de ácido silícico ya formado, la deposición es incompleta. Los aditivos ácidos (15-20% en peso de fluorosilicatos de sodio o potasio) producen una deposición simultánea global de ácido silícico, y también inmovilizan los iones alcalinos como fluoruros ligeramente solubles (17). Disminuye, por esto, la oportunidad de que se produzcan eflorescencias, pero tales composiciones endurecen rápidamente (después de 40 minutos) y por ello son más adecuadas como adhesivos que para impregnar. Una deposición efectiva de ácido silícico puede también generarse con un tratamiento posterior con cromatos alcalinos, pirofosfatos alcalinos o soluciones salinas de ácido fosfórico, tungstico o piroantimónico. Los últimos tres ácidos precipitan también los iones alcalinos (3 14). Las soluciones de silicatos alcalinos no mojan bien los materiales pétreos y después del secamiento producen capas de poca elasticidad. Esto puede corregirse con la adición de glicerina, jabones alcalinos, aceites sulfonados, sulfonatos de alcoholes grasos, o sales de sulfato de ácido naftalénico (3 14). No obstante, los méritos de los silicatos alcalinos como preservativos de piedra son dudosos (236, 256, 257, 315).

5.3.2. Ácido fluorhídrico (HF)

Las calizas que se están deteriorando pueden consolidarse con ácido fluorhídrico. La reacción entre este ácido y el carbonato de calcio produce fluoruro de calcio insoluble y dióxido de carbono. El procedimiento puede efectuarse me-

jor si al ácido se le agrega un agente de superficie activa, ya que en ese caso se reduce la tensión interfacial entre HF y piedra, y se afirma que produce una mejor penetración hacia el núcleo de la piedra (265). Como el ácido fluorhídrico disuelve al cuarzo, los silicatos así formados sirven como adhesivo y hacen que este tratamiento sea igualmente adecuado para piedras areniscas cementadas con cal. El ácido fluorhídrico, después de reaccionar con una piedra por 20 segundos, se supone que ha penetrado lo suficiente para permitir que, por medio de un chorro de agua, sea posible remover las escamas, ampollas y otros remanentes de la capa de corrosión (265).

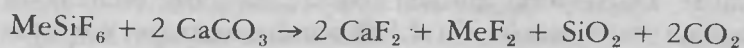
No obstante, el ácido fluorhídrico es venenoso, y es perjudicial si entra en contacto con la piel (247).

5.3.3. Ácido fluorosilícico y fluorosilicatos

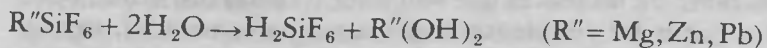
Las calizas se convierten en fluoruro de calcio en contacto con ácido fluorosilícico (H_2SiF_6); pero como este ácido es casi tan fuerte como el sulfúrico (235), la reacción es vigorosa y los productos de reacción tienden a cristalizar, perdiéndose así su función posible como adhesivo (315). Más aún, el ácido fluorosilícico comercial se desintegra parcialmente en fluoruro de silicio y ácido fluorhídrico, cuando la razón de F: Si es mayor que 6 (314). El ácido fluorhídrico así liberado conduce entonces a la decoloración (los compuestos de hierro se decoloran), mientras que los productos remanentes, después del tratamiento con ácido fluorosilícico, tienden (315) a producir áreas de eflorescencias. El ácido fluorosilícico aplicado sobre areniscas disuelve lentamente los granos de arena y la sílice del material cementante, lo cual conduce al desarrollo de una costra dura y densa que eventualmente se exfoliará (315).

Mejores resultados se han obtenido en consolidación de piedra con fluorosilicatos (80). Muchas de las sales del ácido fluorosilícico se obtienen comercialmente como soluciones. Para la preservación de piedra son importantes: el fluorosilicato de magnesio (MgSiF_6 , pH=2), fluorosilicato de zinc (ZnSiF_6 , pH=2.5), fluorosilicato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SiF}_6)_3$, pH=1) y fluorosilicato de plomo (PbSiF_6 , pH=1). Los dos últimos, debido a su acidez considerable, provocan efervescencia en las calizas (314). Cada uno de estos reactivos puede

usarse para un propósito específico; por ejemplo el fluorosilicato de aluminio neutraliza adecuadamente las argamasas frescas; el fluorosilicato de magnesio endurece argamasas antiaguas y calizas; el fluorosilicato de plomo protege una superficie tratada contra los contaminantes atmosféricos, agua de mar, y humus, mientras que el fluorosilicato de zinc es más efectivo en el endurecimiento del concreto (123). Las calizas tratadas con fluorosilicatos de aluminio, magnesio o zinc, han demostrado notable resistencia al daño por congelación (177). También se pueden obtener soluciones que contengan varios fluorosilicatos, con propiedades ajustadas especialmente (314). Porque los fluorosilicatos reaccionan con el carbonato de calcio:



(Me=Mg, Zn, Pb), los fluorosilicatos son efectivos únicamente cuando se aplican a calizas u otros materiales calcáreos (314). No obstante, la efervescencia de dióxido de carbono hace esponjosos los productos depositados, y la tendencia del fluoruro de calcio a tomar una forma cristalina disminuye la coherencia de la piedra en vez de aumentarla (315). El endurecimiento inicial de una caliza fluorosilicatada debe, por esto, evaluarse con alguna reserva, ya que se ha observado en muchos casos que en el interior de la piedra continúa la degradación debajo de la costra dura (315). Al discutir el efecto de los fluorosilicatos sobre materiales calcáreos de construcción, Rodt (243) piensa que en soluciones acuosas se hidrolizan de acuerdo a la ecuación:



El ácido fluorosilícico formado reacciona con los carbonatos insolubles de la piedra, de donde resulta allí una liberación de dióxido de carbono, o la formación de un nuevo carbonato insoluble con el metal pesado del fluorosilicato. Como los productos de la reacción incluyen, además de los carbonatos, la formación de fluoruros y silicatos con varios grados de hidratación, es importante, de acuerdo con Rodt, seleccionar el fluorosilicato que, al reaccionar con la piedra calcárea, produzcan compuestos insolubles. Este es el caso del fluorosilicato de magnesio, y en un grado más pequeño del fluorosi-

licato de zinc, ya que el fluoruro de zinc hidratado es soluble en agua.. Esto garantiza el uso del fluorosilicato de magnesio para endurecimiento de mortero, concreto y yeso antiguo.

Las areniscas deben impregnarse antes del tratamiento con fluorosilicatos, con una solución diluida de silicatos alcalinos (con todos los riesgos de eflorescencias) (284, 314, 315).

Para lograr una buena consolidación, la superficie de la piedra debe impregnarse (por ejemplo con brocha) con varias manos de una solución de fluorosilicatos de concentración creciente (del 10% al 30%) permitiendo el tiempo suficiente, después de cada aplicación, para que tenga lugar las reacciones anteriores (315). Se ha informado que una mezcla de fluorosilicatos ("Fluralsil m" de la firma Desowag Chemie-GmbH, Düsseldorf) aplicada con brocha sobre estatuas de piedra, como una solución al 10% por dos ocasiones consecutivas, y tres aplicaciones con una solución al 20% (con 8 días de intervalo después de cada aplicación) produce una consolidación satisfactoria (80).

Se recomienda utilizar fluorosilicatos de plomo para calizas o areniscas tratadas previamente con una solución diluida de silicato de potasio. La marca de fábrica TROPLEXIN (de la firma Willi Schmalstieg KG, Adolfstrasse 10, Hannover), una solución de fluorosilicatos de composición desconocida, también se ha usado con ese propósito (284). Este fluorosilicato produce una zona de endurecimiento de la piedra, pero no consolida su interior (284). Sanpoalesi (252) ha señalado buenos resultados con penetración profunda del fluorosilicato de magnesio, en estatuas y decoraciones arquitectónicas de calizas. Este autor usa un recipiente lleno de fluorosilicato enfrente de las partes que van a ser tratadas (de manera que una parte del recipiente es la misma parte tratada), succionando con una bomba de vacío en el lado opuesto a la parte en tratamiento. Otro procedimiento para impregnación de piedras naturales de construcción consiste en aplicaciones repetidas con brocha, de soluciones al 5, 10 o 15% de fluorosilicato de magnesio, fluorosilicato de aluminio y fluorosilicato de sodio, esperando 24 horas entre cada aplicación. Se recomienda que este tratamiento se repita cada 8 años (246).

El uso de los fluorosilicatos y del ácido fluorosilícico en consolidación de piedra no es actualmente muy popular, en vista de las fallas de estos líquidos para obtener una penetración profunda. En argamasas frescas, donde la neutralización

de la alcalinidad residual y el endurecimiento superficial son importantes, sí pueden aplicarse (123, 314).

5.3.4. Ésteres de silicio

El más común de los ésteres de silicio utilizado en la preservación de materiales de construcción es el silicato de etilo ($(C_2H_5)_4SiO_4$) el cual tiene alguna importancia como sustancia impregnadora y consolidante. En contacto con el agua, se descompone formando alcohol y gel de ácido silícico. Para lograr una precipitación rápida de este gel, en algunas marcas comerciales los ésteres de silicio están parcialmente hidrolizados con ciclohexanona, glicol o tetralina, de manera que la humedad deposite el ácido silícico de esta solución, el cual se adhiere bien a las superficies rugosas (314). Los ésteres de silicio empleados como un preservativo superficial, sólo han mostrado poca influencia en la velocidad de intemperización. Las piedras de poca calidad tratadas sufrieron daño y exfoliación, pero se obtuvo una preservación satisfactoria después de una inmersión de los fragmentos de piedra en ésteres de silicio (45). Ésteres de silicio y metil-etoxi-siloxano en relación 1:1 disueltos en etanol, se usaron para consolidar areniscas en proceso de deterioro. El metil-etoxi-siloxano también se hidroliza en la piedra y produce ácido metil-silícico el cual, aparte de su contribución a la estabilización, hace a la piedra impermeable. En la bibliografía se han propuesto las siguientes composiciones (33).

1. Para impregnación: 160 ml de la mezcla (1:1) de silicato de etilo y metil-etoxi-siloxano, 61 ml de etanol al cual se le agregan unas cuantas gotas de ácido clorhídrico.

2. Cemento sustituto para reponer partes perdidas de piedra: 250 ml de arenisca molidas, 112.5 ml de formulación como en 1, y 7 gr de óxido de magnesio.

3. Para aplicación con jeringa; 80 ml de la mezcla (1:1) de silicato de etilo y metil-etoxi-siloxano, 31 ml de etanol en agua acidificada con ácido clorhídrico en la relación de 15:4:1.3 y 10 ml de etanol puro.

Esculturas y areniscas limpiadas con agua caliente y luego secadas, fueron preservadas tres meses más tarde aplicándoles capas de silicato de etilo (275). Un nuevo material promisorio en la consolidación de areniscas es un éster de silicio

modificado que polimeriza después de la adición de un catalizador, produciendo una capa continua de sílice inorgánico. Hasta ahora todas las variedades de ésteres de silicio depositan sílice en la forma de una masa amorfa con poca o ninguna potencia adhesiva. Este material se vende como un consolidante de areniscas de dos componentes (Sandsteinverfestiger, Th. Goldschmidt A. G., 43 Essen, W. Germany) de peso específico 0.96 y viscosidad 1.1 cP. a 20 °C. Se aplica sobre la arenisca una mezcla de 3 partes de éster de silicio y una parte de catalizador, por medio de brocha o inmersión, y debido a su baja viscosidad penetra bien. Esta mezcla tiene 5 días de vida después de preparada, tiempo en el cual solidifica. Una mezcla adecuada para el moldeado, para el sellado de fisuras o para adhesivo consiste de 1 000 cm³ de arenisca molida, 28 gr de óxido de magnesio y 450 cm³ de consolidar de areniscas (3:1). Endurece de 6 a 8 horas después, a 20 °C.

Recientemente se ha efectuado la estabilización de piedras calizas intemperizadas, empleando silicato de etilo, pero en un procedimiento que combina este reactivo con silicones, por ejemplo: metil-trietoxi-silano (262). La ventaja de este método es que, además de lograr la estabilización de la piedra tratada, la hace repelente al agua, propiedad cuya expectativa es retardar considerablemente el intemperismo. En la práctica, el objeto de piedra (relieve, ornamento, estatua, etcétera) se lava primero para eliminar eflorescencias, suciedad o recubrimientos protectores antiguos, y después se sumerge en un baño o se embebe por aspersión o brocheado. En cualquiera de estas aplicaciones, se emplea una mezcla líquida de la siguiente composición: 100 partes de silicato de etilo, 100 partes de metil-trietoxi-silano, 70 partes de alcohol etílico al 80% y 1 parte de ácido clorhídrico (catalizador).

Durante el tratamiento, la piedra no debe exponerse al sol directo, ya que esto aumentará la evaporación del alcohol y por ello interferirá con el curado del líquido consolidante. Las películas brillantes que aparecen directamente sobre la piedra después de la impregnación, pueden eliminarse frotando con lienzos impregnados con alcohol; no obstante, después de la polimerización de la mezcla preservativa, tales capas tendrán que ser eliminadas mecánicamente.

5.3.5. Silicones

Dos clases de silicones se usan en mampostería. Lo más común es una resina de silicón con grupos reactivos hidroxil y alcoxil, la cual se aplica en las piedras de construcción, en soluciones con solventes orgánicos, por medio de brocha o aspersión. La resina fragua por hidrólisis atmosférica de los grupos reactivos y por condensación de algunos de los productos intermedios de reacción (24). La resina "curada" reacciona ya sea con los grupos hidroxilo, o con el agua absorbida por la superficie del mineral, y produce una unión primaria de valencia entre la resina y el material. Por esto se forma sobre la mampostería una película delgada de resina altamente repelente al agua (206).

Las resinas de silicón (85, 266, 274, 280, 327) poseen buena resistencia al calor, a la oxidación y al intemperismo. Ellas se forman por polimerización en bloque de un número de fluidos siliconados disponibles. Las moléculas poliméricas de los fluidos siliconados poseen normalmente grupos hidroxilo libres, los cuales interactúan en el curso de la polimerización para producir uniones cruzadas por puentes de oxígeno. Tales reacciones pueden producirse por elevación de la temperatura y posiblemente por el uso de catalizadores, por ejemplo naftenato de zinc o trietanolamina. La relación de grupos metilo a silicio es una medida de la cantidad de unión cruzada y de las relaciones de CH_3 : Si de 1:2, 1:3, 1:4, y 1:5, que dan sólidos incoloros con densidades decrecientes de 1.20 a 1.06. El tiempo requerido para endurecimiento a 100 °C, aumenta de 2 a 24 hrs. Los grupos etilo unidos al silicio, en lugar de grupos metilo en una cadena de xiloxano, hacen un producto más blando, soluble y de curado más lento. La substitución de un grupo fenilo por un grupo metilo hace a las resinas quebradizas y débiles. Uniendo ambos grupos, fenilo y metilo, al mismo átomo de silicio, o por condensación de silicones de alquil y fenil para hacer copolímeros, se han producido resinas con propiedades intermedias ventajosas. La adición de pequeñas cantidades de silicones a otros polímeros promueve la de-aeración y aumenta la resistencia al intemperismo de estos productos.

El segundo tipo es una solución de siliconato de sodio en agua. La hidrólisis de esta sal produce una reacción y consecuentemente la unión entre el siliconato y la superficie del

mineral. Con la evaporación del agua, se forma una película repelente al agua (206). El siliconato de sodio hace que la caliza y el mármol sean efectivamente repelentes al agua, mientras que las resinas de silicón dan con estos materiales resultados más pobres (24). No obstante, si las calizas han sido previamente tratadas con fluorosilicatos en solución al 40%, silicatos alcalinos o ésteres de silicio, las resinas de silicón pueden hacerlas repelentes al agua (35). La introducción de materiales que contienen silicio en la caliza, es necesaria, porque de acuerdo con Gregg (113), los silicones reaccionan químicamente con los átomos de silicio de la superficie, mientras que en los materiales que carecen de átomos de silicio en la superficie sólo ocurre una absorción física. Las calizas tratadas con una solución (al 4% en agua) de metil siliconato de sodio obtienen una repelencia efectiva al agua (179), mientras que una solución al 3% de metil siliconato de sodio bastan para hacer a las areniscas hidrofóbicas (23). Así mismo en ocasiones, la mampostería de ladrillo se hace también repelente al agua con metil siliconato de sodio, porque únicamente se necesita un tratamiento (134). Las resinas de silicón deben aplicarse varias veces en tales mamposterías. Como los siliconatos son muy sensibles a la humedad y a las reacciones alcalinas, las obras frescas de mampostería deben dejarse secar y permitir que disminuya su alcalinidad por tiempo de tres semanas (134) a un año (35) cuando menos, antes del tratamiento con silicones. Los ladrillos de construcción altamente refractarios no son adecuados para el tratamiento con silicones, porque en ellos la penetración es mínima y la capa de silicón que permanece en la superficie atrae el polvo y produce decoloraciones.

La mampostería calentada por el sol debe enfriarse antes de la aplicación de silicón porque, de otra manera, la evaporación rápida del solvente de la resina llena los poros y crea una presión que impide la penetración profunda de los silicones. No obstante, en paredes frías, los silicones pueden penetrar tan profundamente como 5 o 10 mm. Cualquier fisura de la mampostería debe sellarse antes del tratamiento de repelencia al agua, ya que de otra manera la película de silicón extremadamente delgada de las paredes de los poros, se romperá a través de tales aberturas y con ellos disminuirá la efectividad del tratamiento (134). Las películas de silicón no son suficientemente repelentes al agua que golpea sobre ellas

con una cierta presión (35). Cuando una pared tratada con silicones es expuesta, por ejemplo a la lluvia empujada por un viento de 50 Km/h, permitirá la entrada del agua a través de los poros con un diámetro mayor que 0.05 mm (91).

Considerando el carácter químicamente inerte de las películas de silicones, una vez que han sido absorbidas sobre el material, la repelencia al agua inducida puede durar bastante (8 a 10 años). No obstante, la duración de la repelencia al agua debido al tratamiento con silicón, depende de la contaminación atmosférica local. Se ha informado que las paredes tratadas con silicón de los edificios expuestos al mar, pierden su repelencia en 2 años, mientras que el resto de las paredes del mismo edificio que no están expuestas directamente al mar retuvieron su repelencia al agua por cerca de 10 años (35). Se cree que la permeabilidad de la película de silicón al vapor de agua es una ventaja adicional (24), ya que disminuye el contenido de humedad de los materiales tratados reduciendo el acceso de agua y permitiendo la evaporación libre del agua ya presente en el interior. No obstante, se ha informado de decoloraciones debidas a la cristalización de sales, tras la zona de repelencia al agua (35, 111), y de escamaciones producidas por su hidratación (45). Además, la protección contra el daño por congelación y contaminación, que debe ser la consecuencia del tratamiento con silicón, no se ha observado en la práctica (35, 45, 163). Una excepción a esto son las calizas tratadas con siliconato de sodio, que permanecen limpias por más tiempo, en comparación con las que no han sido tratadas. Esto se debe, probablemente, a que en tal caso, la repelencia al agua hace que escurran las gotas de agua de lluvia contaminada, mientras que la película de resina de silicón permanece algo pegajosa. No obstante, esto es de poca importancia ya que el contenido alcalino del siliconato produce una erosión progresiva por medio de las eflorescencias (45). Marchesini (194) empleó la resistencia superior de las resinas de silicón al intemperismo para la consolidación de las estatuas de mármol degradado de Venecia. La estatua se coloca en un autoclave, provisto con aberturas y salidas para agua desionizada, aire caliente, resina de silicón considerablemente diluida con solventes orgánicos, nitrógeno y una conexión para una bomba de vacío. Después de que la estatua se deposita en el autoclave, se hace pasar agua deionizada a través de ella hasta que todas las sales del mármol se disuelvan

y remuevan. Para secar el objeto, el agua se reemplaza por aire caliente, y cuando esto se logra, el aire se evacúa con una bomba de vacío; la presión en el autoclave es reducida a 0.01 Torr. Usando la succión creada por el vacío, se drena resina de silicón en el autoclave, y para asegurar una penetración profunda de la resina dentro del mármol, se bombea también nitrógeno gaseoso en el autoclave para producir una sobre presión; sigue a esto la remoción del exceso de solvente y resina, y el calentamiento por aire para iniciar la polimerización de la resina de silicón. Finalmente el objeto se saca del autoclave y se retoca la superficie. Marchesini alega que la penetración de la resina polimerizada en el mármol fue de alrededor de 5 cm de profundidad. Una ventaja adicional es que todas las etapas del tratamiento tienen lugar en el autoclave, haciendo poco posibles los accidentes. El método de Marchesini para impregnar esculturas de mármol con resinas de silicón ha recibido publicidad elocuente (10, 11).

También se emplearon resinas de silicón para hacer repelentes al agua las bases de preparación de yeso sobre las cuales se habían ejecutado las pinturas murales en el Ghur-Emir (Asia soviética central). Para este propósito los murales se rociaron con polymetilfenil siloxano al 6% en xileno. Como las resinas de silicón son adhesivos muy pobres, la consolidación de las áreas exfoliadas se efectuó con una dispersión acuosa al 1% de 2-etil hexil acrilato. Esto se llevó a cabo sobre los murales ya siliconados y por lo tanto repelentes al agua, y la adherencia de las escamas de pintura a la base fue satisfactoria. Los restos de cola de caseína, usados en restauraciones previas de los mismos murales, se reblandecieron y, junto con la base de los murales, se estabilizaron con soluciones acuosas del copolímero de alcohol polivinílico y poliacrilamida (135).

Las piedras, en particular las calizas se obscurecen ópticamente con resinas de silicón. El siliconato de sodio también obscurece las calizas, pero en un grado más pequeño (35).

5.3.6. Monómeros sintéticos

Los objetos hechos de arcilla cruda u otros materiales porosos deteriorables (piedra, madera), pueden estabilizarse por impregnación con monómeros sintéticos, los cuales son subsecuentemente polimerizados. En la Unión Soviética, por

ejemplo, esto se ha realizado con metil metacrilato. El inhibidor fue removido de los monómeros obtenidos comercialmente, por lavados repetidos con hidróxido de sodio al 1%, y secado con sulfato de sodio deshidratado. Entonces, 9 partes del monómero limpio se mezclaron con 1 parte de xileno. A 983 ml de esta mezcla se agregaron 20 gr de catalizador (peróxido de benzoilo) y la solución se vació gota a gota sobre el objeto, colocado en un desecador de vacío al cual se le había extraído, previamente, el aire. La impregnación completa se logró en 5-10 min. Se sacó el objeto del desecador, se removió el exceso de monómero, el objeto se envolvió en hojas de polietileno para prevenir la evaporación del monómero y se colocó en un horno. Durante las primeras dos o tres horas la temperatura fue incrementada gradualmente de 70 a 100 °C y después de eso elevada a 110-120 °C. Esta temperatura se mantuvo de 2 a 3 horas. El objeto fue entonces removido del horno y enfriado a la temperatura ambiente. Este tratamiento, según se informa, imparte a los objetos porosos una estabilidad notable y gran resistencia a cambios en la humedad ambiental (96). No obstante, este método tiene sus limitaciones (el espacio relativamente pequeño del desecador, la extracción requerida del aire y las manipulaciones térmicas, etcétera) que confinan su uso a objetos pequeños. Estos inconvenientes han sido eliminados hasta cierto grado, por la selección de iniciadores de polimerización más adecuados. Por ejemplo Munnikendam (213) curó 5 gr de metil metacrilato técnico (Röhm and Haas, Darmstadt, Germany), sin habersele removido el inhibidor, en aproximadamente 1 hr a 25 °C con la adición de 2% de peróxido de benzoilo y 0.6% de dimetil para-toluidina. Muestras de arenisca, impregnadas durante 10 min de inmersión en esta mezcla, enseñan que la prevención de la evaporación del monómero es esencial para obtener una buena retención de metil metacrilato polimerizado en la muestra tratada. El envolver las muestras en hojas de aluminio, produjo un porcentaje de retención (relación del peso del polímero al peso del monómero originalmente introducido) que variaba del 50 al 75%. La evaporación del monómero rociado en murales, se redujo grandemente por la aplicación ulterior de un recubrimiento superficial de polimetil metacrilato en acetona, aplicado con una pistola de aire. Después de la polimerización se limpió el exceso de metilmetacrilato con acetona o cloro-

formo (213); no obstante, se encontró que el cubrir el objeto impregnado con la película de un líquido que no se mezcle con el metil metacrilato, como agua o glicol, es mejor barrera contra la evaporación que cualquier otro recubrimiento sólido. Para facilitar la aplicación práctica, estos líquidos se engruesan respectivamente con almidón o caolín y después de la impregnación del material poroso, se usa uno de ellos como recubrimiento. Después de la polimerización del monómero, es decir después de una hora, este recubrimiento puede removerse con agua tibia de la llave (214).

5.3.7. Polímeros sintéticos

Debido a sus moléculas largas, los polímeros sintéticos deben aplicarse como soluciones muy diluidas. Pero aun entonces la impregnación real con polímeros es únicamente de unos cuantos milímetros dentro de la superficie del material poroso, ya que el depósito del polímero es controlado por la evaporación del solvente y tiene lugar desde el frente de evaporación hacia el interior. No obstante los recubrimientos superficiales de polímeros no son muy útiles en la preservación de la piedra ya que obstruyen la evaporación de la humedad y por ello provocan ampollamientos intensos en puntos de falla de la película (151, 315). Esto es especialmente obvio en condiciones exteriores.

Muestras de calizas y areniscas han sido tratadas con polimetil metacrilato al 1% en tricloroetileno, hule al 0.5% en benceno, poliestireno al 0.5% en benceno y cloruro de polivinilo al 2% en aguarrás mineral (white spirit) (221). Especímenes de areniscas también se han tratado con un copolímero de estireno y butadieno al 5% en xileno, y resina de silicón al 5% en xileno (245). Como han mostrado investigaciones posteriores, todos estos tratamientos suministraron a las muestras un recubrimiento que redujo en varios grados la porosidad de la capa superficial y por ello aumentó su estabilidad frente a los agentes externos de corrosión. No obstante, como el deterioro de la piedra se debe principalmente a la migración interna de la humedad, eventualmente se producirá la exfoliación de estos recubrimientos (151, 315).

La consolidación de argamasas y murales deteriorados puede realizarse por la aspersión con soluciones al 5% de los

siguientes polímeros: acetato de polivinilo, polivinil acetal o butil metacrilato (105). Gettens (105) recomendó el uso de 50 g del polímero seleccionado disuelto en la siguiente mezcla solvente: 700 ml de tolueno, 200 ml de dicloruro de etileno, 40 ml de acetato de celosolve y 20 ml de dibutil ftalato (105).

Philippot y Mora (223) consideran muy adecuada, como fijativo para murales, una solución al 1% de polibutil metacrilato en tolueno, mientras que la misma concentración de esta resina sintética en xileno, se ha utilizado exitosamente para consolidar murales deteriorados, calizas, areniscas, mármol, cerámica, argamasas, etcétera. Philippot y Mora (223) proponen, como un buen fijativo para murales, una solución del 1 al 5% de PARALOID B 72 * (un copolímero de metilacrilato y etil metacrilato) en tolueno. Una solución más o menos concentrada de polibutylmetacrilato (15 a 20% en una mezcla de acetona y tetracloruro de carbono) se usó también para la consolidación de argamasas y murales recobrados en excavaciones (271).

Se ha intentado la estabilización de areniscas que se desmoronan impregnándolas con una solución de 2.5 al 5% de BEDACRIL 122 x ** (un éster polimetacrílico) en tolueno (104). Para sellado de fisuras en argamasas, se ha recomendado (117) agitar una mezcla de cal apagada y arena con una dispersión acrílica (25% de resina acrílica sólida suspendida en agua) en vez de con agua pura. Se prefieren las resinas acrílicas por que no se hinchan o hidrolizan en las condiciones atmosféricas normales.

Se ha utilizado con diferente grado de éxito (277) la consolidación de piedras y argamasas corroídas, con resinas epoxi, poliéster en ácido maleico para lograr polimerización cruzada, y con mezclas de cera-parafina con resinas. Las capas de lodo sobre las paredes, conocido como un problema difícil de conservación, han sido estabilizadas, con resina de urea de acuerdo con Sakurai e Iwasaki (250).

Philippe (222) ha reportado la consolidación de esculturas que se desintegran con una mezcla de parafina y polietileno aplicado con una pistola de aire. Como consolidante de pie-

* Röhm and Hass Chemische Fabrik GmbH, Darmstadt, W. Germany (Röhm and Hass de México).

** Imperial chemical industries (ICI).

dra, las resinas epóxicas han sido ampliamente estudiadas (86). Domasowski (86), ha experimentado una variedad de resinas epóxicas disueltas en solventes orgánicos para impregnar calizas y areniscas, ya sea por medio de inmersión en un tanque o uniendo bolsas especialmente diseñadas, llenas con epoxi en solución, a superficies verticales de piedra. Él obtuvo los siguientes resultados:

1. Las resinas epóxicas se disolvieron mejor en una mezcla de solventes que contenía 1 parte de un hidrocarburo y 2-5 partes de un alcohol. La más adecuada selección de solventes para esta mezcla consistió en tolueno y metanol. Una solución al 10% de resina epóxica (el producto polaco Epidian 4, número epóxico 0.42-0.45; "Sarzyna" Sarzynie, Polonia) en esta mezcla de solventes, penetró la muestra de piedra a una profundidad de 15 cm. Una muestra con una sección transversal de 26.92 cm² en contacto con esta mezcla fue penetrada 15 cm en 19 min.

2. La piedra impregnada debe cubrirse con "toallas" de felpa de algodón, mojadas en un solvente de baja presión de vapor y después envolverse en lámina de polietileno. Esto se debe mantener por lo menos 10 días, para prevenir la evaporación de la mezcla solvente y asegurar un endurecimiento completo de la resina.

3. Ninguna coloración debida a la introducción de la resina apareció en la piedra.

4. La piedra impregnada se hizo resistente al agua.

5. La impregnación impartió a la piedra resistencia contra la degradación por microorganismos, sales solubles y contaminación atmosférica.

Las resinas epóxicas se emplean también como adhesivos. Las estatuas de cerámica rota, del parque de Wilanów (Varsovia) fueron unidas con la siguiente mezcla: 18 partes de tiestos de porcelana en polvo, 1 parte de óxido de zinc, 5 partes de resina epóxica (Epidian 5, número epóxico 0.48-0.52 "Sarzyna" Sarzynie, Polonia), 6 partes de xileno y 0.6 partes del catalizador trietilen tetra ancina ("Versamiden 125" General Mills) (162).

Los frescos de Sigiriya, en Ceylán, han sido estabilizados por impregnación con acetato de polivinilo al 0.5% en tolueno, mientras que las grietas y fisuras en los mismos frescos, fueron inyectadas con un cemento viscoso de 20% de acetato de polivinilo y 1% de dibutil ftalato (plastificante) en tolueno

(298). Una solución al 2.5% de acetato de polivinilo con la adición de un poco de un silicón en xileno se empleó para impregnar la superficie muy frágil, antes del desprendimiento, de algunos murales Coptos en Nubia (227).

Algunas observaciones críticas, en relación a la aplicación de resinas sintéticas a materiales de construcción y murales han sido hechas por Hedvall (120).

BIBLIOGRAFÍA

1. ———, *Berichte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege*. München, vol. 26, 1967.
- , *Bulletin Koninklijke Nederlandse Oudheidkundige Bond*. Voorburg, vol. 69, 1970.
- , *Deutsche Kunst und Denkmalpflege*. Deutscher Kunstverlag, München-Berlin, vol. 27, 1969.
- , *Jahrbuch der Rheinischen Denkmalpflege*. Bonn, vol. xxvii, 1967.
- , *Les monuments historiques de la France*. Paris, Nouvelle Série, vol. xvi, 1970.
- , *Monumentum*. Published by the International Council of Monuments and Sites (ICOMOS), vol. iv, 1969.
- , *Osterreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege*. Wien, vol. xxiii, 1969.
- , *Zbornik zastite spomenika kulture*. Beograd, vol. xix, 1968.
2. ———, *How to Clean Marble*. "Safety Maintenance", 110, 1955, pp. 21-23, 44.
3. ———, *Het gebruik van Kunststoffolli als vochtkering in de bouw*. Bouwcentrum, Rotterdam, 1961.
4. ———, *Damp-proof Renderings and Damp-courses*. "Engineering" (London), 194, December 1962, p. 789.
5. ———, *De vervanging van bladlood in rochtwerende constructies*. Bouwcentrum, Rotterdam, 1962.
6. ———, *New Method for Strengthening Ancient Building*. "The Surveyor and Municipal and Country Engineer" (London), vol. 122, núm. 3722, 1963, p. 1253.
7. ———, *Thermische eigenschappen van bouwmaterialen*. Bouwcentrum, Rotterdam, 1964.

8. ———, *Bodenmechanik I, II*. VDI-Verlag. Düsseldorf, 1964.
9. ———, *A Cheaper Way of Drying Walls?* "Builder" (London), 1965, vol. 208, p. 483.
10. ———, *Colloques sur l'altération des pierres*. Bruxelles, 1966-1967. Published by ICOMOS, Palais de Chaillot, Paris, 1968.
11. ———, *The Fight to Save the Sinking Jewel of the Adriatic*. "Time", July 25, 1969, 22-27.
12. ———, *L'usura del tempo vinta dal silicone*. "Il Gazzettino", Domenica, 28 gennaio, 1968, p. 4.
13. ABDALLAH, Abou El Naga: *Rapport sur les travaux de réparation suggérés pour le Kiosque de Trajan*. "Annales du service des antiquités de l'Égypte", 46, 1947, pp. 385-399.
14. ARMANDOLA, P.: *Sull'aggressività dell'acqua*. "Chimica" (Milano), 40, 10, 1964, pp. 465-466.
15. AUSBLÜHUNGEN AN ZEMENTSTEINEN, nr. 3476. *Die Verhinderung von Ausblühungen an Zementsteinen*. "Chem. Ztg", 59, 97, 1935, p. 988.
16. AUSBLÜHUNGEN AN ZEMENT UND KUNSTSTEINEN, nr. 3476. "Chem. Ztg", 59, 95, 1935, p. 967.
17. BADOWSKA, H., W. DANILECKI and M. MACZYNSKI: *Ochrona budowli przed korozją*. Arkady, Warszawa, 1962.
18. BAKER, H. R., P. B. LEACH, C. R. SINGLETERRY and W. A. ZISMAN: *Cleaning by Surface Displacement of Water and Oils*. "Industrial and Engineering Chemistry", 58, 6, 1967, pp. 29-40.
19. BALDINI, U.: *Problemes de conservation à Florence*. "IIC 1967 London Conference on Museum Climatology." Preprints (2nd. edition).
20. BARBACCI, A.: *Il restauro dei monumenti in Italia*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, 1956.
21. BARDIN, M. C.: *Oberflächenschäden an Mauerwerk und Verputz*. "Sprechsaal f. Keramik, Glas. Email. Silikate", 101, núm. 23, 1968, pp. 1085-1086.
22. BARTON, D. C.: *Notes on the Desintegration of Granite in Egypt*. "The Journal of Geology", 24, 1916, pp. 382-393.
23. BARTUSEK, A.: *Restaurance hlavního portálu a římsy*

- basiliky v Trebici*. "Památková Péce" (Prague), 1964, pp. 11-17.
24. BASS, R. L. and M. R. PORTER: *Silicones*. Waterproofing and Water-Repellency, J. L. Moillet (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1963, pp. 136-187.
 25. BATTA, G. and E. LECLERC: *Chémie des matériaux techniques*. Imprimerie H. Vaillant-Carmanne, S. A., Liège, 1957.
 26. BAUMBACH, C. J.: *Elementaert om sten*. "Meddelelser om Konservering", 1, 3, 1966, pp. 5-28.
 27. BECKETT, H. E.: *Condensation in Unglazed Pictures*. "Journ. Inst. Heating and Ventilation Engineers", 5, 1937, pp. 134-137.
 28. BERG, K. et al.: *Encyclopedie van de materialenkennis*. Agon Elsevier, Amsterdam, 1963, vol. III.
 29. BERTHELIER, S.: *Steenziekten in de monumenten uit het verleden*. "L'Éducation Nationale", 10è an. 2.8, 25 February 1954, 4 p.
 30. BHARDWAJ, H. C.: *Some Observation on the Conservation of Murals*. Conservation of Cultural Property in India. AGRAWAL, O. P. (Ed.), Proceedings of the Seminar: February 23-25, 1966, pp. 37-46. Conservation Laboratory, Nacional Museum, New Delhi.
 31. BIEK, L.: *Archaeology and the Microscope*. Butterworth Press, London, 1963.
 32. BIRKELAND, Ø. and S. D. SVENDSEN: *Norwegian Test Methods for Rain Penetration Through Masonry Walls*. "Symposium on Masonry Testings." ASTM Special Technical Publication, núm. 320, Philadelphia, 1963, pp. 3-15.
 33. BLAŽEJ, J., J. DOUBRAVA AND J. RATHOUSKÝ: *Použití organokřemičitých látek pro konzervaci a restauraci části pískovcového zábradlí letohrádku v královské zahradě*. "Zprávy Památkové Péče", 1959, pp. 69-80.
 34. BLECK, Rolf-Dieter and E. HENNIG: *Mörteluntersuchungen an mittelalterlichen Bauwerken in Thüringen*. "Ausgrabungen und Funde", 13, 5, 1968, pp. 229-235.
 35. BOUWCENTRUM: *Siliconen als muurdichtingsmiddelen*. Ratiobouw, Rotterdam, 1960.

36. BOYNTON, E. B.: *Climatic Control in Restored Buildings*. "Building Research", 1, 1964, pp. 37-39.
37. BRÄCHER, L.: *Ausblühungen. Entstehung und Bekämpfung*. "Die Ziegelindustrie", 20, 4, 1967, pp. 119-122.
38. BRANDI, C.: *Gli affreschi della cripta di S. Lorenzo a S. Vincenzo al Volturno*. "Boll. Ist. Centrale Restauro", 31-32, 1957, pp. 93-96.
39. BRANDI, C.: *Teoría del Restauro*. Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 1963.
40. BREYER, H. B.: *Steenziekten*. A. N. B. C. Natuursteen-Propagandacommissie, Keizersgracht 11-13, Amsterdam, August, 1966.
41. BUILDING RESEARCH STATION: *Condensation Problems in Buildings*. "Building Research Station Digest, núm. 23." Garston, Herts, October, 1950.
42. BUILDING RESEARCH STATION: *The Control of Lichens, Moulds and Similar Growths on Building Materials*. "Buildings Research Station Digest, núm. 47." October, 1952.
43. BUILDING RESEARCH STATION: *Damp-proof Courses*. "Building Research Station Digest, núm. 68 (first series)", Garston, Herts., July, 1954.
44. BUILDING RESEARCH STATION: *The Use of Electrical Resistance Gauges for Measuring the Moisture Content of Porous Building Materials*. Mimeographed, 7 p. + appendix, 1959.
45. BUILDING RESEARCH STATION: *Stone Preservatives*. "Building Research Station Digest, núm. 128", November, 1959.
46. BUILDING RESEARCH STATION: *Rising Damp in Walls*. "Building Research Station Digest, Second Series, núm. 27", 1962.
47. BUILDING RESEARCH STATION: *Soils and Foundations, 1-3*. "Building Research Station Digest, Second Series, núm. 63, 64 and 67", 1965-1966.
48. BUILDING RESEARCH STATION: *Cracking in Buildings*. "Building Research Station Digest, Second Series, núm. 75", Garston, Herts., October, 1966.
49. BUILDING RESEARCH STATION: *Damp-proof Courses*. "Building Research Station Digest, Second Series, núm. 75", Garston, Herst., October 1966.

50. BUILDING RESEARCH STATION: *Building Science Abstracts*. Her Majesty's Stationary office, London, vol. XL, 1967.
51. BUILDING RESEARCH STATION: *Sulphate Attack on Brickwork*. "Digest, Second Series, núm. 89", Jan. 1968, 1-6.
52. BUILDING RESEARCH STATION: *Concrete in Sulphate-bearing Soils and Groundwater*. "Digest Second Series, núm. 90", February 1968.
53. BUKOWIECKI, A.: *Über das Korrosionsverhalten von Eisen – und Nichteisenmetallen gegenüber verschiedenen Zementen und Mörteln*. "Schweizer Archiv", 31, 12, 1965, pp. 273-293.
54. BURGESS, S. G. and R. J. SCHAFFER: *Cleopatra's Needle*. "Chemistry and Industry", October 18, 1952, pp. 1026-1029.
55. BUTTERWORTH, B.: *Les Efflorescences sur les maçonneries en briques*. "Silicates Industriels", 1955, pp. 255-258, 309-312.
56. BUTTERWORTH, B.: *Some Striking Examples of Efflorescence on Brickwork*. "Transactions of the VIIth International Ceramic Congress", London, 1960, pp. 275-285.
57. CADLE, R. D. and P. L. MAGILL: *Chemistry of Contaminated Atmospheres*. Air Pollution Handbook, Magill, P. L. (Ed.), McGraw-Hill Book Company, New York, 1956, pp. 3-1/3-27.
58. CAMERMAN, C.: *Efflorescences et cristallisations dans les maçonneries*. "Bulletin de la Société Française de Céramique", núm. 2, janvier-mars, 1949, pp. 12-23.
59. CAMMERER, J. S.: *Über die kapillaren Eigenschaften der Baustoffe im Hinblick auf den Kühlhausbau*. "Gesundheits Ingenieur", 65, 1942, Heft 47/48, pp. 386-394.
60. CAMMERER, J. S.: *Das Verhalten der wichtigsten Baustoffe gegenüber flüssigem und dampfförmigem Wasser*. "Tonindustrie Zeitung", 78, 1954, pp. 199-204.
61. CAMMERER, J. S.: *Bezeichnungen und Berechnungsverfahren für Diffusionsvorgänge im Bauwesen*. "Kältetechnik", 8, 1956, pp. 339-343.
62. CAMMERER, J. S., O. KRISCHER, Th. KRISTEN

- and H. J. WIERIG: *Wärme und Feuchtigkeit*. Berlin, 1960. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn.
63. CARTWRIGHT, K. St. G. and W. P. K. FINDLAY: *Decay of Timber and its Prevention*, London, Her Majesty's Stationary Office, 1958.
 64. CASPAR, W.: *Ein klimatologischer Beitrag über Sturmschäden an Bauwerken und ihre Verhütung*. "Die Bautechnik", 30, 2, 1953, pp. 36-37.
 65. CHURCH, A. H.: *Conservation of Historic Buildings and Frescoes*. "Chemical News", 96, Aug. 30, 1907, pp. 102-106.
 66. CIACH, T. and B. PENKALOWA: *Zagadnienie konserwacji romańskiego portalu kościoła św. marie magdaleny we Wrocławiu*. "Ochrona Zabytków", 70, 3, 1965, pp. 23-28.
 67. CLOSE, P. D.: *Sound Control and Thermal Insulation of Buildings*. Reinhold Publ. Corp., New York, 1966.
 68. COENE, R. and H. STIGTER: *Sonic Booms; a Literature Survey*. Wetenschappelijk en technisch documentatie en informatiecentrum voor de Krijgsmacht, Den Haag. Nederland. Rapport Nr. TDCK 45316, May, 1966.
 69. COLES, E., J. GIBSON and R. HINDE: *The Corrosion of Lead by Dilute Aqueous Organic Acids*. "J. Appl. Chem.", 8, 5, 1958, pp. 341-348.
 70. COLOMBO, G.: *Esperienze sul prosciugamento elettrosmotico delle murature umide*. "La Ricerca Scientifica", 33 (II-A), 1963, pp. 1155-1168.
 71. COREMANS, P.: *Monumentenzorg in Indonesië: Het Borobudur Heiligdom*. "Bulletin de l'Institut royal du Patrimoine artistique", 1, 1958, pp. 71-84.
 72. COREMANS, P.: *Examples of Problems Encountered in the Field*. "The Conservation of Cultural Property", Museums and Monuments, XI, UNESCO, Paris, 1968, pp. 135-138.
 73. COUYAT, M. J.: *Le grès nubien et l'Immersion des temples des Philae*. "Annales du Service des Antiquités d'Égypte", 11, 1911, pp. 279-280.
 74. CYDZIK, J.: *Sprawozdanie z prac techniczno-konserwatorskich w palacu w Wilanowie*. "Ochrona Zabytków", 15, núm. 3, 1962, pp. 26-43.

75. DAVEY, N.: *A History of Building Materials*. Phoenix House, London, 1961.
76. DEGELIUS, G.: *Über Verwitterung von Kalk- und Dolowitgestein durch Algen und Flechten*, J. Arvid Hedvall, Chemie im Dienst der Archäologie, Bautechnik, Denkmalpflege. Akademie-forlage-Gumperts, Göteborg, 1962, pp. 156-162.
77. DE HENAU, P.: *Les pierres calcaires de construction. Prévision de leur comportement à partir des lames minces*. "Bull. Institut Royal du Patrimoine Artistique", Bruxelles, 10, 1967-1968, pp. 155-167.
78. DEHLER, E.: *Experience from Electro-osmotic Masonry Drying*. "Proceedings RILEM Symposium", Helsinki, 1965, pp. 2-23.
79. DELVERT, J.: *Recherches sur l'"érosion" des grés monuments d'Angkor*. "B. Ec. fr. Extrême-Orient", vol. LI, 1963, pp. 453-534.
80. DENNINGER, E.: *Festigung von Steinplastiken mit Flauten*. "Maltechnik", 61, 1955, pp. 108, 127.
81. DEPOORTER, D.: *Note sur les travaux d'assèchement au Grand Beguinage de Louvain*. "ICOMOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Roma 11-14, Octobre 1967, mimeographed (unpublished).
82. DE QUERVAIN, F. and V. JENNY: *Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil I und II*. Kümmerly und Frey, Geographischer Verlag, Bern 1951.
83. DESHPANDE, M. N.: *Archaeological Conservation*. "Cultural Forum", 4, 2, 1961, pp. 42, 52.
84. DIE AUSBAUARBEITEN: *Ein Hilfbuch für Bauplatz, Werkstatt und Büro*. J. Hoffman Verlag, Stuttgart, 1952.
85. DOMASŁOWSKI, W. and M. ZDZITOWIECKA: *Zagadnienia konserwatorskie malowidel ściennych oraz cegieł podłozą w kościele św. Jana w. Gnieźnie*. (Problèmes de conservation relatifs aux peintures murales et aux briques constituant leur support à l'église St. Jean de Gniezno.) "Ochrona Zabytków", 18, núm. 1, 1965, pp. 30-44.
86. DOMASŁOWSKI, W.: *Badania nad strukturalnym wzmacnianiem kamieni roztworami żywicy epoksydowych*.

- (Investigation on the Consolidation of Stones with Solutions of Epoxy Resins.) Biblioteka muzealnictwa i ochrony zabytków, seria B, tom xv, Warszawa, 1966.
87. DUPAS, M.: *L'analyse chimique des pierres calcaires et de leurs altérations dans les monuments*. "Troisième colloque sur l'altération des pierres." (ICOMOS, ICOM, Centre International de Conservation, Rome), Bruxelles, 11-14 décembre 1968, mimeographed (unpublished).
 88. DURST, C. S.: *Duration of Wind Loading on Buildings*. "Engineering, 188", 4884, 1959, pp. 550-552.
 89. DUTTON, H. H.: *Present Status of Steam Cleaning Stone*. "The Stone Trades Journal", 46, 1927, pp. 23-26.
 90. EDEL, L. P.: *Mengen en roeren, deel I*. Æ Kluwer, Deventer-Antwerpen, 1957.
 91. EDITORIAL: *Travaux de peinture de maçonneries et silicones*. "Travaux de Peinture", 19, 11, 1964, pp. 377-380.
 92. EGNER, K.: *Feuchtigkeit durchgang und Wasserdampfkondensation in Bauten*. Frackh'sche Verlags-handlung Stuttgart, 1950.
 93. EMMERLING, J.: *Komplexon III. seine Verwendungsmöglichkeiten in der Preparationswerkstatt*. "Neue Museumskunde", 8, 1, 1965, pp. 52-60.
 94. ENGELHARDT, W. von: *Der Porenraum der Sedimente*. Springer-Verlag, Berlin, 1960.
 95. ENÜSTÜN, B. V., H. S. SENTÜRK and K. KÖKSAL: *Freezing-melting Behavior of Capillary Water in Porous Materials*. "RILEM Symposium. Moisture Problems in Buildings 2-13." Helsinki, August 16-19, 1965.
 96. FEDOROVICH, E. F., Kh. KHUSNITDINK-HODZHAEV and D. RUZYBAEV: *Novy sposob zakrepleniya arkhelogicheskikh predmetov iz neobozhzhennoi gliny iz drugikh poristyykh materialov*. (A New Method for Consolidation of Archaeological Objects of Unbaked Clay and of Other Porous Materials.) Vsesoyuznaya tsentral'naya nauchno- issledovatel'skaya laboratoriya po konservatsii i restavratsii muzeinykh khudozhestvennykh tsennostei (United

- Central Laboratory for Research on Conservation and Restoration of Museum Valuables). Moscow, Communication núm. 17-18, Moscow, 1966, 113-116.
97. FISHER, T. V.: *Tips on the Care of Marble Floors*. "Safety Maintenance", 126, 1, 1963, pp. 62-63.
 98. FLÜGGE, R.: *Die Feuchtigkeit im Hochbau*. Carl Marhold Verlagsbuchhandlung, Halle a. S., 1931.
 99. FOSTER, W.: *Grecian and Roman Stucco, Mortar and Glass*. "Journal of Chemical Education", April, 1934, pp. 223-225.
 100. FOURNOL, A. and M. CROISSET: *L'eau dans les murs*. Cahiers du Centre scientifique du bâtiment (CSTB), Paris, núm. 28, 1958.
 101. FRANKE, E.: *Überblick über den Entwicklungsstand der Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elektro-osmose und einige neue Schlussfolgerungen*. "Die Bautechnik", núm. 6, 1962, pp. 187-197.
 102. FUSEY, P. and G. HYVERT: *The Causes and Effects of Moisture on Old Monuments in Tropical Regions*. "ICO-MOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14, October 1967, mimeographed (unpublished).
 103. GAIROLA, T. R.: *Examples of the Preservation of Monuments in India*. "The Conservation of Cultural Property", Museums and Monuments, xi, UNESCO, Paris, 1968, pp. 139-152.
 104. GARRIDO, J. M. C.: *La conservación de la portada de Santa María de Ripoll*. Informes y Trabajos de Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte, Arqueología y Etnología, 5, 1965.
 105. GETTENS, R. J.: *Report on Inspection and Recommendation for Treatment of Plaster Walls and Wall Paintings*. "Arizoniana", 3, 3, 1962, pp. 22-33.
 106. GIFFORD, E. W. H. and P. TAYLOR: *The Restoration of Ancient Buildings*. "The Structural Engineer", vol. 42, núm. 10, 1964, pp. 327-339.
 107. GLADSTONE, B.: *Guide to Marble Care*. "The New York Times", section 2, D 27, November 27, 1966.
 108. GLAISE, W.: *Zum Problem der Putz- und Steinkonservierung in der Denkmalpflege*. "Jahrbuch der Rheinischen Denkmalpflege", xxvi, 1959-1964, pp. 51-62.
 109. GOLD, L.: *A Possible Mechanism Associated with the*

- Freezing of Water in Porous Materials*. "Highway Research Board Bull", 168, 1, 1957, pp. 65-73.
110. GRAF, O.: *Die Baustoffe*. Konrad Wittwer, Stuttgart, 1950.
 111. GRANHOLM, H.: *Eine Methode zur Erhaltung der Wandmalereien in Struskergräbern*, J. A. Hedvall, Chemie im Dienst der Archäologie, Bautechnik, Denkmalpflege, Akademiförlaget-Gumperts, Göteborg, 1962, pp. 195-198.
 112. GREATHOUSE, G. A., B. FLEER and C. J. WESSEL: *Chemical and Physical Agents of Deterioration*. Deterioration of Materials, Greathouse, G. A. (Ed.). Reinhold Publishing Co., New York, 1954, pp. 75-174.
 113. GREGG, S. J.: *The Surface Chemistry of Solids*. Chapman and Hall Ltd., London, 1961.
 114. GRÜN, R.: *Chemie für Bauingenieure und Architekten*. Springer, Berlin, 1949.
 115. GRÜN, R.: *Die Verwitterung der Bausteine von chemischen Standpunkt*. "Chem. Ztg.", 57, 41, 1933, pp. 401-404.
 116. GRÜN, W.: *Verunreinigte Gross-stadtluft und ihre Wirkung auf Bauwerke*. "Architekt und Ingenieur", 16, 10, 1965, pp. 17-20.
 117. GRUNAU, E. B.: *Fugenmaterialien im Hochbau*. "Dtsch., Bauztg", 99, 6, 1967, pp. 502-509.
 118. HALLER, P.: *Der Austrocknungsvorgang von Baustoffen*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, Zürich. Diskussionsbericht núm. 139, 1942.
 119. HARTMANN, M.: *Taschenbuch Hochbauschäden und -fehler*. Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1964.
 120. HEDVALL, J. A.: *Denkmalschutz, Bautechnik, Mineralographie*. Simposio sobre la alteración de los materiales pétreos utilizados en los monumentos, Madrid, 8-10 noviembre 1965, pp. 165-171.
 121. HEMPEL, K. F. B.: *The Restoration of Two Marble Statues by Antonio Corradini*. "Studies in Conservation", 14, 1969, pp. 126-131.
 122. HENKEL, F.: *Untersuchung des Erhärtungsverlaufs von Kalkmörteln mit Hilfe eines Ultrarotabsorptionsschreibers*, Kristen, Th. et al., Mörtel und Putz. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1958.

123. HERBERTS, K.: *Wände und Wandbild*. Verlag Stähle und Friedel, Stuttgart, 1953.
124. HERRERO, J. Iñiquez: *Altération des calcaires et des grés utilisés dans la construction*. Éditions Eyrolles, Paris, 1967.
125. HICKIN, N. E.: *The Conservation of Building Timbers*. Hutchinson of London, 1967.
126. HIRNE, J. G. and S. BARDIN: *La corrosion des produits céramiques par les gaz sulfurés*. "Corrosion et anticorrosion", 12, 4, 1964, pp. 166-174.
127. HISSCHEMÖLLER, F. W.: *Over de capillaire eigenschappen van baksteen*. Keramisch Instituut TNO, Gouda, 1946.
128. HOLMES, W. J.: *Electro-osmotic Damp Proofing*. "The Architect and Building News", vol. 222, 1962, pp. 767-769.
129. HONEYBORNE, D. B. and P. B. HARRIS: *The Structure of Porous Building Stone and its Relation to Weathering Behaviour*, D. H. Everett and F. S. Stone, The Structure and Properties of Porous Materials, Butterworths, London, 1958, pp. 343-365.
130. HÖRMANN, H.: *Steinreinigung an Baudenkmälern*. "Deutsche Kunst und Denkmalpflege", 1, 1956, pp. 56-58.
131. HOUSING AND HOME FINANCE AGENCY: *Condensation Control in Dwelling Construction*. Washington, D. C., 1949.
132. HUECK-VAN DER PLAS, E. H.: *The Micro-biological Deterioration of Porous Building Materials*. Central Laboratory TNO, Delft, Report 6/67, May, 1967.
133. I. I. C.: *Art and Archaeology Technical Abstracts* (formerly IIC Abstracts), vol. 6 = 1966. Published at the Institute of Fine Arts, New York University for the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London.
134. IRLE, W.: *Schlagregensicheres Ziegelsicht- und Verblendmauerwerk*. "Die Ziegelindustrie", 19, 24, 1966, pp. 928-940.
135. IVANOVA, A. V., O. V. LELEKOVA and V. V. FILATOV: *Podbor materialov i razrabotka metodov ukrepleniya rospisi sten mavzoleya Gur-Emir*. (Choosing of Materials and Working out of the Methods of Stabilization of Mural Painting in Mausoleum Ghur-Emir.) Vseso-

- yuznaya tsentral'naya nauchno- issledovatel'skaya laboratoriya po konservatsii i restavratsii muzeinykh khudozhestvennykh tsennosti (United Central Laboratory for Research on Conservation and Restoration of Museum Valuables). Communication núm. 21, Moscow, 1968, pp. 42-54.
136. IVES, D. J. G. and A. E. RAWSON: *Copper Corrosion*. "J. Electrochem. Soc.", 109, 6, 1962, pp. 447-466.
 137. JATON, J., J. POCHON, J. DELVERT and M. BREDILLET: *Étude du mond-milch des grottes du Cambodge*. "Annales de l'Institut Pasteur", 110, 6, 1966, 912-919.
 138. JOHNSON, S. M.: *Deterioration Maintenance and Repair of Structures*. McGraw Hill Book Company, New York, 1965.
 139. JUDD, H. A.: *Maintenance of Restored Buildings*. "Building Research", 1, 1964, pp. 50-52.
 140. JUMIKIS, A.: *The Effect of Freezing on a Capillary Meniscus*. "Highway Research Board Bull.", 168, 1, 1957, pp. 116-122.
 141. JUSSEN, D.: *Beitrag zur Frage der Beeinflussung wichtiger Mörtel Eigenschaften durch die Art des Mischens*. Photodruck Microkopie GmbH, München 2, 1957, Dissertation Braunschweig.
 142. KAESCHE, H.: *Untersuchungen über die Korrosion unlegierter Stähle in Kalziumhydroxyd-Lösung und in feuchtem Beton*. "Archiv für das Eisenhüttenwesen", 36, 12, 1965, pp. 911-922.
 143. KAESCHE, H.: *Die Korrosion der Metalle*. Springer, Berlin, 1966.
 144. KAISER, E.: *Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der in der freien Natur*. "Chemie der Erde", 3, 4, 1929, pp. 290-341.
 145. KALF, J.: *Behouden gaat voor vernieuwen*. "Bull. Kon. Ned. Oudheidkundige Bond", 6e serie, 1948, pp. 69-80.
 146. KALKANSTRICH, "Chem-Ztg", 59, 61, 1935, p. 626.
 147. KARSTEN, R.: *Bauchemie*. Strassenbau, Chemie u, Technik, Heidelberg, 1966.
 148. KESSLER, F. J.: *Verwitterungserscheinungen an Bau-*

- werken und Bausteinen*. Inaugural-Dissertation. Julius-Maximilians-Universität, Würzburg, 1960.
149. KETTENACKER, L.: *Über die Feuchtigkeit von Mauern*. "Gesundheitsingenieur", 53, 1930, pp. 721-728.
 150. KIDDER, B. P.: *A Report on the Causes and Effects of Moisture in Old Buildings in Desert Regions*. "ICOMOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14 October 1967, mimeographed (unpublished).
 151. KIESLINGER, A.: *Zerstörungen an Steinbauten*. Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 1932.
 152. KIESLINGER, A.: *Probleme des Natursteinbaues (IV). Ausbesserung von Brandschäden*. "Steinmetz und Steinbildhauer", 69, 1953, pp. 162-165; 168-169.
 153. KIESLINGER, A.: *Feuchtigkeitsschäden an Bauwerken*. "Zement und Beton", núm. 9, 1957, pp. 1-7.
 154. KIESLINGER, A.: *Verhalten von Ziegelmauerwerk im Schadenfeuer*. "Die Ziegelnindustrie", núm. 15, 1960, pp. 527-530.
 155. KIESLINGER, A.: *Spanning en ontspanning van natuursteen*. "Natuursteen", Amsterdam, 181, 1962, pp. 80-84.
 156. KIESLINGER, A.: *Verwitterungsprobleme an Ziegelmauerwerk*. "Die Ziegelindustrie", 15, 9, 1962, pp. 356-360.
 157. KIESLINGER, A.: *Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir*. "Conferences on the Weathering of Stone. Brussels, 1966-1967", pp. 1-40. International Council of Monuments and Sites, Paris, 1968.
 158. KIESLINGER, A.: *Les principaux facteurs d'altération des pierres*. "Monumentum", 2, 1968, 51-73.
 159. KIESLINGER, A.: *Brandschäden an Natursteinen*. "Österr. Zeitschr. f. Denkmalpflege", 2, 1948, 49-58.
 160. KIESLINGER, A.: *Brandwirkungen auf Natursteine*. "Schweizer Archiv", 20 Solothurn, 1954, 305-308.
 161. KIESLINGER, A.: *Probleme des Natursteinbaues (IV). Ausbesserung von Brandschäden*. "Steinmetz und Steinbildhauer", 69, 1953, pp. 162-165; 168-169.
 162. KILISZEK, S.: *Konserwacja rzeźb ceramicznych z parku wilańskiego* (Conservations des sculptures en céramique du parc de Wilańów). "Ochrona Zabytków (82) XXI, 3, 1968, pp. 60-63.
 163. KLIEGER, P. and W. PERENCHIO: *Silikon schützt*

- Beton nicht vor Frostschäden.* "Zement-Kalk-Gips", 19, 1, 1966, pp. 30-31.
164. KLUS, J.: *Badania w zakresie stosunkow wodnych terenu koscielnego w Debnie.* "Ochrona Zabytków", 5, num. 2, 1962, pp. 48-53.
 165. KNETSCH, G.: *Geological Considerations Concerning the Preservation of Egyptian Monuments Especially of Philae, Abu Simbel and Luxor.* "Report: United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation. Meeting of International Experts on the Safeguarding of the Sites and Monuments of Ancient Nubia", Cairo, 1-11 October, 1959, 8 p.
 166. KNESTCH, G.: *Über aride Verwitterung unter besonderer Berücksichtigung natürlicher und künstlicher Wände in Ägypten.* Zeitschrift f. Geomorphologie, supplement 1, 1960, pp. 190-205.
 167. KNODEL, H.: *Ein Wandschimmel-test zur Beurteilung der Feuchtigkeitseigenschaften von Wänden.* "Gesundheits Ingenieur", 75, pp. 298-299.
 168. KOLAROV, N., I. CHOLAKOVA and R. PROINOVA: *Contamination of Calcium Sulfate During Crystallisation from Supersaturated Solutions.* "Russian Journal of Inorganic Chemistry", 9, 3, 1964, pp. 421-423.
 169. KOLLBRUNNER, C.: *Foundation und Konsolidation, Band II.* Schweizer Druck- und Verlagshaus, Zürich, 1948.
 170. KOSTEN, C. W.: *Algemene inleiding over warmte-isolatie en vochtbuisbouding in gebouwen.* "Polytechnisch Tijdschrift", 37-38, 1957, pp. 798-803.
 171. KOTARBA, J.: *Waterproofing of External Rendering.* "Czasopismo Techniczne", 72, 1, 1967, pp. 30-31.
 172. KRINGS, W.: *Schwingungsschäden an denkmalwerten Bauwerken.* "Jahrbuch der Rheinischen Denkmalpflege", 26, 1966, pp. 39-50.
 173. KRISCHER, O.: *Grundgesetze der Feuchtigkeitsbewegung in Trockengütern.* "Zeitschr. VDI", 82, num. 13, 1938, pp. 373-378.
 174. KRISCHER, O.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.* Springer Verlag, Berlin, 1963.
 175. KÜNZEL, H.: *Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an Aussenputzen.* "Zement-Kalk-Gips", 1964, pp. 237-251.
 176. LADE, K. and A. WINKLER: *Ursachen der Putz- und*

- Austrichschäden*. Verlag Carl Maurer, Geislingen, 1956.
177. LANGE, O.: *Chemisch-technische Vorschriften. I. Band: Metalle und Minerale*. Verlag Otto Spamer, Leipzig, 1923.
 178. LANGE, P. A. de: *Dakconstructies voor gebouwen met bijzonder klimaat*. "Polytechnisch Tijdschrift", núms. 41-42, 1957, pp. 886-889.
 179. LANNING, F. C.: *The Effectiveness of Sodium Methyl Silicate as a Water Repellent When Applied to Limestone*. "Transactions of the Kansas Academy of Sciences", 58, 1955, pp. 115-120; cf. Chemical Abstracts, 49, 1955, 9900e.
 180. LÉON, P.: *La vie des monuments français*. A. et J. Picard, Paris, 1951.
 181. LEWIN, S. Z.: *The Conservation of Limestone Objects and Structures*. Progress Report No. 1 of a Research Project in the Conservation Center, Institute of Fine Arts, New York University, 1965-1966.
 182. LIBERTI, S. and V. PERRONE: *Note sulle condizioni della Basilica sotterranea di Porta Maggiore. Osservazioni sul risanamento e sul consolidamento*. "Bolletino Istituto Centrale del Restauro", 3-4, 1950, pp. 131-143.
 183. LIBERTI, S.: *Consolidamento dei materiali da costruzione dei monumenti antichi*. "Bolletino Istituto Centrale del Restauro", 21-22, 1955, pp. 43-70.
 184. LIESE, J.: *Mahlke-Troschel*. "Handbuch der Holzkonservierung", Springer-Verlag, Berlin, 1950.
 185. LÜCK, W.: *Feuchtigkeit – Grundlagen, Messen, Regeln*. R. Oldenbourg, München-Wien, 1964.
 186. LUETKENS, O.: *Auswirkungen der Grundwasserabsenkung im Erftgebiet auf das Wasserschloss Frens*. "Jahrbuch der Rheinischen Denkmalpflege", 26, 1966, pp. 21-38.
 187. LUNDBERG, Bo K. O.: *Pros and Cons of Supersonic Aviation in Relation to Gains and Losses in the Combined Time/Comfort Consideration*. "Journal of the Aeronautical Society", 68, 1964, pp. 611-630.
 188. LUSCH, G.: *Windkräfte an Bauwerken*. "Berichte aus der Bauforschung", Berlin, Heft 41, 1964, pp. 1-22.
 189. MALL, G.: *Bauschäden*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1966.
 190. MAMILLAN, M.: *Recherches récentes sur le nettoyage des*

- façades en pierre calcaire*. "Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics", 17, núms. 119-200, 1964, pp. 858-888.
191. MAMILLAN, M.: *Le mouvement de l'eau dans les murs*. "Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (Supplément)", 19 núm. 217, 1966, pp. 132-141.
 192. MAMILLAN, M.: *La gélivité des matériaux*. "Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics", 20, Juillet-Août, núms. 235-236, 1967, pp. 1020-1047.
 193. MAMILLAN, M.: *Méthodes expérimentales proposées pour déterminer les qualités physiques et mécaniques des pierres* (Troisième colloque sur l'altération des pierres"). (ICOMOS, ICOM, Centre de Rome), Bruxelles, 11-14 décembre, 1968, mimeographed (unpublished).
 194. MARCHESINI, L.: *I problemi della conservazione della pietra a Venezia*. Atti della XLIX riunione (Siena, 23-27 settembre) pp. 1075-1088. Società Italiana per il Progresso della Scienza, Roma, 1968.
 195. MARTIN, R.: *Rhythmic Ice Banding in Soils*. "Highway Research Board Bull.", 218, 1, 1958, pp. 11-23.
 196. MARTOS, A. DÍAZ: *Resumen de las conclusiones leídas en la sesión de clausura por el secretario del simposio y del I.C.C.R. Simposio: "La alteración de materiales pétreos utilizados en los monumentos"*, 8-10 noviembre, Madrid, 1965, pp. 219-220.
 197. MASPERO, M. G.: *La protection de Philae pendant l'hiver de 1902 et l'été de 1903*. "Annales du Service des Antiquités de l'Égypte", 4, 1903, pp. 244-267.
 198. MASPERO, M. G.: *Deuxième rapport sur la défense de Philae*. "Annales du Service des Antiquités de l'Égypte", 5, 1904, pp. 250-264.
 199. MASPERO, M. G.: *Troisième rapport sur la défense de Philae*. "Annales de Service des Antiquités de l'Égypte", 7, 1905, pp. 71-77.
 200. MASSARI, G.: *Risanamento igienico dei locali umidi*. Hoepli, Milano, 1959, and Terza edizione ampliata, 1967.
 201. MASSARI, G., A. TIZZANO and C. ANEMONA: *Impiego della termometria a raggi infrarossi nello studio dell'umidità delle murature*. "La Ricerca Scientifica", 32 (II-A), 1962, pp. 313-322.

202. MASSARI, G. *Étude sur les dommages causés par l'humidité aux œuvres d'art des églises Venitiennes*. "IIC 1967 London Conference on Museum Climatology. Preprints."
203. MASSARI, G. and C. ANEMONA: *Il problema dell'umidità nei monumenti: Ultime esperienze e nuovi orientamenti curativi*. Società Italiana per il Progresso della Scienza. Atti della XLIX Riunione, Sienna, 23-29 settembre, 1967, pp. 1089-1091.
204. MASSARI, G.: *General Report*. "ICOMOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14 October 1967, mimeographed (unpublished).
205. MELLAN, I. and E. MELLAN: *Removing Spots and Stains*. Chemical Publishing Co., New York, 1959.
206. MICHAELS, A. S.: *The Waterproofing of Soil and Building Materials*. Waterproofing and Water-Repellency, J. L. Moillet (Ed.), Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 1963, pp. 339-383.
207. MORARU, D.: *La migration de l'eau à structure capillaire et son élimination par électrodrainage et d'autres procédés constructifs*. Thesis, mimeographed, n. d.
208. MORARU, D.: *Rapport sur les méthodes électriques de lutte contre l'humidité des bâtiments*. English translation: Report on the Electrical Methods of Fighting Against Moisture in Buildings. "Colloque ICOMOS sur la lutte contre l'humidité dans les constructions anciennes", Rome, October, 1967, mimeographed (unpublished).
209. MORARU, D.: Personal communication, 1969.
210. MORITZ, K.: *Richtig und Falsch*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1965.
211. MORITZ, K.: *Richtig und Falsch im Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz, Bautenschutz*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1965.
212. MORTENSEN, H.: *Die "Salzspregung" und ihre Bedeutung für die regional-klimatische Gliederung der Wüsten*. "Dr. A. Petermans Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt", Hrsg. von P. Langhans, 79, 1933, pp. 130-135.
213. MUNNIKENDAM, R. A.: *Preliminary Notes on the Consolidation of Porous Building Materials by Impregna-*

- tion with Monomers. "Studies in Conservation", 12, 1967, pp. 158-162.
214. MUNNIKENDAM, R. A. and Th. J. WOLSCHRIJN: *Further Remarks on the Impregnation of Porous Materials with Monomers*. "Studies in Conservation", 14, 1969, 133-135.
 215. OBENAUER, K.: *Die Ausblühung als kapillarräumlich bedingt Form kristalliner Aggregate*. "Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft", 22, 9, 1941, pp. 339-351.
 216. OBERHAMMER, W.: *Beobachtungen gelegentlich der Einrichtung von Kellerräumen für Bibliothekszwecke im Gebäude der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*. "Biblios", 6, núm. 1, 1957, pp. 7-13.
 217. OCHERBAUER, U.: *Der Turm von Maria Strassengel, die Restaurierung des gotischen Turmes*. Österreichische Zeitschrift für Denkamalpflege", 18, 1964, pp. 14-26.
 218. OSIPOW, L. I.: *Surface Chemistry*. Reinhold Publishing Co., New York, 1962.
 219. PAQUET, J.: *Methods and Means of Measurement of Humidity in Monuments*. "ICOMOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14 October, 1967, mimeographed (unpublished).
 220. PARENT, M.: *Effets des vols supersoniques*. "Les monuments historiques de la France", Nouvelle Série, 14, 1958, pp. 5-21.
 221. PENKALOWA, B.: *Wpływ powierzchniowych środków zabezpieczających na właściwości techniczne kamienia*. "Ochrona Zabytków", 17, 1, 1964, pp. 37-43.
 222. PHILIPPE, J.: *Le traitement de conservation des façades au Musée Curtius à Liège*. "Bulletin des Musées de Belgique", 1, 1958, pp. 101-102.
 223. PHILIPPOT, O. and P. MORA: *Technique et conservation des peintures murales*. Rapport ICOM, Réunion mixte de Washington et New York, 17-25 September, 1965.
 224. PHILIPPOT, P. and P. MORA: *The Conservation of Wall Paintings*. The Conservation of Cultural Property, Museums and Monuments XI, Unesco. Paris, 1968, pp. 169-189.
 225. PIEPENBURG, W., B. BÜHLING and J. BEHNKE: *Putzarbeiten im Hochbau und Versuche mit aktiviertem*

- Mörtel und mechanischen Mörtelauftrag. Westdeutscher Verlag/Köln u. Opladen, 1955.
226. PIEPENBURG, W. and K. ALBERTI: *Entstehen und Verhalten ortsüblicher Aussenputze*. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1963.
 227. PIRNAT, M.: *Snemanje in konserviranje koptskih fresk v egiptorski un sudanski nubiji* (Detachment and Conservation of Coptic Frescoes in Nubia). "Varstvo Spomenikov", 9, 1962-1964, pp. 104-120 (Ljubljana, 1965).
 228. PLENDERLEITH, M.: *Problems in the Preservation of Monuments*. The Conservation of Cultural Property, Museum and Monuments XI, Unesco, Paris, 1968, pp. 124-134.
 229. POCHON, J. and C. JATON: *Facteurs biologiques d'altération des pierres-techniques d'étude*. "Troisième colloque sur l'altération des pierres" (ICOMOS, ICOM, Centre International de Conservation), Bruxelles, 11-14 Décembre, 1968, mimeographed (unpublished).
 230. POCHON, J.: *Facteurs biologiques d'altération des pierres*. "Monumentum", 2, 1968, pp. 40-49.
 231. PRZEDPETSKI, A.: *Konservacja kamienia w architekturze*. "Budownictwo i architektura", Warszawa, 1957.
 232. RAWLINS, F. I. G.: *The Cleaning of Stonework*. "Studies in Conservation", 3, 1, 1957, pp. 1-23.
 233. REESE, L.: *Krankheiten und Zerstörungen des Ziegelmauerwerkes*. Degener Verlag, Leipzig, 1916.
 234. REIHER, H.: *Klimatologie der Gebäude*. "Boden und Wanddecke" 10, 1964, pp. 814-824.
 235. REMY, H.: *Treatise on Inorganic Chemistry*. Elsevier Publishing Co., vol. I and II, Amsterdam, 1956.
 236. REPORT of the Director of Building Research for 1935. General Research and Special Investigations. Report of the Building Research Board for the Year 1934. London, 1935, pp. 6-20.
 237. RICK, A. W.: *Taschenbuch des chemischen Bautenschutzes*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft M. B. H., Stuttgart, 1956.
 238. RILEM/CIB: Symposium Helsinki, August 16-19. *Moisture Problems in Buildings*.
 239. RITCHIE, T. and W. G. PLEWES: *Moisture Penetration*

- of Brick Masonry Panels. "ASTM-Bulletin", TP 183-187 (39-43), 1960.
240. RITCHIE, T. and J. I. DAVISON: *Factors Affecting Bond Strength and Resistance to Moisture Penetration of Brick Masonry*. Symposium on Masonry Testing. ASTM Special Technical Publication, núm. 320, Philadelphia, 1963, pp. 16-30.
 241. RITZ, J. M.: *Vom originalen Zustand in der Denkmalpflege*. "Deutsche Kunst und Denkmalpflege", 1957, pp. 74-81.
 242. ROBERTS, J. A. and H. E. VIVIAN: *Die Aufweitung von Dehnungsrissen in Mörtel durch Salzlösungen*. "Austral. J. Appl. Sci.", 11, 1960, 481/9. Werkstoffe u. Korrosion, 18, 3, 1967, p. 269.
 243. RODT, V.: *Über das Fluatieren*. "Chem. Ztg.", 58, 41, 1934, pp. 420-421.
 244. ROMANOVSKY, V.: *Études sur les pierres calcaires des monuments*. "Corrosion et Anti-corrosion", 3, 1955, pp. 101-106.
 245. ROY, B. B.: *Prevention of Weathering of Stones Used in the Construction of the Somnath Temple in Saurashtra*. en J. A. Hedvall, *Chemie im dienst der Archäologie, Bautechnik, Denkmalpflege*, Akademiförlaget-Gumperts, Göteborg, 1962, pp. 204-209.
 246. ROZYCKI, S.: *Korrosion von zementhaltigen Baustoffen und Putz unn die Verhütung*. "Werkstoffe u. Korrosion", 16, 7, 1965, p. 623.
 247. RUFF, O.: *Die Chemie des Fluors*. Springer, Berlin, 1920.
 248. RUPP, E.: *Bautechnik im Altertum*. Heinz Moos Verlag, München, 1964.
 249. RUTTE, E.: *Kalkkrusten in Spanien*. "Neues Jb. Geol. u. Paläontol", Abh. 106, 1, 1958, pp. 52-138.
 250. SAKURAI, T. and T. IWASAKI: *Treatments Made on the Main Hall of the Hōryūjii Monastery After the Fire of 1949*. "Bijutsu Kenkyu" (J. Art. Studies), 167, 1953, pp. 99-107.
 251. SALMANG, H.: *Die Keramik*. Springer, Berlin, 1958.
 252. SANPAOLESI, P.: *Metodo di indurimento delle pietre dell' architettura*. Officine Grafiche Vallecchi, Firenze, 1966.

253. SCHAAD, W. and R. HAEFELI: *Elektrokinetische Erscheinungen und ihre Anwendung in der Bodenmechanik*. "Schweizerische Bauzeitung", 65, 1947, pp. 216, 217, 223-226, 235-238.
254. SCHÄCKE, H.: *Feuchtigkeitsregelung durch Innenputze*. "Gesundheits Ingenieur", 77, Heft 23/24, 1956, pp. 1-8.
255. SCHÄFER, A.: *Über den Frost- und Tausalz widerstand von Beton*. "Tonindustrie-Zeitung", 89, 11/12, 1965, pp. 241-245.
256. SCHÄFFER, R. J.: *The Weathering Preservation and Restoration of Stone Buildings*. "Journal of the Royal Society of Arts", CIII, 1954-1955, pp. 843-867.
257. SCHAFFER, R. J.: *Some Aspects of the Decay of Stone in Buildings*. "Chemistry and Industry", January 8, 1966, pp. 46-51.
258. SCHEIDEGGER, A. E.: *The Physics of Flow Through Porous Media*. University of Toronto Press, 1963.
259. SCHLIEDER, H.: *Schäden an historischen Kirchenorgeln und anderen Kunstwerken*. "Deutsche Kunst und Denkmalpflege", 25, 1967, pp. 20-38.
260. SCHMIDT, E.: *Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Mauerwerksausblühungen*. "Die Ziegelindustrie", 9, 1965, pp. 668-671; 10, 1965, pp. 691-700.
261. SCHMIDT, F.: *Die Reinigung des Shakespearedenkmals in Weimar*. "Chem. Zentral-Blatt", Nr. 17, 1907, p. 1464.
262. SCHMIDT-THOMSEN, K.: *Zum Problem der Steinzerstörung und -konservierung*. "Deutsche Kunst und Denkmalpflege", 27, 1969, pp. 11-23.
263. SCHOEMAKER, R. L. A. and I. WOUTERS: *Windbelasting op bouwwerken*. "Het Bouwbedrijf", 9, 22, 1932, pp. 275-283.
264. SCHOFIELD, R. K.: *The pF of the Water in Soil*. "Transaction of the 3rd International Congress of Soil Science", Oxford, vol. 2, 1935, pp. 37-48.
265. SCHUH, R.: *Neue Methoden der Steinkonservierung*. "Maltechnik", 4, 4, 1962, pp. 97-103.
266. SCHOUTEN, A. E.: *Plastics*. Prisma, Utrecht, 1966.
267. SCHÜLE, W.: *Der Feuchtigkeitsgehalt von Außenmauern in bewohnten Gebäuden*. Fortschritte und Forschungen im Bauwesen. Reihe D. Heft 3, 1952, pp. 37-53. Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.

268. SCHÜLE, W., J. S. CAMMERER and P. GÖRLING: *Feuchtigkeit in Aussenwänden*. Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D, Heft 3. Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1952.
269. SCHÜLE, W.: *Feuchtigkeit in Bauteilen von Wohnbäusern*. En: KÜNZEL, H. and W. SHÜLE: Wärme und Feuchtigkeitsschutz. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1966, pp. 23-41.
270. SEARLE, A. B. and R. W. GRIMSHAW: *The Chemistry and Physics of Clays and Other Ceramic Materials*. Ernst Benn Ltd., London, 1960.
271. ŠEJNINA, E. G.: *Metoda restauracije fresaka otkrivenih pri arheološkim iskopavanjima*. "Bulletin Zavoda za likovne umjetnosti" (Zagreb), 8, nr. 1-3, 1966, pp. 91-97.
272. SHARMA, B. R. N.: *Conservation of a Temple Monument*. "Studies in Museology" (Baroda), 3, 1967, pp. 62-65.
273. SHERLOCK, R. H.: *Wind Forces on Structures: Nature of the Wind*. Journal of the Structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 84, ST 4, paper 1708, 1958, pp. 1-16.
274. SIMONDS, H. R. and J. M. CHURCH: *A Concise Guide to Plastics*. Reinhold Publ. Co., New York, 1963.
275. SMITH, D.: *Cleaning Inscriptions and Sculptures in Sandstone*. "Museum Journal", 57, 1957, pp. 215-219.
276. SMITH, F. A. III: *Restoration of Masonry*. "Building Research", 1, 1964, pp. 40-43.
277. SNEYERS, R.: *2è rapport sur l'étude des matériaux pierreux*. Réunion mixte du Comité de l'Icom pour les Laboratoires de Musée, Leningrad-Moscou, 16-23 septembre, 1963.
278. SNEYERS, R. V. and P. J. DE HENAU: *The Conservation of Stone*, in: Unesco: The Conservation of Cultural Property, Museums and Monuments XI, Paris, 1968, pp. 209-235.
279. SPRING, S.: *Metal Cleaning*. Reinhold Publishing Co., New York, 1963.
280. SPRUNG, M. M.: *Recent Progress in Silicone Chemistry*. I. Hydrolysis of Reactive Silane Intermediates. "Advances in Polymer Science", 2, 1960-1961, pp. 442-464.

281. STENESTAD, E.: *Schmutzempfindlichkeit der Ziegel*. "Die Ziegelindustrie", 20, 1966, pp. 791-792.
282. STEPANOV, C. Ya. K. P. FLORENSKII and M. V. RUD'KO: *Opyt borby s razrusheniem kamnya v pamyatnikakh arkhitektury XII-XIII vekov* (An Attempt to Fight Against Stone Deterioration of the Architectural Monuments of the 7th-8th Centuries). En *Pamyatniki Kultury* (Cultural Monuments). GRABAR, I. E., V. N. LAZAREV and V. V. KOSTOCHKIN (Ed.), 2, 1960, pp. 209-230, Akademii Nauk USSR, Moskva.
283. STINY, J.: *Ingenieurgeologisches aus Sardinien*. "Geologie und Bauwesen" (Wien), 1, 1929, pp. 157-170.
284. STOIS, A. and GÖDERITZ: in J. A. HEDVALL, *Chemie im Dienst der Archäologie, Bautechnik, Denkmalpflege*, pp. 210-212. Akademiförlaget -Gumperts, Göteborg, 1962.
285. STUMM, W. and J. O. LECKIE: *Chemistry of Ground Waters: Models for their Composition*: "Environmental Science and Technology", 1, 4, 1967, pp. 298-302.
286. SUJANOVA, O.: *Prispevok k odstranovaniu ciernych depozitov z pieskovcá*. "Zprávy Památkové Péče", 25, 1963, pp. 74-81.
287. SUPPER, W.: *Kirchenheizung und Orgel*. "Deutsche Kunst und Denkmalpflege", 25, 1967, pp. 39-45.
288. TAMMES, E. and B. H. VOS: *Vocht in bouwconstructies*. Bouwcentrum, Rotterdam, 1966.
289. T. B. E.: *Mauerwerksausblühungen und -flecken*. "Die Ziegelindustrie", núm. 9, 1965, pp. 664-667; núm. 10, 1965, pp. 701-704, 757-759; núm. 11, 1965, pp. 779-782.
290. TERZAGHI, K. and R. B. PECK: *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York, 1962.
291. *The Chalk Lime and Allied Industries: Witches' Brews*. "Building Engineer", 32, 11, 1964, pp. 220-221.
292. THELEN, E.: *The Adhesive Joint*. En *Handbook of Adhesives*, I. Skeist (Ed.), Reinhold Publishing Co., New York, 1962, pp. 30-45.
293. TODD, D. K.: *Ground Water Hydrology*. John Wiley and Sons, New York, 1964.
294. TONOLO, A. and C. GIACOBINI: *Microbiological Changes on Frescoes*. En G. Thomson, *Recent Advances*

- in Conservation, London, Butterworths, 1963, pp. 62-64.
295. TORRACA, G.: *Les essais accélérés de résistance aux agents atmosphériques*. "Troisième colloque sur l'altération des pierres" (ICOMOS, ICOM, Centre de Rome), Bruxelles, 11-14 décembre, 1968, mimeographed (unpublished).
 296. UDALAGAMA, D. B.: *The Sigiriya Frescoes Restored*. "Oriental Art." 15, 2, 1969, pp. 119-122.
 297. UNESCO: *Report on the Safeguarding of the Philae Monuments*. Prepared for UNESCO by Order of the Netherlands Government, November, 1960.
 298. UNESCO: *International Centre of the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property*. Rome et al, "Preservation of the Monuments of Mohenjo Daro, Pakistan", Prepared for UNESCO, 1964.
 299. VALENTA, O.: *The Physical and Mechanical Effect of Moisture on Constructional Materials – Mainly Concrete – Under the Action of Frost*. "RILEM Symposium Moisture Problems in Buildings", Helsinki, August 16-19, 1965, pp. 2-14.
 300. VAN AGT, J. J. F. W.: *Het pleisterwerk in middeleeuwse kerkgebouwen*. "Bull. Kon. Oudh. Bond." 6e serie, 9, 1956, pp. 54-66.
 301. VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J.: *Humidity in Walls in Relation to the Preservation of Works of Art*. "IIC 1967 London Conference on Museum Climatology", Preprints, pp. 109-117.
 302. VARLAN, E.: *L'étanchéité dans la construction*. Editions Eyrolles, Paris, 1964.
 303. VEDER, C.: *Die Bedeutung natürlicher elektrischer Felder für Elektro-osmose und Elektrokataphorese im Grundbau*. "Der Bauingenieur", 38, 1963, pp. 378-388.
 304. VERNON, W. H. J. and L. WHITBY: *The Open-air Corrosion of Copper*. "J. Inst. Metals", 42, 1929, pp. 181-202; 44, 1930, pp. 389-396.
 305. VON BECKER, H.: *Chemische Zerstörung von Beton mit organischen Estern*. "Werkstoffe u. Korrosion", 15, 10, 1964, p. 820.
 306. VON HOFMANN, K.: *Verfahren zur Reinigung von Fresken. Caseinmalereien und Mosaiken, sowie zur Ent-*

- fernung von Übermalungen auf diesen Gemälden*. German Patent 674448 (26-7-1939).
307. VOS, B. H.: *Thermal and Hygric Aspects of Cavity Structures*. Institute T. N. O. for Building Materials and Building Structures, P. O. Box 49, Delft, Report B 1-65-61, 1965.
 308. VOS, B. H.: *Non Steady-state Method for the Determination of Moisture Content in Structures*. In: WEXLER, A.: *Humidity and Moisture*, vol. 4, pp. 35-47, Reinhold Publ. Corp., New York, 1965.
 309. VOS, B. H.: *Condensation in Structures*. Institute T. N. O. for Building Materials and Building Structures, P. O. Box 49, Delft, Report B 1-67-33, 1967.
 310. VOS, B. H.: *Causes of Moisture in Building Structures*. "ICOMOS, Colloque sur les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14 October, 1967, mimeographed (unpublished).
 311. VOS, B. H.: *Characteristic Hygric Properties of Materials and their Measurement*. Institut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies. Report B 1-68-17/3p 11. Delft, 1968.
 312. VOS, B. H.: *Onderhoud en restauratie van monumenten*. "TNO-Nieuws", 24, 1969, pp. 194-199.
 313. VOÛTE, C.: *Indonesia. Geological and Hydrological Problems Involved in the Monument of Borobudur*. Unesco, serial núm. 1241/BMS. RD/CLT. Paris, May, 1969.
 314. WAGNER, H.: *Taschenbuch des chemischen Bautenschutzes*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft M. B. H., Stuttgart, 1956.
 315. WARNES, A. R.: *Building Stones, their Properties. Decay and Preservation*. Ernst Benn Ltd., London, 1926.
 316. WATSON, A., J. O. MAY, and B. BUTTERWORTH, *Studies of Pore Size Distribution*. "Trans. British Ceramic Society", 56, 1957, pp. 37-52.
 317. WEBER, J.: *Die Verfärbungen an natürlichen Bausteinen infolge Verwitterung von Eisensulfidmineralien*. "Schweizerische Bauzeitung", 84, 6, 1966, pp. 95-99.
 318. WEDLER, B.: *Berechnungsgrundlagen für Bauten*. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, München, 1965.
 319. WEHLTE, K.: *Entfernen von Fettflecken*. "Maltechnik", 70, 3, 1964, p. 82.
 320. WEIDENBACH, F.: *Über Frostblätterigkeit in Lös-*

- sen und ihre Entstehung. "Eiszeitalter u. Gegenwart", 7, 1956, pp. 113-118.
321. WEIGLER, H.: *Putzhaftung*. Wilhelm Ernst und Sohn Berlin, 1965.
 322. WEXLER, A.; *humidith and Moisture*. Reinhold Publ. Corp., New York, 5 vols. 1965.
 323. WIEDEN, P.: *Das Entfeuchten von Mauerwerk unter besonderer Berücksichtigung des Elektro-osmotischen Verfahrens*. Bauingenieur-Praxis. Heft 30, Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin-München, 1965.
 324. WIEDERHOLT, W.: *Die atmosphärische Korrosion von Kupfer und Kupferlegierungen*. "Werkstoffe u. Korrosion", 15, 8, 1964, pp. 633-644.
 325. WIERIG, H. J.: *Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Zementmörtel und Beton*. "Zement-Kalk-Gips", 18, 1965, pp. 471-482.
 326. WIGGINS, J. H.: *Effect of Sonic Boom on Structural Behaviour*. "Materials, Research and Standards", 6, 1967, pp. 235 ff.
 327. WINDING, C. C. and G. D. HIATT: *Polymeric Materials*. McGraw-Hill Book C., New York, 1961.
 328. WINKLER, E. M.: *Important Agents of Weathering for Building and Monumental Stone*. "Engineering Geology", 1, 5, 1966, pp. 381-400.
 329. WOLF, E. and Ch. BONILLA: *Formation of Lead Monoxide as a Cable Sheath Corrosion Product*. "Trans. Electrochem. Soc." 79, 1941, p. 307-329.
 330. YOUNG, W. J.: *The Florentine Flood, November 4, 1966; Some Notes and Recollections*. "Boston Museum Bulletin", 66, 1968, pp. 101-115.
 331. YOUNG, W. J. and B. ASHMOLE: *The Boston Relief and the Ludovisi Throne*. "Boston Museum Bulletin", 66, 346, 1968, pp. 124-166.
 332. ZAWADA, S.: *Problem wzmacniania spekanych murów i sklepien w obiektach zabytkowych*. "Ochrona Zabytków", 17, núm. 4, 1964, pp. 37-39.
 333. ZIELINSKI, K.: *Zeskalanie gruntu metoda R. Cebertowicza* (The Petrification of Soil by the Method of R. Cebertowicz). Warsaw, P. W. N. (Polish Scientific Publication), 1956, 112 p.
 334. ZVORIKINE, M.: *Quelques expériences d'assèchement sur les monuments en URSS*. "ICOMOS, Colloque sur

les problèmes que pose l'humidité dans les monuments", Rome, 11-14, October, 1967, mimeographed (unpublished).

335. ZVORIKINE, M.: *Consolidation des monuments d'architecture par injection dans les maçonneries*. "Monumentum", 2, 1968, pp. 74-81.
336. ZWETSCH, A.: *Frostschäden an Steingutwandfliesen*. "Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft", 44, 11, 1967, pp. 581-583.

SUPLEMENTO DE 1975.

Presentado al Comité para Conservación del ICOM

Cuarta reunión trianual

Venecia 1975.

1. INTRODUCCIÓN

Este suplemento está relacionado con dos contribuciones previas de los autores al comité del ICOM para conservación (44, 45). Una combinación de estas dos revisiones fue publicada por el Centro Internacional para la Conservación en 1972, como la primera edición del presente folleto (46). Desde 1969, se han publicado un número de libros y artículos relevantes referentes al tema. Muchos de estos, no obstante, revisan o compilan ciertos aspectos sin traer mucho material nuevo (17, 52, 58). En años recientes, varias reuniones internacionales se han dedicado total o parcialmente (21) al deterioro y conservación de materiales porosos de construcción en monumentos. En 1970, el Instituto Internacional de Conservación de Obras Históricas y Artísticas (IIC) organizó una conferencia en la cual la piedra fue uno de los dos temas (22).

También *El Centro per la Conservazione delle Sculture all'Aperto* en Bolonia, Italia, ha organizado reuniones del Comité Conjunto para la Conservación de la Piedra del ICOM, ICOMOS y el Centro Internacional para la Conservación (36, 37, 42). El Comité Conjunto también publica un boletín informativo (Newsletter) (20). En 1972, se publicaron las memorias correspondientes al simposium organizado en La Rochelle, Francia (7). La UNESCO ha continuado estimulando trabajos sobre la preservación real de monumentos importantes, y aunque la mayoría de los in-

formes de la UNESCO sobre estos proyectos tiene distribución limitada, algunos han encontrado su camino a la literatura de distribución general (52).

Un número especial de *Studies in Conservation* pone de relieve la importancia de las investigaciones preliminares en conservación, al informar acerca del trabajo del complejo del templo indonesio de Borobudur (5). El problema de zonas áridas y tropicales ha recibido atención creciente (18, 23). El intemperismo de monumentos y sitios arqueológicos de adobe ha sido el tema de algunos estudios especiales (6, 51) pero aún falta mucho por hacerse. En general se descuida la investigación sobre la erosión y el impulso de la lluvia, frecuentemente a causa de carencia o limitación de fondos, pues esto en los monumentos implica estudios a largo plazo que requieren recolección de datos sobre condiciones microclimáticas. La muy necesaria colaboración de aquéllos que se ocupan de la conservación de monumentos, de escultura decorativa y de la piedra con aquéllos especializados en la investigación en la ciencia de la construcción puede aun mejorarse mucho. Se han formulado cierto número de proyectos de investigación en común, pero (25), se ha informado muy poco sobre los resultados, debido a la carencia de apoyo financiero para tales investigaciones. Parecería que en cada país un porcentaje del presupuesto dedicado a la preservación de monumentos, debería reservarse para investigación tendiente a mejorar el diagnóstico y los tratamientos. Se percibe claramente la necesidad de experimentar a una escala semindustrial, con los métodos prometedores desarrollados en los laboratorios. En ausencia de tales posibilidades, el progreso será lento y la aplicación a monumentos reales será incidental.

Los datos que se presentarán en este trabajo, están arreglados de acuerdo con las secciones que los autores emplearon en la publicación previa de 1972 (46). La numeración y los encabezados son idénticos a aquéllos empleados en la primera parte de este folleto.

2. INTEMPERISMO POR HUMEDAD Y SALES

El intemperismo de las rocas ígneas y sedimentarias, en general como materiales de construcción, permanecen como

tema de estudios continuados. Algunos datos nuevos, compilados por Winkler (58), son relevantes para la conservación de monumentos. En la obra de Urbani: *Problemi di Conservazione* (53), se puede encontrar más información acerca del intemperismo de piedra, cerámica, aplanados y murales. Ambos trabajos tratan el tema meticulosamente y explican con claridad los procesos responsables de la degradación.

3. HUMEDAD EN MATERIALES POROSOS DE CONSTRUCCIÓN

Se ha informado de la investigación sobre el comportamiento térmico e hídrico de ciertos monumentos individuales, por largos periodos de tiempo. Lacy analizó el balance de humedad de la capilla del King's College en Cambridge, y concluye que existe muy poca oportunidad de que la humedad relativa interna caiga abajo del 50% durante el invierno, a causa de que la estructura absorbe la humedad transpirada por los visitantes durante el verano (27).

Boekwijt informó acerca de medidas automatizadas de la distribución de humedad en la iglesia de San Sebastiano en Venecia (3). Boekwijt y Vos, informan sobre tales mediciones en la Catedral de San Bavó en Haarlem, Holanda (4). Una muy interesante colección de trabajos en inglés se han obtenido recientemente, por la traducción de una conferencia rusa sobre el control de la humedad en la mampostería de monumentos históricos (55).

3.2.2.2. Penetración de la lluvia

Algunos trabajos leídos durante el segundo simposium CIB/RILEM de 1974 sobre Problemas de humedad en edificios (10), aunque se relacionan con construcciones modernas, podrían tener implicaciones útiles para monumentos. Por ejemplo, Couper discute la conversión de la fuerza de impulso de la lluvia por el de viento a escurrimiento superficial y estudió los patrones de descarga de la misma cuando cae sobre protuberancias y su habilidad de derrame (12).

3.2.2.3. Transferencia vertical de agua

Vos (56) discute la elevación de agua freática y deriva una fórmula teórica para calcular la altura de la elevación. Aplicando esta fórmula a ejemplos prácticos, demuestra que el agua elevada del suelo en una pared, no alcanzará una altura mayor que unos cuantos metros, a menos que la humedad relativa sea muy elevada. Si el agua se halla a muchos metros de altura esto indicará que es improbable que se haya originado en el suelo. Los aspectos de la elevación del agua freática en monumentos han sido discutidos por Vos y Tammes (57).

3.4. Aspectos térmicos

La medida de temperaturas superficiales, importantes, por ejemplo, para investigar las características de transferencia del calor en paredes de monumentos y los riesgos relativos de condensación se ha facilitado por el uso de sistemas de conversión de imagen de infrarrojo a visible. Se han publicado termografías de frescos, pinturas sobre tela y paredes en dos iglesias en Lodi, Italia (54).

3.6. Determinación de humedad

Existen pocos informes sobre los progresos en métodos de determinación de ambas clases de humedad: humedad relativa y contenido de la misma en materiales de construcción que tengan posibilidades de aplicación útil a la preservación de monumentos. Un procedimiento interesante para predecir distribuciones de humedad relativa, temperaturas superficiales y del aire, en locales con aire acondicionado ha sido publicado por Nielsen (33). Además de aplicaciones obvias en climatología de museos, este enfoque puede ser útil para predecir efectos cuando se consideran las medidas de acondicionamiento del aire en monumentos.

4.4. Contaminación por polvo

Algunas observaciones para las cuales (aparentemente) se había provisto de suficiente evidencia en el pasado, están ahora siendo cuestionadas a la luz de nuevos datos. Un caso de ello es la controversia acerca de la función que juega el dióxido de azufre, como contaminante atmosférico en la formación de costra sobre la piedra.

Riederer (34), cree que la conversión de dióxido de azufre a trióxido de azufre —una reacción esencial para la producción de ácido sulfúrico— es únicamente posible a temperaturas entre 400 y 600°C y en presencia de catalizadores. En vista de este requerimiento, el desarrollo de costras de yeso sobre la caliza y el mármol no puede ser atribuido a la acción del ácido sulfúrico y menos aún se puede responsabilizar a éste por el deterioro de areniscas libres de inclusiones calcáreas. Riederer asume entonces que la degradación observada en la piedra debe atribuirse al polvo (que contiene partículas calcáreas) depositado sobre la superficie de la piedra donde se transforma gradualmente en yeso. Considerando el tamaño muy fino de los granos calcáreos y la presencia de catalizadores en el polvo, la formación de yeso está entonces, al menos parcialmente, relacionada con la presencia de dióxido de azufre gaseoso. No obstante, las bacterias que forman sulfatos son también mencionadas como posibles iniciadoras de la acumulación de yeso.

Los geólogos italianos (29) han llegado a conclusiones similares: ellos establecen que el yeso encontrado en la piedra en degradación no es de origen inorgánico, la presencia de éste se atribuye de nuevo al metabolismo de tiobacteria, aunque los autores admiten que no se ha notado correlación lineal entre estas bacterias y la cantidad de yeso encontrada en sus muestras.

En cuanto a la conversión del dióxido de azufre a trióxido de azufre, en ambos trabajos se desprecia la literatura donde se discute la oxidación del dióxido de azufre a la temperatura ambiente y aun las patentes, las cuales recomiendan este proceso para la producción continua de ácido sulfúrico (43). De acuerdo con varios investigadores, en presencia de hierro, ya sea como metal, como óxido de hierro o aun como hidróxido de hierro, el dióxido de azufre es espontáneamente oxidado a trióxido de azufre (41).

De hecho, aún sin ningún catalizador, la oxidación del dióxido de azufre ocurrirá en la atmósfera, ya que la luz solar por sí sola es capaz de generarlo por medio de una reacción fotoquímica (43). El trióxido de azufre gaseoso así producido, influye sobre el balance de humedad del aire ambiente en una forma tal, que el punto de rocío del sistema aire-ácido sulfúrico, asume valores que están por arriba de la misma temperatura normal del aire circundante, lo cual quiere decir que el aire industrial inevitablemente conduce a la formación de aerosoles de ácido sulfúrico (24). En 1967, en la ciudad de Londres, durante la conferencia del IIC en Climatológica de Museos (48), se trató exhaustivamente sobre el daño hecho por los aerosoles de ácido sulfúrico a través de la formación de yeso, así como también por la presión de hidratación inherente al comportamiento de las sales solubles: el sulfato de sodio y el de magnesio siempre que se expongan a las fluctuaciones de humedad, pero esto también es discutido por Winkler (58). Aún más, Thompson y White (49) han demostrado que la lluvia urbana disuelve a las calizas cuando menos cincuenta veces más rápido que la lluvia no contaminada, lo cual quiere decir que las filtraciones de agua y los cambios de temperatura por sí solos (29), no son capaces de explicar la degradación de piedras alcalinas. La acción de los componentes ácidos del aire contaminado deben, por ello, ser agregados a aquellos factores físicos para poder hacer comprensible el deterioro de la piedra.

4.5. *Deterioro por agentes biológicos*

El origen del oxalato de calcio, la acción de los microorganismos durante su formación en la superficie de los monumentos y su función en el deterioro de la piedra ha sido investigado (35). La importante función de los agentes biológicos en el deterioro de monumentos en zonas tropicales, se ha enfatizado por el trabajo de G. Hyvert. En su tesis, ella describe con detalle la influencia sobre la alteración de los monumentos en Cambodia (18). Ella también llevó a cabo una investigación sistemática más reciente sobre los factores biológicos que afectan el deterioro del complejo del templo indonesio de Borobudur (19).

5.1.1. Medidas curativas contra la elevación de agua freática

Schelling ha publicado una revisión muy útil en alemán (39). Mamillan y Boineau (30) informan de una investigación comparativa de varios métodos para combatir la humedad ascendente. Estos autores también produjeron una película a color en donde ilustran comparativamente el efecto de varios métodos obtenidos comercialmente en Francia e instalados por varias firmas propietarias. Los datos apuntan resultados no satisfactorios por métodos electrosmóticos y a dispositivos basados en el proceso de sifones de Knapen (aerodrenes). La experiencia con métodos que emplean fluidos de inyección tendientes a impermeabilizar es prometedora, pero aún no pueden sacarse conclusiones definitivas.

5.1.1.5. Secado electrosmótico

Los métodos electrosmóticos han recibido mucha atención (32). Estadísticamente parece que hay más resultados positivos informados en países del centro y occidente de Europa que en ninguna otra parte. Esto puede estar relacionado con la preponderancia de ciertos tipos de piedra de construcción, quizá conteniendo principalmente poros estrechos. No obstante, algunas investigaciones en la URSS apuntan fuertemente hacia las posibilidades limitadas del secado electrosmótico. Kurdenkov (26) midió el coeficiente de permeabilidad electrosmótica K_e para un número de materiales pétreos empleados en monumentos históricos. Él juzgó los materiales de construcción como electrosmóticamente activos cuando el índice $K_e/K > 2.5$ cm/V. Este criterio es menos severo que el de Schaad y Haefeli (38). No obstante, los datos de Kurdenkov muestran únicamente una piedra caliza con $K_e/K = 2.93$ mientras que todos los otros valores eran < 2.5 cm/V. Para ladrillos los valores estaban entre 0.09 y 0.75 cm/V. A las conclusiones de Kurdenkov bien vale la pena de prestarle atención "... en la mayoría de los casos el uso de electrosmosis para el secado del material no es efectivo, únicamente en casos excepcionales cuando existen materiales con $h_e (= K_e/K) > 2.5$ cm/V y en casos más bien raros de materiales de actividad incompleta, la electrosmosis puede ser efectiva, y entonces solamente con el uso de altos voltajes (arriba de 100

V)". Él también concluye que la electrosmosis pasiva "donde la corriente galvánica se usa con una diferencia de potencial de no más que 3.5 V, no seca los edificios". Kurdenkov supone que en casos donde se han informado resultados positivos, la principal causa del secado "debe ser el resultado de algún otro fenómeno".

5.1.2. Remedios contra la condensación

Torraca (50) ha propuesto proteger temporalmente los monumentos, —en primavera bajo condiciones ambientales de Italia— con cubiertas protectoras de plástico. Esto permitirá aislarlos del aire húmedo y los aerosoles asociados. El calentamiento suave del aire en el espacio entre el plástico y el edificio, disminuirá aún más los riesgos de condensación.

5.1.3. Secado por medio de calentamiento

En la literatura se ha prestado alguna atención a los efectos adversos del calentamiento de monumentos. Se han discutido los requerimientos conflictivos de suministrar condiciones agradables para los fieles que asisten a las iglesias, y las condiciones adecuadas para la conservación de obras de arte (40). Debe entenderse que mientras el calentamiento periódico por tiempos cortos es más adecuado para pintura sobre tabla, escultura, muebles y órganos, que el calentamiento continuo (47), los cambios cíclicos en temperatura y las consecuentes alteraciones en la humedad relativa son perjudiciales para la pintura mural, los aplanados y la piedra en el interior del edificio. La única medida que puede recomendarse es no aplicar ningún calentamiento con excepción de alguno ocasional, de la estructura misma para prevenir condensaciones (31).

5.2.6. Limpieza química

Se informa que el método ya conocido de tratamiento de manchas causadas por sales metálicas por medio de complejos quelantes es lo suficientemente barato para la limpieza de exteriores de edificios (8). Una característica de estos complejos es que los grupos químicos involucrados atrapan al ión

metálico correspondiente de la sal y lo mantienen secuestrado. Los compuestos de quelantos complejos formados son por ello solubles en agua, en particular si se satisfacen cierto número de requerimientos, de los cuales el más importante es que el medio deba ser ya sea ligeramente ácido o alcalino. Para reforzar el significado de esto, debe mencionarse aquí que las reacciones quelantes, como reacción química implican el desplazamiento de iones hidrógeno de una molécula orgánica neutra, y que por ello la eficiencia de los agentes quelantes —los cuales son muy débilmente ácidos—, dependerá a su vez de sus constantes de disociación y del valor del pH de las soluciones comprendidas. Un medio extremadamente ácido bloquearía la disociación del reactivo orgánico y en consecuencia no ocurriría ninguna acción quelante.

La formulación de un limpiador de piedra efectivo en base a agentes quelantes, (en la práctica las sales sódicas del ácido etilen-diamino-tetraacético son las más comunmente empleadas), demanda que el valor del pH sea mantenido arriba de 7 y que la solución quelante se haga espesa con cargas adecuadas para producir una pasta. Los materiales capaces de producir un hinchamiento coloidal, mezclado con polvo fino de asbesto, agente quelante y agua, producen un tipo de limpiador conocido como pasta coloidal (papetas). Ésta es aplicada sobre la superficie de la piedra, se deja allí aproximadamente dos días, y después se desprende. Los contaminantes de la piedra, acumulados sobre la película coloidal durante el secado, son así removidos. De esta manera las superficies horizontales de piedra pueden limpiarse. No obstante, para superficies verticales, y especialmente labrados, se prefiere otra carga para la mezcla de limpieza. En este caso el agente quelante se mezcla con bentonita, para formar una pasta, la cual se aplica entonces sobre la superficie de la piedra, y una vez más se deja secar por alrededor de dos días. Después de esto la capa de pasta, junto con la suciedad que la ha penetrado, se elimina por medio de cepillado.

Varias publicaciones que discuten sistemática y críticamente todas las técnicas de limpieza, han salido a luz (1, 11, 14, 15) y pueden ser de gran utilidad si se consultan antes de aplicar un tratamiento de limpieza. El problema de limpieza de la piedra también se ha discutido en reuniones internacionales de expertos, y en sus memorias se han publicado indicaciones de cómo manejar estos problemas (22, 37).

5.3. Consolidación y protección

Se han editado repetidamente trabajos que discuten con detalle todas las técnicas de consolidación y protección, comprendiendo preservadores orgánicos e inorgánicos (2, 13, 22, 28, 37, 53, 58). Estos trabajos, útiles como fuentes de referencia no presentan nuevos enfoques, por esta razón, su contenido no se menciona aquí.

5.3.4. Ésteres de silicio

En una serie de trabajos Chvatal (8, 9) clarifica los mecanismos de solidificación de los preservadores de piedra a base de ésteres de silicio y hace algunas recomendaciones acerca de su uso. Los ésteres de silicio experimentan hidrólisis y polimerización, lo cual conduce a la formación de gel de sílice. La hidrólisis libera alcohol, mientras que son necesarios los catalizadores para que se inicie la polimerización. Dentro de estos catalizadores, el ácido fosfórico precipita al gel de sílice rápidamente; los ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico lo precipitan lentamente; los catalizadores alcalinos como los hidróxidos de sodio, potasio, y amonio lo precipitan de inmediato; las bases orgánicas tales como la trietanolamina y la morfolina precipitan al gel de sílice a una velocidad moderada. En consecuencia, si la precipitación del gel de sílice se completa mientras el alcohol liberado está aún presente, el precipitado se encogerá y después de la evaporación del alcohol se volverá quebradizo. Por otro lado, si el alcohol liberado se evapora antes de que el éster de silicio hidrolizado, por ejemplo silanol, haya fraguado por la polimerización, una cierta cantidad de silanol será transportada al frente de evaporación y se depositará allí como una costra que en consecuencia carecerá de algún mérito como consolidante de la piedra. Aún más, una característica negativa que pertenece a la selección del catalizador aparecerá, si para este propósito se seleccionan ácidos minerales. Por la reacción con la materia carbonácea omnipresente en la piedra, los ácidos liberan dióxido de carbono gaseoso que impedirá la penetración profunda del fluido consolidante. Esta reacción también neutralizará algo del ácido, por ejemplo, agotando hasta cierto grado el catalizador, y alargarán de esta manera, en forma innecesaria la polimerización del silanol.

Teniendo esto en mente, y sacando conclusiones de su propio trabajo experimental, Chvatal propone un número de consolidantes de piedra de dos componentes; uno de los componentes es el éster de silicio, y el otro contendrá un solvente y el catalizador, las formulaciones que parecen ser más prometedoras se enumeran a continuación:

60 partes en volumen de tetrametoxisilano

25 partes en volumen de alcohol etílico

15 partes en volumen de agua

0.1 por ciento de trietanolamina

50 partes en volumen de polisilicato de metilo

40 partes en volumen de acetona

11 Partes en volumen de ácido fórmico al 5 por ciento

50 partes en volumen de polisilicato de metilo

40 partes en volumen de acetona

11 partes en volumen de agua

0.2 por ciento de morfolina

Después de que los dos componentes se mezclan, el compuesto es aplicado de inmediato sobre la piedra preferiblemente en la noche, para retardar la evaporación del solvente y del agua.

La evaporación se retarda en forma más significativa por cubrir la superficie tratada con una hoja plástica.

5.3.5. Silicones

Los procedimientos convencionales empleados para hacer repelente al agua a los materiales pétreos por medio de silicones son el tema de un artículo (16) el cual describe coherentemente los variados aspectos de estos notables agentes hidrofóbicos. No obstante, el punto débil en el uso de los silicones, o sea la falla para producir una película continua, permanece aún sin cambio, por ejemplo, es fácil por el empleo de los silicones, el hacer repelente al agua una pieza de piedra, pero es bastante difícil obtener la notable repelencia al agua en mampostería que contuviera estos mismos fragmentos de piedra.

Esta deficiencia de los silicones puede evitarse si en vez de aplicar silicones alcalinos o polihidroxiloxano, como se acostumbra practicar ahora, se emplea un alquil éster de silicio, por ejemplo, metiltrietoxisilano, para suministrar la repelencia al agua. Por medio del uso de un catalizador alcalino (Hidróxido de potasio), este tipo de éster de silicio polimeriza y solidifica en los poros de la piedra, y puesto que posee únicamente dos o tres grupos hidrolizables, el gel de sílice depositado después de la polimerización, es altamente hidrofóbico, mientras que la película formada dentro y sobre la superficie de la piedra, excede grandemente el espesor de la película de silicón, y por ello, hace continua la repelencia al agua, que está mejor distribuida y es más durable (8). La formulación práctica para el tratamiento hidrofóbico de la piedra, es una mezcla que contiene (en partes por volumen) 100 de metiltrietoxisilano, 70 de alcohol etílico, 15 a 20 de agua y de 0.05 a 1.0 por ciento en peso (calculado en referencia al contenido de éster de silicio) de hidróxido de potasio, a la temperatura ambiente, la cantidad de catalizador determina la velocidad de deposición y precipitación del gel de sílice.

Por ciento en peso de KOH
agregado, con referencia
al éster de silicio

	2	1	0.5	0.25	0.1	0.05
Tiempo de precipitación en horas, del gel de sílice a 20 °C	20'	40'	1	1 1/2	6	15

Igual que con los silicones, el tratamiento hidrofugante con ésteres de silicio hace la piedra igualmente permeable a los gases.

BIBLIOGRAFÍA SUPLEMENTO 1975

REFERENCES

1. ANON: *Cleaning External Surfaces of Buildings*, "Building Research Station Digest", Núm. 113, January 1970.
2. ANON: *Epoxy Resins save Venice Church*, "Corrosion Prevention and Control", 21, 5 (1974): 12-13.
3. BOEKWIJT, W. O.: *Water Content of Walls in San Sebastiano Cathedral in Venice*, "Report TNO B-70-174", International Centre for the Preservation and the Restoration of Cultural Property, Rome, 1969.
4. BOEKWIJT, W. O. and VOS, B. H.: *Measuring Method for Determining Moisture Content and Moisture Distribution in Monuments*, "Studies in Conservation", 15 (1970).
5. BOROBUDUR: "Studies in Conservation", 18, 3 (1973), 101-158. Special issue on the Conservation of Borobudur Temple, Indonesia.
6. BULTINCK, G.: *De conservatie van ruïnes in ongebakken klei. Een samenvattend overzicht*, "Bull. Inst. roy. Patr. art.", Brussels, XIII (1971-72), 131-138.
7. CENTRE DE RECHERCHES ET D'ETUDES OcéANOGRAPHIQUES: *Premier colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre*, La Rochelle, 11-16 septembre 1972, organisé para le Centre de recherches et d'études océanographiques, 1 Quai Branly, 75007 Paris, Imprimeries réunies de Chambéry, Chambéry, 237 pp.
8. CHVATAL, TH.: *Moderne Chemie hilft den Bauwerken*, "Maltechnik/Restauro", 2 (1972): 131-138.

9. CHVATAL, TH.: *Die Festigung von Stein*, "Arbeitsblätter für Restauratoren", Heft 1 (1974): 40-51.
10. CIB/RILEM *2nd International Symposium on Moisture Problems in Buildings*, 10-12 September 1974. Preprints, Rotterdam 1974, 2 Vols.
11. CLARKE, B. L.: *Some Recent Research on Cleaning External Masonry in Great Britain*, "Building Research Station", IN 104/71, September 1971.
12. COUPER, R.: *Factors Affecting the Production of Surface Runoff from Wind-driven Rain*, "CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings", Paper 1.1.1, 10 pp.
13. GAURI, L. K.: *Efficiency of Epoxy Resins as Stone Preservatives*, "Studies in Conservation", 19, 2 (1974): 100-101.
14. G. G.: *Les problemes du nettoyage des façades*, "Peintures-Pigments-Vernis", Vol. 49, Núm. 3 (1973): 175-177; Núm. 4 (1973): 233-235.
15. G. G.: *Quelques aspects du lessivage des surfaces avant peinture*, "Peintures-Pigments-Vernis", vol. 49, Núm. 5 (1973): 297-300; Núm. 6 (1973): 366-369.
16. G. G.: *L'hydrofugation et la protection des murs en maçonnerie*, "Peintures-Pigments-Vernis", vol. 49, Núm. 2 (1973): 103-105.
17. GUIDETTI GIAN PIETRO: *Cause di degradazione delle pietre all'aperto e metodi di intervento*, in: "Vita e decadenza delle opere d'arte", Atti dell'Accademia delle Scienze di Ferrara, Vol. 49 (1971-72), pp. 37-59.
18. HYVERT, G.: *Les altérations biogéochimiques des arkoses et gres des monuments Khmers*, Thèse, Université de Paris 1969, 226 pp.
19. HYVERT, G.: *Borobudur, Les bas-reliefs. Matériaux - facteurs responsables des dégradations - programme de conservation*, "Studies in Conservation", 18 (1973): 131-155.
20. ICOM/ICOMOS, International Centre for Conservation: *Information Sheet*, No. 3, January 15, 1974. Available from the International Centre for Conservation, 13, Via di S. Michele, Rome 00153, Italy.
21. ICOMOS: *Conference on the Problems of Moisture in Historic Monuments*, Roma 11-14.X.1967, Paris 1969, 332 pp.

22. IIC, *Conservation of Stone and Wooden Objects*, Contributions to the New York Conference 7-13 June 1970, published by the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, second ed., London 1971, vol. 1.
23. ISKANDER, Z.: *Causes and Effects of Humidity in Monuments in Desert Regions*, "Conference on the Problems of Moisture in Historic Monuments", Roma, 11-14.X.1967, ICOMOS, Paris 1969, pp. 85-92.
24. KAESCHE, H.: *Die Korrosion der Metalle*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1966.
25. KEULEN, J. van: *Water- en zoutschade aan monumenten*, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, "IBBC, Report No. BI-71-48", August 1971, 16 pp.
26. KURDENKOV, L. I.: *The Effectiveness and Physical Nature of the Electro-osmotic Drying of Foundations and Walls*. In: USSR-Ministry of Culture, Conference 13-14 May 1968: *Moisture Control in the Masonry of Historic Buildings*, pp. 20-26.
27. LACY, R. E.: *A Note on the Climate Inside a Medieval Chapel*, "Studies in Conservation", 15 (1970): 65-80.
28. LEWIN, S. Z. and N. S. BAER: *Rationale of the Barium Hydroxide - Urea Treatment of Decayed Stone*, "Studies in Conservation", 19, 1 (1974): 24-35.
29. MALESANI, P. P. and S. A. VANNUCCI: *Decay of Pietra Serena and Pietraforte, Florentine Building Stones: Petrographic Observations*, "Studies in Conservation", 19, 1 (1974): 36-50.
30. MAMILLAN, M. and A. BOINEAU: *Etude de l'assèchement des murs soumis à des remontées capillaires*, CIB/RILEM 2nd Symposium on Moisture Problems in Buildings, Rotterdam 1974, paper 2.2.2., 16 pp.
31. MASSARI, G.: *Problemi di conservazione all'interno di ambienti monumentali: aspetti termotecnici*, in: "Problemi di conservazione", edited by G. Urbani. Editrice Compositori, Bologna, s.f. (1973), pp. 329-337.
32. MORARU, D.: *Les méthodes électriques et électrocinetiques d'assèchement*, in: "ICOMOS Conference on the Problems of Moisture in Historic Monuments", Roma 11-14.X.1967, pp. 99-202.
33. NIELSEN, P. V.: *Moisture Transfer in Air Conditioned*

- Rooms and Cold Stores*, "CIB/RILEM 2nd Symposium on Moisture Problems in Buildings", Rotterdam 1974, paper 1.2.1., 9 pp.
34. RIEDERER, J.: *Die Wirkungslosigkeit von Luftverunreinigungen beim Steinzerfall*, "Staub-Reinhalt. Luft", 33, Nr. 1 (1973), 15-19.
 35. ROSSETTI, V. A. and M. T. LAURENZI: *Distribuzione degli ossalati di calcio $\text{CaC}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25\text{H}_2\text{O}$ nelle alterazioni delle pietre di monumenti esposti all'aperto*, in: "Problemi di conservazioni", edited by G. Urbani. Editrice Compositori, Bologna, s.f. (1973), pp. 375-376.
 36. ROSSI MANARESI, R. and E. RICCÒMINI, (Ed.): *La conservazione delle sculture all'aperto*, Edizione Alfa, Bologna 1971, 231 pp.
 37. ROSSI MANARESI, R. and G. TORROCA, (Ed.): *the Treatment of Stone*, Proceedings of the Meeting of the Joint Committee for the Conservation of Stone (ICOM, ICOMOS, International Centre for Conservation), Bologna, October 1-3, 1971, Edizione Alfa, Bologna 1972.
 38. SCHAAD, W. and R. HAEFELI: *Elektrokinetische Erscheinungen und ihre Anwendung in der Bodenmechanik*, Schweizerische Bauzeitung", 65 (1947), 216, 217, 223-226, 235-238.
 39. SCHELLING, G.: *Zur Bekämpfung der aufsteigenden Mauerfeuchtigkeit an Gebäuden*, "Maltechnik/Restauro" (1973), 220-227.
 40. SCHOTES, P. et al.: *Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5-27.5.1972 in Mainz*, "Das Münster", XXV, Heft 4, XXVI, Heft 1/2, München 1973 (off-print).
 41. SERRA, M. and G. STARACE: *Un metodo radiochimico per lo studio della ossidazione della anidride solforosa assorbita su pietre calcaree*, in: "Problemi di Conservazione", edited by G. Urbani. Editrice Compositori, Bologna 1973, pp. 387-393.
 42. Soprintendenza alle Gallerie di Bologna, *Sculture all'aperto*, Edizione Alfa, Bologna 1969, 94 pp.
 43. SPENGLER, G.: *Die Schwefeloxyde in Rauchgasen und in der Atmosphäre*, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1965.

44. STAMBOLOV, T. and VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J.: *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A preliminary Review*, ICOM Committee for Museum Laboratories, Brussels 1967, 77 pp.
45. STAMBOLOV, T. and VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J.: *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A Supplementary Literature Review*, ICOM Committee for Conservation, Amsterdam 1969, paper 69/35.
46. STAMBOLOV, T. and VAN ASPEREN DE BOER, J. R. J.: *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A literature review*, International Centre for Conservation, Rome 1972, 70 pp.
47. STEVENS, W. C.: *Rates of Change in the Dimensions and Moisture Contents of Wooden Panels resulting from Changes in the Ambient Air Conditions*, "Studies in Conservation", 6 (1961), 21-25.
48. THOMSON, G. (Ed.): *Contributions to the ICC London Conference on Museum Climatology* (1967), London 1968.
49. THOMSON, G. and R.: WHITE, *The pH of Rain and the Destruction of Alkaline Stone*, "Studies in Conservation", 19, 3 (1974), 190-191.
50. TORRACA, G.: *L'attuale stato delle conoscenze sulle alterazioni delle pietre: cause e metodi di trattamento*, in: "Sculture all'aperto", Edizione Alfa, Bologna 1969, pp. 3-30.
51. TORRACA, G.: *An International Project for the Study of Mud-brick Preservation*, in: Preprints New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects, IIC, London 1971, vol. 1, pp. 47-57.
52. UNESCO: *Rapporto su Venezia*, Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, Milano, 1969, 348 pp.
53. URBANI, G. (Ed.): *Problemi di Conservazione*, Editrice Compositori, Bologna 1974.
54. URBANI, G.: *Applicazioni della "termovisione" nel campo della conservazione delle opere d'arte*, in: "Problemi di Conservazione", edited by G. Urbani, Editrice Compositori, Bologna, s.f. (1973), pp. 317-327.
55. USSR – Ministry of Culture, Methodological Council

- on the Protection of Cultural Property, Conference 13-14 May 1968: *Moisture Control in the Masonry of Historic Buildings*. Translated from the Russian; typescript available from the International Centre for Conservation, Rome.
56. VOS, B. H.: *Sunction of Ground-water*, "Studies in Conservation", 16 (1971), 129-144.
57. VOS, B. H. and TAMMES, E.: *Ground-water in Walls Monuments*, typescript 68 pp. (1973). Available from the International Centre for Conservations, 13, Via di S. Michele, Rome, Italy.
58. WINKLER, E. M.: *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*, Springer-Verlag, Wien-New York 1973.

SUPLEMENTO DE 1978.

Presentado al Comité para Conservación del ICOM

Quinta reunión trianual

Zagreb, 1978.

1. INTRODUCCIÓN

La presente revisión de la literatura de mayor importancia publicada desde principios de 1975 sigue otra vez la estructura de los informes presentados a este Comité.* Es también selectiva y pretende llamar la atención hacia los desarrollos recientes más importantes.

La versión inglesa de esta reseña fue publicada en 1972 por el Centro Internacional para la Conservación; una segunda edición aumentada se publicó en 1976, incluyendo el suplemento de 1975 (38). Una traducción al holandés, con ilustraciones, se publicó en 1978 (39).

El creciente interés por el problema del deterioro y tratamiento de piedra se ha manifestado en cierto número de conferencias internacionales. El tamaño de las memorias publicadas ha crecido también considerablemente. Un segundo simposium en La Rochelle fue efectuado en 1975 con memorias más bien modestas: 18 trabajos (2). Mientras que aquellas del simposium de Bolonia de 1975 contienen 53 trabajos (32), en comparación con los 16 del simposium de Bolonia de 1972. El simposium de Atenas de 1976 produjo alrededor de

* Se refiere al Comité para Conservación del ICOM.

40 trabajos (3). Los resultados de la conferencia de París en junio de 1978 no pudieron ser incluidos en esta revisión; sin embargo parecen confirmar esta tendencia: 74 trabajos (8).

Romanovsky ha criticado esta producción más bien profílica de trabajos y ha sugerido que debe haber una sola conferencia internacional sobre conservación de piedra cada cuatro años, soportada por reuniones restringidas sobre temas específicos (31). La concentración de trabajos en memorias de conferencias es probablemente la verdadera razón por la cual solamente unos cuantos artículos de interés pueden encontrarse en las revistas más comunes.

El enfoque multidisciplinario parece encontrar su mejor solución en la formulación de programas de conservación para monumentos en proyectos apoyados internacionalmente, tales como la Acrópolis de Atenas (3, 257 pp. en adelante). No obstante, también se pueden observar progresos a niveles nacionales (1). Por otro lado, la mejor conservación no es asegurada automáticamente por la intervención de un mayor número de investigadores y la producción de un mayor número de trabajos. Es por ello quizás muy significativo que el notable trabajo de Schaffer "Weathering of Natural Building Stone" de 1932, haya sido reimpresso en 1972 con únicamente cambios mínimos (35).

Como en suplementos previos, la numeración decimal de los encabezados se refiere a los mismos números que se utilizaron en las revisiones anteriores (38).

2.2. *Formación de costra*

La función de las sales solubles como participantes en el desarrollo de costras y el rompimiento de la superficie de la piedra y materiales similares, causados por estas sales, son el tema de muchos estudios detallados. En la mayoría de los casos existe preocupación por el comportamiento de las sales hidratadas, principalmente los sulfatos, así como por su origen, el cual, parece ahora comunmente aceptado, procede ya sea del agua del suelo enriquecida con sulfatos o de los contaminantes atmosféricos de contenido mineral. Entre estos últimos, el bióxido de azufre gaseoso ha recibido la máxima atención (12, 13, 18, 37). El debate en el cual se han enfrascado estos autores se refiere a los mecanismos de la

formación de rupturas en las costras, como asimismo sobre la piedra subyacente y también sobre otros materiales minerales porosos. Algunos autores aseguran que el daño es producto de la presión de hidratación inherente a las sales capaces de cristalizar reteniendo un número de moléculas de agua, y parecen haber diseñado sus ensayos de acuerdo a su necesidad de obtener resultados que confirmen este punto de vista. (5— Ver la afirmación de S. Z. Lewin en el apéndice de discusión de este trabajo.) Por el contrario, otros (5) alegan que es al volumen total de las sales depositadas sobre la superficie de la piedra que se debe la degradación de la misma. Las medidas citadas por estos autores, suministran evidencia de que un volumen dado de cloruro de sodio, produce igual daño que el causado por el mismo volumen de sulfato de sodio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) o de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

De allí la explicación de que la causa del daño no debe buscarse en el fenómeno hidratación-deshidratación sino en el proceso de cristalización y recristalización de las sales, en el resultante transporte de masa y en la migración de material dentro de la piedra. El punto de vista de Lewin (5) parece estar de acuerdo con los hallazgos de Pauly (30), en relación con el efecto corrosivo de los cloruros; en su base experimental, Pauly (30) asume que el cloruro de sodio (NaCl) favorece la disolución de las sales que ya se encuentran depositadas, tales como sulfato de sodio hidratado y yeso, por medio de una actividad intersticial todavía no clarificada que se lleva a cabo durante la etapa de cristalización-recristalización. Esto se ilustra con la observación de que la costra de yeso se agrieta y desprende más rápidamente en conformidad con el aumento del contenido de cloruro de sodio. A este respecto, es también importante la observación adicional de que la deposición de yeso tiende, por un aumento en el contenido de cloruro de sodio en él, a redisolverse ligeramente. Más aún, el cloruro de sodio perturba la temperatura de transición que gobierna el sistema yeso-anhidrita. Si el carbonato de sodio está presente, reaccionará con el yeso sólido y esto conducirá a la formación de depósitos de carbonato de calcio y sulfato de sodio. Por ello, de acuerdo con Pauly (30) la metamorfosis cristalina (yeso-piedra calcárea-yeso) que tiene lugar vía la interacción entre cloruro de sodio, carbonato de sodio y sulfato de sodio, debe reconocerse como el factor decisivo

que cuenta para el deterioro del tipo de piedra por ejemplo la caliza, la cual fue el sujeto de su estudio.

3.2.2. *Transporte de agua líquida*

Pauly (28, 29, 30) hizo estudios extensivos sobre la influencia de la lluvia en el deterioro de monumentos y aplicó consideraciones teóricas a iglesias reales en La Rochelle y París.

3.6. *Determinación de humedad*

En algunos casos se ha informado de mediciones del microclima alrededor de monumentos y estatuas. Fondelli y colaboradores (14) describen un proyecto para investigar el deterioro de estatuas en los jardines Boboli de Florencia, al medir, por ejemplo, la distribución del viento y la lluvia, la humedad superficial y del aire, la composición química de la lluvia y controlar fotogramétricamente la superficie de las estatuas.

Alessandrini y colaboradores (4), tomaron en consideración las condiciones climáticas de Milán, desde principios del siglo XIX hasta la fecha, al estudiar el deterioro del mármol utilizado en la catedral de Milán; no obstante, se carecía de datos sobre el microclima alrededor de la catedral.

Boekwijt (6) estudió el efecto de la calefacción sobre el contenido de humedad en los aplanados de siete iglesias holandesas protestantes monumentales. Se encontró que el calentamiento continuo hasta la temperatura ambiente causa considerable desecamiento de los aplanados. Se recomienda mantener durante el invierno un calentamiento continuo de unos cuantos grados únicamente, y calentar al edificio para las funciones eclesiásticas tan rápido como sea posible.

4.3. *Erosión del viento*

Pauly (28, 29, 30) ha estudiado los fenómenos de intemperismo caracterizados por pulverización localizada (*maladie alveolaire*). Se intenta, establecer en cierto número de monumentos en Francia, una correlación entre la composición

de la piedra atacada, el impacto local de la lluvia y la turbulencia del viento.

4.5. *Deterioro por agentes biológicos*

Durante el simposium de Bolonia de 1975, se presentaron 9 trabajos relacionados con la biodeterioración, entre ellos, un estudio de los procesos que dañaban los templos de Karnak en Egipto (11).

4.6. *Calidad de la piedra de construcción*

Mamillan ha informado de la aplicación de un número de métodos de mediciones físicas para evaluar el deterioro de la piedra en monumentos propuestos anteriormente por el (23). Discute especialmente la aplicación de medidas de propagación del sonido, hechas in situ, para atestiguar la cohesión mecánica de la piedra.

5.2.6. *Limpieza química*

En un artículo claro provisto con un apéndice sobre fórmulas para limpieza de piedra Lewin y Rock (20) elucidan las reglas que controlan la limpieza de piedra con reactivos. Y aunque ellos están en primera instancia preocupados con la remoción de manchas de hierro, los autores también ofrecen varias conclusiones importantes que son significativas para la limpieza de piedra calcárea en general. Por ejemplo, para que los limpiadores de manchas de hierro que contienen fosfatos sean efectivos, deben ser ácidos. Así, a causa de esta misma acidez, ellos atacarán y grabarán las piedras calcáreas, mientras que de hecho ellas son las piedras (mármol, calizas) que más frecuentemente presentan decoloración por hierro. En forma similar, los limpiadores que contienen oxalatos, convertirán por contacto prolongado, la superficie de la piedra calcárea en oxalato de calcio monohidratado: éste tenderá a separarse de la piedra subyacente. Los limpiadores que contienen fluoruros también causarán daño debido a su reacción ácida, que es requerida para tal uso. En la zona de contacto

ellos transforman la piedra calcárea en una costra de fluoruro de calcio la cual es porosa y tiene tendencia a astillarse. No obstante, este efecto lateral puede ser controlado por medio de la regulación del tiempo de contacto (9). El limpiador de fluoruros no es, para este fin, aplicado como un líquido, sino como una pasta, por ejemplo, ácido fluorhídrico y una carga adecuada. Para mejorar el funcionamiento de este limpiador como un removedor de costras indeseables sobre piedras calcareas (generalmente una costra porosa que consiste de suciedad y yeso mantenidas juntas por eflorecencias de carbonato de calcio), se agrega también cierta cantidad de ácido fórmico a causa de la propiedad que tiene de disolver con rapidez al carbonato de calcio (40). Una fórmula para la limpieza óptima de costras sobre piedra calcárea debe por ello estar de acuerdo con las especificaciones o guías anteriores. Chvatal (9) propone una pasta que se prepara mezclando del 5 al 10% de ácido fluorhídrico con el 5 al 10% de ácido fórmico y una carga (resistente al fluoruro). Chvatal (9), más aún, hace una elaboración sobre las propiedades limpiadoras de la sal de sodio del ácido etilendiaminotetra-acético como removedor de costras que contienen predominantemente yeso. Ya en contexto él pone en uso su descubrimiento de que este mismo reactivo quelante disuelve cuatro veces más yeso que carbonato de calcio, y entonces procede a preparar una pasta alcalina (PH12,6) que contiene:

- Solución acuosa de la sal de sodio del ácido etilendiaminotetra-acético al 30%.
- Una carga con una gran superficie interna, por ejemplo attalpulgita.
- Un formador de película, tal como una dispersión de acetato de polivinilo.
- Un detergente.

De acuerdo con el grado de contaminación, Chvatal (9), recomienda aplicar sobre la superficie de la piedra de 3 a 6 kg por metro cuadrado de la pasta limpiadora y la cubre con un laminado plástico a fin de retardar un secado prematuro de la pasta. La pasta puede ser dejada por varias semanas sobre la piedra, de manera que pueda penetrar la costra sin que esto signifique, no obstante, un daño para la piedra. Las tiras del laminado plástico, con la pasta adherida a ellas, son entonces retiradas, y, si se desea, se sigue con un tratamiento de conservación. Una cierta ampliación del empleo de esta pasta, se

obtiene por la adición de algun fungicida ya que esto capacita a la pasta para remover simultáneamente algas y líquenes. Hoke (19) en forma similar informa de pruebas exitosas con limpiadores quelantes.

Además de las costras de yeso, los agentes quelantes removerán muy rápidamente y efectivamente manchas de hierro, siempre y cuando ellos sean empleados correctamente de acuerdo con su química. El conocimiento, por ejemplo, de que un agente quelante que ya ha secuestrado a hierro bivalente (Fe^{++}) disolverá rápida y fácilmente un depósito de hierro trivalente (Fe^{+++}), y el que una mancha de hierro sea exactamente eso, es usado para componer un líquido que removerá de la porcelana a manchas de hierro muy obstinadas, en menos de dos minutos. El removedor de manchas está formulado como sigue (16):

7.00 g de $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – ortofosfato de sodio (necesario para producir un pH entre 1.5 y 4.5, requerimiento como condiciones de operación).

71.60 g de H_2O .

24.30 g de Na_5DTPA – Sal de sodio del ácido dietilen triamino penta acético (agente quelante).

2.80 g de H_2SO_4 Conc. (contribuye, como lo hace el ortofosfato de sodio, a fijar el valor del pH en el rango de 1.5 a 4.5).

36.00 g de metanol –opcional– (solvente de grasa y sustancias similares) – 0.75 g de sal de sodio de dodecil dibenzen sulfonato –opcional– (detergente).

0.75 g de O-fenilfenol –opcional– (desinfectante).

También se ha formulado un removedor de manchas de hierro en forma de polvo.

30.00 g de NaHSO_4 –bisulfato de sodio.

18.82 g de NaHCO_3 –bicarbonato de sodio (necesario para producir gas por efervescencia que dislocará la mancha que contiene hierro).

15.00 g de $\text{Na}_2\text{H}_2\text{EDTA}$ – sal de sodio del ácido etilendiaminotetra-acético (agente quelante).

10.98 g de $\text{NaHSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – mezcla de sales de bisulfato de sodio y sulfato ferroso.

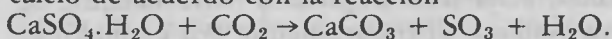
2.40 g de O-fenilfenol.

0.13 g de sal de sodio de dodecil oxibenzen disulfonato.

El polvo se agrega a tres litros de agua en la cual se sumerge el objeto al ser limpiado (porcelana).

5.3. Consolidación y protección

Un nuevo enfoque para tratar las superficies de piedras calcáreas cubiertas con incrustaciones de yeso es proporcionado por Skoulikidis *et al.* (36). Ellos han diseñado un tratamiento que implica la conversión del yeso a carbonato de calcio de acuerdo con la reacción



En relación con este procedimiento, lo siguiente es de interés.

- La reacción tiene lugar (dentro de una autoclave –ya que únicamente estatuas, ornamentos, etc. han sido manejados de esta manera) a 25 °C y con una presión del gas de dióxido de carbono de 1 atm.

- La reacción es rápida y fácil de efectuar si en el yeso se encuentra presente una pequeña cantidad de carbonato de calcio (alrededor de 0.1%). Éste sirve como núcleo alrededor del cual se forman los cristales de calcita y de allí proceden a crecer.

- Existe evidencia de que los cristales de calcita siguen epitaxialmente a los cristales del mármol sobre el cual el yeso se había acumulado previamente.

- Por medio de esta técnica la superficie del mármol de estatuas atacadas por yeso puede ser regenerada sin pérdida de contorno.

- Por el empleo de este método, piezas de mármol unidas entre sí por una pasta de yeso que contiene 5% en peso de carbonato de calcio pueden ser unidas, también fisuras, grietas y cosas parecidas, pueden en esta forma ser llenadas y restauradas.

- Las copias de yeso pueden ser transformadas superficialmente y quedar recubiertas con carbonato de calcio, y en esta forma, hacerse más resistentes a la exposición a la intemperie.

5.3.4. Ésteres de silicio

Aunque ningún nuevo producto específico parece haber sido desarrollado durante el periodo bajo revisión, varias publicaciones divagan sobre este tema, presumiblemente con la intención de aconsejar a los usuarios cómo y en cuáles casos

los ésteres de silicio deben ser usados con la espectación de obtener buenos resultados.

Se han publicado listas de los ésteres de silicio obtenibles, y se ha discutido extensivamente en la literatura las características críticas de muchos de ellos, el modo de aplicación y muchos otros aspectos (7, 10, 19, 21, 22, 41, 42).

5.3.7. *Polímeros sintéticos*

Las pruebas y los logros informados comprenden a productos ya conocidos. Las resinas de silicón (24, 25, 33, 34) los acrílicos (25), un copolímero siliconato acrílico (33), las resinas epóxicas (15, 33), han sido investigados a fondo en relación a su aplicabilidad como consolidantes para piedra intemperizada. Su comportamiento como tal fue también evaluado. Un método mejorado para impregnación de escultura en piedra deteriorada con resina de silicón fue descrito en forma muy elaborada por Hempel (17), mientras que en forma similar, la consolidación de tumbas de arenisca con resina de silicón, fue informada por Nonfarmale (26). Estos experimentos pueden ser muy instructivos para restauradores que se enfrenten a problemas similares.

Finalmente merece ser mencionada, la ingeniosidad de Oddy *et al.* (27) en la impregnación de esculturas de calizas con polietilenglicol, con la finalidad de hacerlas insensibles a los efectos de la humedad durante su exhibición en salas interiores, así como también para facilitar las limpiezas rutinarias repetidas de la superficie.

BIBLIOGRAFÍA SUPLEMENTO 1978

References

1. *Les Monuments Historiques de France*. La Maladie de la Pierre, numéro hors série. Editions Caisse Nationale des Monuments Historiques, Paris 1975.
2. Colloque sur le mode d'action des produits et techniques de protection des pierres en oeuvre. La Rochelle, 29 September-3 October 1975. *Lithoclastian*, no spécial hors série 1976, 117 pp.
3. Proceedings of the 2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones. Athens, 27 September-1 October 1976, 363 pp., ill.
4. ALESSANDRINI, G., R. PERUZZI, and L. DI CAPITANI, Investigations on the decay of Candoglia marble used in the Milan Duomo. *Bologna 1975 Symposium Proceedings*,: 137-167.
5. ARNOLD, A., Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 27-36.
6. BOEKWIJF, W. O., The effect of heating on the surface moisture content of plaster in churches. *Lithoclastia*, 1976, úm. 1: 9-22.
7. BOSCH, Use of silicones in conservation of monuments. *1er Colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre*. La Rochelle 1972.
8. Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics. *Deterioration and Protection of Stone Monuments. Experimental Methods Recommended*. International Symposium, Paris, June 5-9, 1978.

9. CHVATAL, Th., Chemische Steinreinigung, *Steinmetz und Bildhauer*, nr. 8 (1976): 502-510.
10. CHVATAL, Th., Zum Hydrophobieren von Steinmaterial, *Arbeitsblätter für Restauratoren*, Heft 1 (1976): 64-82.
11. CURRI, S. B. and A. SPALENI, Some aspects of the growth of chemolitotrophic micro-organisms on the Karnak temples. *Bologna 1975 Symposium Proceedings*: 267-279.
12. EFES, Y. and S., LUCKAT, Relations between corrosion of sandstones and uptake rates of air pollutants at the Cologne Cathedral. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 193-200.
13. FASSINA, V., L. LAZZARINI, and G., BISCONTIN, Effects of atmospheric pollutants on the composition of black crusts deposited on Venetian marbles and stones. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 201-211.
14. FONDELLI, M., P. FREDIANI, P. G. MALESANI, C. MANGANELLI del Fa, F. PIACENTI, P. TIANO, and S., VANNUCCI, A methodological approach to the study of the deterioration of the statues in the Boboli garden (Pitti Palace – Florence). *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 225-232.
15. GAURI, K. L., J. A. GWINN, and R. K., POPLI, Performance criteria for stone treatment. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 143-152.
16. GOODENOUGH, R. D., Method and Composition for removing iron stains from porcelain. *U. S. Patent* 3, 721, 629 (March 20, 1973).
17. HEMPEL, K., An improved method for vacuum consolidation of decayed stone sculpture. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 163-166.
18. HOFFMANN, D., P. SCHIMMELWITZ, and H. ROOSS, Interaction of sulfur dioxide with lime plasters. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 37-42.
19. HOKE, E., Microprobe investigations on incrustated as

- well as cleaned marble specimens, *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 119-126.
20. LEWIN, S. Z. and E. J., ROCK, Chemical considerations in the cleaning of stone and masonry. *Bologna 1975 Symposium Proceedings*: 343-368.
 21. LUCKAT, S., Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes. III. *Kölner Domblatt*, 40 (1975): 75-108.
 22. LUCKAT, S., Der Kölner-Dom – Steinschäden, Umweltbelastung und Immissionsschutz. *Nachr. Chem. Techn.*, 24, Nr. 13 (1976): 283-285.
 23. MAMILLAN, M., Méthodes d'essais physiques pour évaluer l'altération des pierres des monuments. *Bologna 1975 Symposium Proceeding*, 595-634.
 24. MONCRIEFF, A., The treatment of deteriorating stone with silicone resins: interim report. *Studies in Conservation*, 21 (1976): 179-191.
 25. MONCRIEFF, A., The treatment of deteriorating stone with synthetic resins. A further report. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 167-170.
 26. NONFARMALE, O., A method of consolidation and restoration for decayed sandstones. *Bologna 1975 Symposium Proceeding*: 401-410.
 27. ODDY, W. A., S. M. BLACKSHAW, and S. BAKER. The consolidation of limestone sculptures with polyethylene glycol for indoor display. *Bologna 1975 Symposium Proceedings*: 485-498.
 28. PAULY, J. P., Maladie alvéolaire. Conditions de formation et d'évolution. *Bologna 1975 Symposium Proceedings*: 55-80.
 29. PAULY, J. P., Etude sommaire du bilan hydrologique d'un mur. *Lithoclastia*, 1975, núm 1: 53-82.
 30. PAULY, J. P., Le rôle des chlorures dans les maladies alvéolaire et desquamente. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 79-92.
 31. ROMANOVSKY, V., Rapport général. *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*. Athens, 1976: 355-357.
 32. ROSSI-MANARESI, R. (Ed.), *The Conservation of Stone*,

- I, *Proceedings of the International Symposium, Bologna, June 19-21, 1975. Centro per la Conservazione delle Sculture all'aperto, Bologna 1976, 789 pp., ill.*
33. ROSSI-MANARESI, R., *Treatment for sandstone consolidation, Bologna 1975 Symposium Proceedings: 547-572.*
 34. ROSSI-MANARESI, R., *Causes of decay and conservation treatments of the tuff of Castel dell'Ovo in Naples. 2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones. Athens, 1976, 233-248.*
 35. SCHAFFER, R. J., *The Weathering of Natural Building Stones. Building Research Establishment, Garston, 1972 (Facsimile Reprint of the 1932 edition).*
 36. SKOULIKIDIS, Th., P. PAPA-KONSTANTINOU, and D. CHARALAMBOUS, *Restauration d'anciens objets d'art en marbre détériorés: inversion de la sulfatation - utilisation de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et Transformation en CaCO_3 . 2nd International Symposium on the Deterioration of building Stones. Athens, 1976: 171-178.*
 37. SKOULIKIDIS, TH., D. CHARALAMBOUS, and P. PAPA-KONSTANTINOU, *Attaque atmosphérique (goujons en acier) et mesures à prendre. 2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones. Athens, 1976: 327-342.*
 38. STAMBOLOV, T. and Van ASPEREN DE BOER, J. R. J., *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A Review of the Literature. International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property, Rome 1976, 86 pp.*
 39. STAMBOLOV, T. and Van ASPEREN DE BOER, J. R. J., *Conservering van poreuze materialen in monumenten. Bedrijfschap voor het Stukadoors-, Terrazzo-, en het Steengaasstillersbedrijf, Den Haag 1978, 89 pp. 18 ill.*
 40. TREUTER, S. A., *Schweizerische Patentschrift 428051 (14.7.1961), Verwendung von Ameisensäure als Entkalkungs- und Reinigungsmittel.*
 41. WEBER, H., *Stone renovation and consolidation using silicones and silicic esters. Bologna 1975 Symposium Proceedings, 375-386.*
 42. WEBER, H., *Stellungnahme zur "Steinkonservierung", Maltechnik/Restauro, 84 (1978), 65.*

ÍNDICE

PRÓLOGO DEL TRADUCTOR	5
1. INTRODUCCIÓN	9
2. INTEMPERISMO POR HUMEDAD Y SALES	
2.1. Generalidades	10
2.2. Formación de costra	13
2.3. Intemperismo de diversos materiales de construc- ción	15
2.3.1. Rocas sedimentarias	16
2.3.2. Rocas ígneas	18
2.3.3. Los ladrillos	18
2.3.4. Morteros y argamasas	19
3. HUMEDAD EN MATERIALES POROSOS DE CONSTRUCCIÓN	
3.1. Introducción	21
3.2. Aspectos hídricos	22
3.2.1. Difusión del vapor de agua	24
3.2.2. Transferencia de agua líquida	25
3.2.2.1. Transferencia horizontal de agua	25
3.2.2.2. Penetración de la lluvia	26
3.2.2.3. Transferencia vertical del agua	28
3.3. Fenómenos de secado en materiales porosos	30
3.4. Aspectos térmicos	31
3.5. Condensación (41, 92, 288, 309)	33
3.5.1. Condensación superficial	33
3.5.2. Condensación intersticial	34
3.6. Determinación de humedad	35
4. OTROS FENÓMENOS DE DETERIORO	
4.1. Insolación y daño por fuego	36

4.2.	Daño por congelación	37
4.3.	Erosión por viento	38
4.4.	Contaminación por polvo	39
4.5.	Deterioro producido por agentes biológicos	40
4.5.1.	Árboles y plantas	40
4.5.2.	Algas y líquenes (42)	40
4.5.3.	Hongos y microorganismos	41
4.5.4.	Animales	42
4.6.	Calidad de la piedra de construcción	42
4.7.	Corrosión metálica.	43
4.8.	Agrietamiento (48).	44
4.9.	Explosión sónica.	44
5.	CONSERVACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
5.1.	Medidas curativas contra la humedad	44
5.1.1.	Remedios contra la elevación del agua, del suelo y filtraciones	44
5.1.1.1.	Métodos de impermeabilización	46
5.1.1.2.	Reducción de la sección transversal de la pared	46
5.1.1.3.	Métodos que usan repelentes de humedad verticalmente	47
5.1.1.4.	Drenado	47
5.1.1.5.	Electrósmosis	48
5.1.2.	Remedios contra la condensación	51
5.1.3.	Secado por medio de calentamiento	52
5.1.4.	Remedios contra otras fuentes de humedad.	53
5.2.	Limpieza	54
5.2.1.	Agua pura	54
5.2.2.	Detergentes (agentes de superficie activa)	55
5.2.3.	Sopleteado con arena.	56
5.2.4.	Limpieza a vapor.	56
5.2.5.	Crítica a la limpieza con agua	57
5.2.6.	Limpieza química	58
5.2.6.1.	Limpiadores alcalinos	59
5.2.6.2.	Limpiadores ácidos	60
5.2.6.3.	Limpiadores orgánicos.	61
5.2.7.	Limpieza de varios materiales de construcción, de estatuas y de murales	63
5.3.	Consolidación y protección	65
5.3.1.	Silicatos de sodio y potasio	68
5.3.2.	Ácido fluorhídrico (HF).	69
5.3.3.	Ácido fluorosilícico y fluorosilicatos.	70
5.3.4.	Ésteres de silicio.	73

5.3.5. Silicones	75
5.3.6. Monómeros sintéticos	78
5.3.7. Polímeros sintéticos.	80
Bibliografía	85
SUPLEMENTO DE 1975.	113
Bibliografía	125
SUPLEMENTO DE 1978.	131
Bibliografía	141

*El deterioro y la conservación de materiales poro-
sos de construcción en monumentos* editado por
la Dirección General de Publicaciones, se
terminó de imprimir en los talleres de EDI-
MEX, S. A., el día 30 de enero de 1984. Su
composición se hizo en tipo Garamond
11:12 y 9:10 puntos. La edición consta de
1 000 ejemplares.

para pedidos,
in order to by write.

Lic. José Luis Orozco.

Editor en Jefe.

Instituto de Investigaciones

Antropológicas. ~~UNAM~~ UNAM.

Ciudad Universitaria.

04510 México, D.F.

Mexico.

Price: \$1.10 US/cy. —plus post charges.

