

«ALTERACION Y CONSERVACION DE LOS MATERIALES PETREOS EN LOS MONUMENTOS HISTORICOS»

JOSÉ MARÍA CABRERA GARRIDO

INDICE DE MATERIAS

1. Introducción y objeto de la Tesis.
2. Estado actual del problema.
 - 2.1. Factores de alteración de los materiales pétreos en los monumentos: temperatura, hielo, contaminación atmosférica, agentes biológicos, sales solubles, humedad y otros factores.
 - 2.2. Métodos para la conservación de los materiales pétreos en los monumentos: limpieza, medidas contra la humedad, productos y sistemas para la consolidación y protección.
3. Casos prácticos.
 - 3.1. La portada de Ripoll: características técnicas, historia de su evolución material y datos experimentales.
 - 3.2. La Catedral de Cádiz: características técnicas, historia de su evolución material y datos experimentales.
4. Discusión de resultados.
5. Sugerencias terapéuticas razonadas.
6. Conclusiones generales.
 - I. Bibliografía (152 ref.).—II. Métodos experimentales.—III. Ilustraciones (36 láminas).

El estudio de los materiales pétreos de construcción y las formas de alteración que presentan los monumentos se inició en España en 1961

con la Tesis Doctoral de J. Iñiguez Herrero, quien al estudiar materiales procedentes de unos veinte monumentos y de las canteras de origen, permite conocer las características principales de los productos de la alteración y formar idea del comportamiento de las rocas utilizadas, pero no comprendía el tema propuesto, ni profundizar en los mecanismos de la alteración, ni analizar los procedimientos que permitieran detener la descomposición de estos materiales.

Entre los monumentos más afectados de España por la alteración de sus materiales pétreos de construcción se encuentran la portada del Monasterio de Santa María de Ripoll y la Catedral de Cádiz. El tema propuesto es: «Basándose en el estudio de estos monumentos, de sus materiales y de sus formas de alteración, deducir las causas principales de degradación que han actuado y razonar las medidas que mejor conviene adoptar para su conservación y protección.»

Hemos permanecido en la línea de estudio aplicado a sólo dos casos porque se está de acuerdo en afirmar que en el estado actual de conocimientos se debe esperar una ayuda importante de las operaciones programadas sobre la base de investigaciones y experiencias controladas y adaptadas a casos concretos, ya que permiten asegurarse una interacción de datos que contribuyen al mejor conocimiento de los problemas generales y al fin último de cuidar de unos monumentos en peligro.

En el desarrollo del tema se incorporan a los elementos de apreciación obtenidos en el laboratorio los del análisis de la construcción, los histórico-estilísticos y aún estéticos. Los monumentos se diferencian de otras construcciones en que el material pétreo es soporte de la obra de valor histórico-artístico que le confiere su carácter particular y que no puede verse afectado en el curso del tratamiento.

La memoria se inicia revisando los aspectos más actuales, demostrados o propuestos por los especialistas, para justificar los mecanismos de alteración y aplicar los remedios necesarios. Esto permite centrar una metodología de trabajo para la labor de análisis y tratamiento, base experimental de las conclusiones a la Tesis propuesta.

En lo que respecta a los *factores de alteración*, merecen destacarse los aspectos siguientes:

- 1) Dentro de *los de carácter biológico*, plantas, líquenes, hongos, insectos, etc.; se destacan especialmente, dentro de los microorganismos, los grupos funcionales nitrificantes, que generan nitratos, y los del ciclo del azufre, oxidantes que generan sulfatos y mineralizadores

del azufre orgánico generadores de SH_2 . La acción de bacterias que atacan a los silicatos es un tema en estudio, pero su acción se considera dudosa. Se acepta actualmente que para determinar la influencia de los microorganismos en un caso concreto, los análisis, por lo menos al principio, no deben dirigirse únicamente a la determinación de la especie en el sentido taxonómico del término, sino más bien hacia la función bioquímica y fisiológica que les caracteriza o, mejor aún, para la de la función mayor del conjunto presente, sea cual fuere la posición sistemática de las especies que la componen. Los microorganismos, por estar presentes en casi todas las rocas de construcción, se han de contar para ver si son más numerosos en las zonas alteradas, en donde intervengan como factores primarios o secundarios. En la portada de Ripoll se ha podido demostrar la presencia de microorganismos del ciclo del azufre, *thiobacillus novellus*, y en la Catedral de Cádiz los análisis realizados siguiendo las técnicas recomendadas por el Instituto Pasteur, indican que la cantidad de organismos bacterianos es lo suficientemente pequeña como para descartar su acción en la justificación de las roturas.

2) *Las dilataciones y contracciones* que pueden producirse en las rocas por los cambios de temperatura son temas suficientemente conocidos para los procesos normales, así como para los casos de incendio, habiéndose dictado normas para conocer la calidad de los materiales. Respecto a la acción de las heladas, la justificación de las roturas por el aumento de volumen que se produce al congelarse bruscamente el agua ha sufrido importantes modificaciones al comprobarse que la congelación de productos que, como el nitrobenzeno, no experimentan aumento de volumen, también ocasionan daños parecidos cuando impregnan la roca porosa. Actualmente se considera que cuando un poro está lleno de agua y se enfría por debajo del punto de congelación, se empieza a formar un depósito laminar de hielo desde el menisco hacia adentro; las moléculas de agua quedan inmovilizadas en la partícula formada y por debajo de ella disminuye el movimiento molecular, creándose una diferencia de presión entre el frente de congelación y el resto del agua en el capilar; para restablecer el equilibrio el agua migra hacia la partícula de hielo, y debido a que la tensión superficial del agua es mayor que el peso del hielo, la partícula se levanta y el agua se extiende sobre ella, aumentando de tamaño y migrando en el capilar; de su formación resulta un drenaje de los capilares próximos y la partícula puede crecer en una zona localizada, ejerciendo presión sobre las paredes del

capilar. Se demuestra que el daño por el hielo no es proporcional a la porosidad, sino que depende de la morfología de los poros, y cuando éstos son pequeños, la formación de hielo ejerce presiones destructivas. Actualmente se reconoce que todos los materiales porosos pueden ser atacables por el hielo cuando su contenido en agua alcance el «nivel crítico» y esto depende, también, de la localización geográfica del monumento y de la situación del material dentro de la construcción. De todas formas, esta hipótesis sigue perfeccionándose, puesto que, en realidad, los fenómenos no son nunca puros, ya que existen heterogeneidades locales en el contenido de agua y gradientes de temperatura que provocan tensiones en zonas localizadas, y también sucede que aún sin alcanzarse el alargamiento límite de rotura, se producen fenómenos de fatiga debido a la repetición de las contracciones y expansiones. En ninguno de los dos monumentos puede atribuirse una acción de primer orden a estos factores, pero el mecanismo está ampliamente relacionado con la acción de las sales solubles en cuanto a los fenómenos de hidrólisis y formación de cristales en el interior de los poros.

3) *Las sales solubles* en agua se consideran una de las causas de alteración más frecuentes y peligrosas. Sea cual fuere su procedencia, se ponen en movimiento por el agua y se acumulan en las zonas de evaporación. Si son poco solubles, el material puede adquirir un recubrimiento protector, pero cuando son a base de sulfatos, cloruros, nitratos y sales de ácidos orgánicos, son causa de graves deterioros. Los cloruros son muy activos en tres aspectos principales: a) son extremadamente móviles, penetrando y rompiendo muchas estructuras cristalinas; b) peptizan grandes aglomerados de moléculas, facilitando su transporte por el agua; c) aumentan la falta de estequiometría de los cristales. Esto explica que los materiales pétreos que los contienen tiendan a pulverizarse, y de manera similar actúan los nitratos y las sales de los ácidos orgánicos. Completamente diferente es la acción de los sulfatos; se depositan en los poros desde sus soluciones saturadas, como hidratos, y cuando la evaporación prosigue, el depósito seca fuera (efloresce), llenándose gradualmente el volumen de poros detrás de la zona de evaporación; el aumento de la humedad relativa del aire hidrata las sales, provocando un aumento de volumen y, por tanto, una presión sobre las paredes de los poros. Disoluciones conteniendo 0,1 por 100 de sulfatos se consideran ya peligrosas y éste se debe a que la mayoría de los poros, por tener una sección transversal no circular, durante la evaporación el mecanismo no se desplaza, o lo hace lentamente, allí

donde termina el eje mayor, y la menor pérdida por evaporación se compensa por un suministro lateral, dando como resultado una sobresaturación local, que deposita las sales en donde el poro es más estrecho, provocando las roturas aún cuando el poro no esté totalmente lleno. Generalmente existen varias sales al mismo tiempo y las costras de superficie que se desarrollan sobre los materiales pétreos se consideran como la capa más externa de una estructura de corrosión subdividida en las siguientes capas: a) costra superficial; b) estrato empobrecido en adhesivo, diferenciándose varios sustratos, y c) material sano. En la portada de Ripoll la determinación de sales solubles nos indica que la muestra más sana contiene el 0,088 por 100 y la más alterada el 11,160 por 100 de la muestra seca y están compuestas en más del 90 por 100 por sulfatos y calcio, estando los demás iones presentes (cloruros, nitratos, bicarbonatos, sodio, potasio y magnesio) en proporciones comprendidas entre el 0,5 y 2 por 100; no se aprecia disminución proporcional al contenido en sales del contenido en carbonato de calcio de la arenisca (posible transformación en sulfato de calcio), y la composición de las sales en la portada es muy similar a las otras zonas del Monasterio. En la Catedral de Cádiz, en la parte externa, se acumulan los cloruros, en especial de sodio, y en el interior, si bien existen algunos cloruros y nitratos, las sales en la parte baja de los muros son principalmente sulfato de sodio y en las partes altas carbonato de sodio; en las calizas del interior el contenido en sales medio es de 0,345 por 100; en los morteros de las uniones, 3,184 por 100, y en la piedra tosca del interior de los muros, 0,356 por 100.

4) *Los contaminantes atmosféricos*, y en especial los anhídridos sulfurosos y sulfúrico procedentes de la combustión, son, sin duda alguna, los principales agresores de la piedra de los monumentos en las áreas industrializadas o urbanas a través del mecanismo conocido como «sulfatación». Los agentes que hacen que estos gases y residuos entren en contacto con la superficie de las rocas, cubriéndolas e impregnándolas gradualmente, son principalmente la lluvia, que lava la atmósfera; la acción de la gravedad sobre las partículas de polvo que llevan absorbidos los gases y la humedad; la acción de los aerosoles líquidos o sólidos por coagulación o por atracción electrostática (los materiales pétreos suelen estar cargados negativamente), y también tiene marcada influencia la conductividad térmica de la piedra, pues cuanto mayor sea ésta, mayor será la velocidad de enfriamiento y mayor la condensación. Los procesos de corrosión suceden en la interfase ácido/piedra y con-

ducen a la transformación de calizas en yeso, sales de Candlot a partir de los que contengan alúmina, alteración de minerales de hierro y aparición de los extremadamente perjudiciales sulfatos de sodio y de magnesio. La acción del sulfúrico sobre el carbonato de calcio empieza por la descomposición del carbonato y de la disolución precipita el yeso generalmente en forma de un agregado cristalino (en agujas finas y largas para pH comprendido entre 3 y 6) que por tener mayor superficie interna pueden absorber mayor cantidad de sustancias extrañas. Las costras de sulfatación estudiadas por los especialistas tienen un espesor comprendido entre 0,1 y 1 cm. y están compuestas por sulfatos, carbonatos, cloruros y compuestos de hierro principalmente, estando bajo ellas la roca con la misma composición de la cantera. Teniendo en cuenta que la solubilidad del yeso es de unos 202 mg. por 100 gr. de agua y que la presencia de otras sales aumenta la solubilidad, según las experiencias y comprobaciones realizadas por nosotros, así como la aparición de otros sulfatos, como los de sodio y magnesio, muy solubles y capaces de formar cristales hidratados de gran volumen, se comprende que las repetidas disoluciones y cristalizaciones de estas sales acaben por disgregar las superficies afectadas de la rocas. En los monumentos, las costras de sulfatación se forman principalmente en las superficies protegidas de la lluvia directa. Aunque parece que el SO_2 es la causa principal de la alteración de calizas en zonas contaminadas, debemos señalar que sólo una parte de las utilizadas en construcción son alteradas por los humos; las causas son, pues, más complejas y esto hace que la resistencia de las piedras a la atmósfera contaminada sólo se conozca aún de forma empírica por medio de la observación de su comportamiento en los monumentos. También se analiza en la memoria la acción de los nitratos y el CO_2 sobre los silicatos, que si bien es un proceso lento al principio, cuando la roca está aún fresca, la velocidad de alteración se considera exponencial a medida que la alteración progresa. En la portada de Ripoll y en la Catedral de Cádiz, aunque la contaminación no es principalmente de combustión, las sales solubles proceden del exterior, a partir de la salinidad del mar en Cádiz y a partir de las aguas contaminadas industriales y revocos de yeso antiguos expuestos a la intemperie durante cincuenta años en Ripoll.

5) *La humedad* está en el origen de casi todos los mecanismos de alteración, por lo que resulta necesario la caracterización de los materiales pétreos respecto a los procesos de higroscopicidad, condensación y absorción de agua. Se revisan éstos sacando los parámetros a deter-

minar y las expresiones matemáticas capaces de permitir el cálculo. Resulta de especial interés conocer la distribución de humedades en los materiales y en la estructura de los monumentos, cuantificando con la mayor precisión a fin de deducir las vías de penetración y el movimiento de las disoluciones en el interior. Los métodos de determinación de humedad son importantes, pues nos permiten conocer y cuantificar los procesos. Nosotros sólo hemos podido utilizar los métodos termogravimétricos de medida, lo que impone una gran limitación por exigir toma de muestra; no obstante, se analizan los distintos procedimientos de medida indirectos, tales como los psicrométricos, eléctricos, térmicos, con radiaciones nucleares, termovisión, etc. En la Catedral de Cádiz se ha podido determinar que: a) el coeficiente de absorción de agua es unas 50 veces mayor en los morteros de las juntas que en las calizas; b) el contenido en humedad higroscópica para Hr 75 por 100 es unas diez veces mayor en morteros que en calizas; c) el contenido máximo en humedad higroscópica es unas siete veces mayor en morteros que en calizas. Estos parámetros, unidos a la distribución por materiales del contenido de humedad: a) calizas, 0,933 por 100 (sales = 0,345 por 100); b) morteros, 5,610 por 100 (sales = 3,184 por 100); c) ostionera, 0,542 por 100 (sales = 0,356 por 100), permiten situar las juntas como el material más permeable al transporte de las disoluciones salinas, lo que concuerda con la observación de que las zonas más próximas a ellas son las más alteradas. Entre los problemas que plantea la conservación de los materiales pétreos, la humedad es, sin ningún género de dudas, uno de los que merecen mayor atención; por esto, hemos dedicado especial interés al estudio de los sistemas de medida, cada vez en número mayor, que sin pretender renunciar a los de eficacia probada, suministran posibilidades complementarias al técnico que tenga que decidir con base en la eficacia y sensibilidad exigibles a cada caso.

6) *Las características de las rocas de construcción* tienen una importancia mayor en su resistencia a los agentes de erosión. En los monumentos, dadas las limitaciones a la toma de muestras y el tamaño reducido de las que se pueden tomar, es conveniente utilizar técnicas de análisis no destructivo y programar las determinaciones a efectuar, que deben incluir necesariamente: caracterización de la roca e identificación de los minerales; porometría con mercurio hasta 0,025 micras; análisis de sales solubles en agua; análisis biológicos, y estado de superficie. *En la portada de Ripoll* el análisis microscópico en láminas

delgadas nos muestra que la roca es sedimentaria de grano fino, compuesta principalmente por cuarzo, feldespato, óxidos de hierro, calcita/dolomita, plagioclasas y micas, cementados por calcita/dolomita, arcillas y óxidos de hierro, pudiendo definirse como una samita arcósica de cemento calcáreo-arcilloso no muy continuo y con granos detríticos generalmente angulosos. La difracción de rayos X nos confirma la existencia, en las seis muestras estudiadas, de feldespato, cuarzo, calcita, dolomita y caolinita, apareciendo yeso en las muestras con alteración más significativa; los interestratificados que aparecen se han estudiado con la técnica de agregados orientados, determinándose illita y clorita, viéndose, además, en los agregados orientados más etilenglicol, la presencia de moscovita y esmectita. El análisis granulométrico muestra que la fracción más importante (39,68 por 100) se sitúa entre 0,125 y 0,063 mm., seguida por la fracción comprendida entre 0,063 y 0,03 milímetros (38,66 por 100), las partículas más gruesas están entre 0,5 y 1 mm (0,21 por 100) y la fracción menor de 0,03 mm sólo supone el 2,33 por 100. La densidad de la roca es aproximadamente 2,48 gr/cm³ y la porosidad abierta, determinada en agua bajo una presión de unos 760 mm de Hg, es aproximadamente 11,96 por 100. La porometría con mercurio, determinada entre diámetros de poros de 180 micras y 0,025 micras, indica una porosidad total abierta del 10,93 por 100; el mayor volumen de poros corresponde al intervalo 0,1 a 1 micras (4,87 por 100), estando el máximo absoluto entre 0,25 y 0,50 micras (1,57 por 100). La curva teórica, que podría situarse sobre el histograma de porosidad, sería sensiblemente bimodal, con máximos en las zonas 0,1-1 micras y 5-13,5 micras. La menor sección de poros determinada (0,025-0,05 micras) supone el 0,27 por 100 y la mayor sección (90-180 micras) supone un 0,22 por 100. El diámetro de poros que corresponde al 10 por 100 de la porosidad total es de 12,64 micras, lo que es netamente superior al de 2,5 micras establecido en criterios de heladicidad. La alteración de la roca es superficial y se caracteriza por una arenización que afecta hasta aproximadamente 1 cm. de profundidad. *En la Catedral de Cádiz* la piedra caliza del interior en donde se producen las roturas de fragmentos es, en líneas generales, oolítica, muy blanca y con un contenido en CO₃Ca superior al 99 por 100; tiene muy poco Mg, trazas de hierro localizado en betas de arcilla en algunos sillares y algo de materia orgánica; en su estructura interna se diferencian zonas más cargadas de grumos y de oolitos, con algunas formaciones de carácter orgánico, apareciendo también cortezas calizas, de igual origen

que las escamas de los oolitos, que contribuyen a dar a la roca un carácter laminado. Unas veces la matriz calcítica es microcristalina, y otras, las menos, existen cristales grandes de calcita, siendo el calibrado muy variable y los poros casi siempre grandes y aislados. Dentro de esta descripción general se sitúan tres tipos fundamentales, según la textura, porosidad y características particulares: a) Oolitos con el borde difuminado, poco distinguible del cemento microcristalino compacto; composición: $\text{CO}_3 = 59,87$ por 100, $\text{Ca} = 39,38$ por 100, $\text{Mg} = 0,17$ por 100, insoluble en CIH diluido = 0,17 por 100 (trazas por emisión = Si, Al, Fe, Mn y Cu); porosidad total abierta con Hg = 4,2 por 100 y $d_{10} = 12$ micras (es la más abundante y en la que con mayor frecuencia aparecen las roturas). b) Oolitos bastante bien delimitados, microcristalinos, raramente fibrorradiados, incluidos en cemento microcristalino; composición: $\text{CO}_3 = 59,83$ por 100, $\text{Ca} = 39,35$ por 100, $\text{Mg} = 0,18$ por 100, insoluble en CIH diluido = 0,19 por 100 (trazas por espectrografía de emisión = Si, Al, Fe, Ti, Cu, Ag, V, Pb); porosidad total abierta con Hg = 16 por 100 y $d_{10} = 75,5$ micras. c) Oolitos netamente visibles o difuminados sus bordes, generalmente poco numerosos, con betas calcáreo-ferruginosas poco compactas; composición: $\text{CO}_3 = 58,60$ por 100, $\text{Ca} = 38,74$ por 100, $\text{Mg} = 0,18$ por 100, insoluble en CIH diluido = 2,03 por 100 (trazas por emisión: = Si, Mn, Fe, Al, Ti, Cu); porosidad total abierta con Hg = 18 por 100 y $d_{10} = 114$ micras.

La historia material o externa y el estudio de la construcción nos muestran los siguientes datos principales: la construcción de la *portada de Ripoll* se sitúa en el siglo XII; en febrero de 1428 un terremoto destruyó el Monasterio; entre 1826 y 1830 se modificó la basílica, reduciendo a tres las antiguas cinco naves y revocando el interior con yeso; el 9 de septiembre de 1935 un incendio destruyó nuevamente el Monasterio, y la reconstrucción, iniciada en 1886, se terminó en 1893. Desde 1884 poseemos documentación fotográfica de la portada, siendo especialmente abundante desde 1907; hacia 1930 se sacó a la portada un molde con yeso. El estudio del sistema de construcción, practicando dos catas en el muro del templo y una zanja a todo lo largo del basamento de la portada, nos muestra que el muro de la iglesia está hecho con piedra de cantera del país envuelta en mortero de cal, y el trasdosado de la portada, explorado a niveles de planta y coro, está compuesto de cantos rodados de gran tamaño y recibidos con poco mortero de cal; tras la portada, el muro de la iglesia presenta un paramento con revocos de mortero de cal, alisado con paleta, que se conserva más abundante en las zonas

altas con restos de pintura mural. La portada tiene unas dimensiones de aproximadamente 11 m. de longitud, 7 m. de altura y unos 0,7 m. de espesor y está formada por plafones de unos 25 cm. de espesor y por impostas que penetran hasta unos 60 cm., no habiéndose encontrado restos de mortero de recibo, aunque por el exterior están rejuntados a veces con «cemento rápido». En la estratigrafía se observa que la parte superior del trasdosado es actualmente «material de escombros», unos 40 cm., añadido sobre los cantos rodados, cuya superficie está alisada con piedras de menor tamaño y mayor cantidad de cal. El basamento de la portada se construyó con bloques de piedra similar a ella, algunos reutilizados, y se le adosó en la restauración de 1890 un zócalo de piedra nueva que monta también sobre las losas de un umbral preexistente. El canal de agua que cruza frente a la portada se demuestra como una fuente de humedad y sales importante.

Respecto a la *Catedral de Cádiz*, se recogen datos sobre su construcción, estilo y materiales empleados, basándonos en una detallada publicación de la época y en otras más posteriores; la construcción se inició en 1722 y las obras terminaron en 1838, tras una interrupción importante entre 1769 y 1796. Tres meses después de acabar la construcción, el 21 de febrero de 1839, consta en las actas capitulares: «... la necesidad de tomar providencia para remediar el que se desprenden piedras de los relieves de las bóvedas», iniciándose así un continuo proceso que impuso la necesidad de cerrar el templo en 1966. Entre los hechos importantes figura lo escrito en 1803 por J. Urrutia, que dice: «El templo está olvidado y sin cerrar de cúpulas y bóvedas; la fábrica se debilita por la acción del mar, el viento y la lluvia.» En 1832 ocurrió un importante incendio en la madera que se guardaba en la capilla de San Firmo, y los desperfectos abundantes ocasionados en mármoles y piedras se restauraron en 1835 utilizando «la argamasa traída de Inglaterra, llamada cemento romano». Entre 1838 y 1857 abundan los datos en las actas capitulares sobre el desprendimiento de piedras, «generalmente chinas y lascas que se descuelgan de la altura, sobre todo en período húmedo», así como de la utilización de un carro-andamio con el que se provocaba la caída de piedras en mayor peligro, y las continuas llamadas pidiendo la «obra radical», para cuyo estudio se nombra una comisión, y en 1857 se solicita a Londres «material para evitar el desprendimiento de las piedras que en otros edificios ha dado buenos resultados» (pueden ser los silicatos alcalinos parentados en esta fecha para el tratamiento de esculturas de piedra). En 1947 se produce

la explosión del polvorín de Cádiz, que dejó sin cristales el templo, y en 1963 se inicia la acción del arquitecto conservador de Bellas Artes.

Al discutir pormenorizadamente todos los datos existentes, incluidos los principales, que aquí hemos sintetizado, se pueden extraer las siguientes bases de partida: en la portada de Ripoll el examen de las fotografías existentes nos informa de buena parte de las modificaciones introducidas a principios de siglo, así como de la evolución del proceso de alteración, que se agrava considerablemente en los últimos cincuenta años. Al analizar los datos deducidos de la historia material a la luz de las determinaciones materiales efectuadas y considerando los factores de alteración antes señalados, los cambios de estructura introducidos a principios de siglo, junto con las aguas del canal próximo y la presencia de abundantes sales solubles, en especial yeso, hace que consideremos a estas sales como el principal agente de alteración, unido a las modificaciones introducidas en los frentes de evaporación del agua al cegar con relleno de escombros la porosidad original del trasdosado y su capacidad de ventilación por el trasdós de la portada, originalmente muy impermeable en la superficie esculpida por la policromía cuyos restos aún existen.

En la Catedral de Cádiz la historia material nos muestra una acción prolongada del mar sobre la estructura sin cerrar de bóvedas, justificando las sales presentes por el agua del mar y por su reacción con la cal del mortero sin carbonatar, como una hipótesis probable; la permeabilidad de los morteros de las juntas hace que los consideremos como la principal vía de penetración de las disoluciones salinas que actúan por cristalización en el interior de la piedra al aumentar la Hr y formar hidratos superiores de gran volumen dentro de los poros que son pequeños.

En el capítulo correspondiente a los sistemas de conservación actualmente en uso se hace especial hincapié en los sistemas de limpieza, que se acepta constituyen el mejor método de conservación y que pone el acento sobre la importante noción del cuidado y mantenimiento periódico, única forma eficaz de conservar los monumentos, pasando revista a los distintos sistemas que emplean agua, vapor, chorro de arena u otros abrasivos, productos químicos tales como la sosa cáustica (muy perjudicial), fluoruro ácido de amonio (muy útil para calizas, forma parte de casi todos los productos comerciales utilizados actualmente), disolventes orgánicos, detergentes no iónicos, formulaciones en forma de pasta, etc., y en especial los métodos de limpieza mecánicos

con cepillo para quitar en seco las sales cristalizadas en superficie y los sistemas de extracción de sales. Se revisan igualmente los distintos métodos utilizables para eliminar la humedad en los muros, viéndose la ineficacia de determinados sistemas de moda actualmente, tales como la electroosmosis o los sifones tipo Knappen de aireación, la mediana eficacia de las inyecciones de productos impermeables al agua, como las siliconas, para evitar la humedad ascensional; la gran eficacia de las láminas impermeables de plomo, plásticos, etc., para este mismo fin, y la seguridad que representan los sistemas tradicionales de eliminación de humedades, tales como las zanjas de drenaje y zanjas de aireación con ventilación al exterior, principalmente. También se analizan sistemáticamente los distintos productos utilizados para el tratamiento de las piedras, en especial las sales de bario, silicatos alcalinos, ésteres silícicos, ácido fluosilícico, fluosilicatos, siliconas, siliconatos, ceras, parafinas, disoluciones de polímeros sintéticos, en especial acrílicos, resinas epoxídicas de baja viscosidad y los monómeros acrílicos.

A la vista de estos métodos de tratamiento, los sistemas terapéuticos que se proponen pueden esquematizarse como sigue: para la *portada de Ripoll*, en noviembre de 1964 se aplicó un tratamiento, hasta ahora con resultados satisfactorios, consistente en reparar el tejadillo del pórtico, evitando las filtraciones; aislar de humedades el basamento de la portada mediante el sistema de dejar como zanja con ventilación al exterior la cata de exploración practicada a todo lo largo del suelo; restaurar la porosidad original del trasdosado eliminando el relleno de escombros acumulado sobre él y consolidar la superficie de la portada, profundamente arenizada, con una disolución diluida en xileno (2,5 por 100) de un éster polimetacrílico, fabricado por Imp. Chem. Industries, denominado «Bedacryl 122X», tras eliminar la suciedad acumulada con cepillos suaves, y preocupándonos de conseguir la mayor penetración posible (creando una atmósfera saturada de vapor del disolvente) y los mejores resultados estéticos, pero sin preocuparnos demasiado por la reducción de la porosidad introducida, que en realidad nos ayuda favoreciendo la ventilación por el trasdós. Finalmente se aplicó un cerramiento acristalado a los arcos del pórtico en 1973, incorporando un sistema de ventilación mecánico que mejora la estabilidad del clima.

En la *Catedral de Cádiz* no se han experimentado las soluciones propuestas; este monumento presenta una estructura muy compleja y aún no conocemos con exactitud sus principales características, en tanto no

se terminen los planos que actualmente se están realizando. De todas formas, se puede establecer que como el principal agente agresivo es el agua del mar y el juego de las sales frente a los cambios de la Hr atmosférica, las soluciones iniciales deben encaminarse a aislarlo en su parte externa, reparando las filtraciones, ventanas y demás desperfectos que actualmente existen. En segundo lugar se discuten algunas soluciones aplicables al saneamiento, consolidación y restauración del interior programadas con base en el respeto a los materiales originales y no desde el punto de vista de sustitución de los sillares, tratando especialmente de aislar las juntas entre sillares, mejorar y estabilizar las condiciones climáticas de Hr y temperatura en el interior, sanear las áreas en que se acumulan las disoluciones salinas y extraer las sales que actualmente contienen las placas calizas que forran el interior, para lo que ha dado buenos resultados la aplicación de una masilla con tierra de diatomeas. Se recomienda realizar en esta Catedral un programa de medidas de humedad con técnicas no destructivas que nos permita conocer la distribución y la evolución en los muros a lo largo del tiempo, única base sólida para plantear soluciones y fundamento imprescindible para enjuiciar los resultados que se obtengan.