650-6

Alteración de las piedras en algunos monumentos

J. M. FERNANDEZ PARIS

Ing. Técnico

INTRODUCCION

La cultura de la humanidad ha originado a través del tiempo un conjunto de civilizaciones, cada una de las cuales ha tratado de perpetuarse, plasmándose en obras artísticas y monumentales.

El afán de perpetuidad es inherente al ser humano, y en su anhelo de continuación ha confiado en las piedras —como material más resistente— la durabilidad de sus obras.

Granitos, basaltos, mármoles, calizas y areniscas se han disputado la primacía; pero estas obras, por depender del tiempo, tras un período de esplendor, languidecen y mueren, ya que según Proust “ni a las obras, ni a los hombres, se les ha hecho promesa de duración permanente”.

La famosa frase “treinta siglos os contemplan” pudo decirla Napoleón frente a las Pirámides; pero el obelisco egipcio que aquel genio de la Historia trasplantó, como trofeo, a la plaza de La Concorde de París, comenzó a desmoronarse cincuenta años después de forma rápida y alarmante.

La Ciencia y la Técnica de nuestra época han tomado conciencia de la enorme responsabilidad que supone salvaguardar y conservar el legado monumental de nuestros antepasados, incorporando a los planes científicos de numerosos centros de investigación, el estudio de las causas que motivan las alteraciones de las piedras de construcción.

Durante la última centuria los grandes núcleos urbanos han aumentado el gasto de combustible, incrementando sobremanera la contaminación del medio ambiente. Monumentos que durante doscientos años habían permanecido prácticamente inalterados, han quedado destruidos en los cincuenta últimos.

En este trabajo se presentan tres estudios, realizados en el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, acerca de la acción desintegradora de tres agentes característicos: el ambiente marino, la acción del hollín, y la formación de yeso por ataque de sulfatos; los tres con un denominador común: la presencia de sales solubles.

La Catedral de Cádiz y el medio ambiente marino

Cuando se considera el problema de la desintegración pétreo observada en la Catedral de Cádiz, es preciso señalar tres características, que de forma temática se repiten como en una sinfonía: el medio ambiente marino, su ejecución con piedra caliza, y la falta de criterio técnico en el período final de su construcción.

Este templo, una de las mejores manifestaciones del neoclásico español, se encuentra situada frente al Atlántico, en pleno muelle, y se debe a un proyecto original del arquitecto D. Vicente Acero. Su nave central se halla dispuesta en sentido longitudinal nortesur, con la fachada principal en posición norte.

Las obras comenzaron a realizarse en 1722 bajo la dirección de dos renombrados maestros en el arte de bien ejecutar con piedra: D. Gaspar y D. Torcuato Cayón. Ambos, tío y sobrino, eran oriundos de la montaña santanderina, y allí se habían iniciado en la técnica de la mampostería. Durante los cincuenta y seis años que ejercieron su influencia, se pueden considerar como un modelo de bien realizar. Se dispusieron los cimientos del edificio con piedra caliza procedentes de las canteras de Antequera (Málaga) e incluso se llegó a pensar, si sería más conveniente adoptar otro tipo de piedra de las cornisas para arriba del edificio. No se sabe, porque no consta en documentos, si esta duda de los artífices anteriores, se debía a la materialidad económica de un precio encarecido por el transporte, o a una demanda tecnológica de un material más idóneo, capaz de soportar mejor su funcionalidad arquitectónica. En el año 1778 D. Torcuato Cayón se vió obligado a paralizar las obras y despedir a los obreros, por falta de medios económicos, pero antes redactó una amplia memoria técnica de los trabajos realizados, entre cuyos detalles destaca que para realizar los cimientos fue preciso profundizar seis pies por debajo después de encontrar agua.

Conviene destacar que dicha agua procedía del mar y que en la actualidad, la cripta donde reposan los restos de distintos obispos de la diócesis, así como los del compositor D. Manuel de Falla, dispone en su centro de una losa circular que cubre un pozo en comunicación directa con el mar.

Cuando en 1783 se hace cargo de la dirección, por fallecimiento del Sr. Cayón, el arquitecto D. Miguel de Olivares, que lo fue de la Colegial de Jerez de la Frontera, faltaba por cerrar la mitad de las bóvedas correspondientes a las naves laterales, así como las cúpulas del crucero y del presbiterio. Durante este período, segundo de su ejecución, se inicia el fatídico destino de esta Catedral, pues aunque ya anteriormente en 1765 los fuertes temporales arruinaron parte de los muros e incluso las olas arrastraron parte de la cantería gruesa, dejando al descubierto los cimientos, su acción resultó menos dañina que las discusiones bizantinas que surgieron entre el arquitecto Sr. Olivares y una Comisión de Técnicos acerca de la ejecución de las bóvedas. Las disputas adquirieron tal violencia que el propio rey Carlos III, que a la sazón reinaba en España, nombró director de la obra a D. Manuel Machuca; pero la falta de criterio y la apatía general obligó en 1796 a cerrar la obra.

Desde esta fecha hasta 1832 la obra estuvo totalmente paralizada; pero no así las repetidas lluvias y los recios vientos, que hicieron sentir sus efectos devastadores debilitando la solidez de la obra y destruyendo la considerable riqueza que en mármoles y otros materiales preciosos contenía. Como remate de su despiadado destino durante la Guerra de la Independencia, la nave central se empleó para diversos menesteres y las capillas laterales para depósito de cadáveres. Finalmente en 1832 se incendió la Capilla de San Firmo, consumiéndose los adornos tallados en mármol y los capiteles de sus columnas, entablamentos y bóveda.

En esta misma fecha el entonces Obispo de la Diócesis Fray Domingo de Silos Moreno se propuso concluir la construcción del templo, bajo la supervisión del arquitecto D. Juan Daura. Durante este tercer período se cerraron las naves, se remató la cúpula y se adicionó la Sacristía Mayor, elemento este último que no figuraba en el proyecto inicial de D. Vicente Acero. En este afán desorbitado de rematar la construcción, las obras se efectuaron en seis años, no se respetó en absoluto el proyecto primitivo, ni en materiales ni en decoración, ya que para cerrar aquel enorme hueco se precisaba de un fondo que no se podía disponer.

De esta reseña histórica de su construcción se desprende que el cuerpo inferior, es decir, desde los cimientos hasta las cornisas y capiteles se ejecutaron con un sentido técnico y unos conocimientos, que faltaron por completo en la ejecución del cuerpo superior, bóvedas y cúpulas; así como que los materiales pétreos utilizados son de diversas procedencias y calidades.

Cuando se observa la fachada principal de la catedral se denota la presencia de dos materiales: la mitad inferior muestra un tono oscuro, mientras que la superior es de tonos claros, casi blanca (foto 1).

Foto 1

Foto 2

La parte inferior de esta fachada corresponde al mismo material empleado en los muros laterales, material que en la actualidad presenta síntomas normales de erosión, en forma de una serie de bandas paralelas, más o menos desgastadas, causadas por los fuertes vientos. Su colocación corresponde al primer período de su construcción y procede de las canteras calizas de Manilva. La mitad superior se realizó con calizas que procedían de la localidad de Mijas.

Si se efectúa una inspección de conjunto por el exterior de la catedral, se podrá comprobar que la parte más afectada es la situada en posición oeste. Las juntas de los mampuestos están completamente comidas, sus bordes redondeados, e incluso por simple contacto con la mano se aprecia un elevado grado de humedad. Su aspecto poroso y deleznable le confiere una apariencia de esponja (foto 2).

Este paramento se encuentra azotado constantemente por el viento cargado de humedad salina, sin protección de edificaciones ni elementos naturales, pudiéndose comprobar en el laboratorio, la presencia de sales marinas en el interior de los poros.

En esta fachada oeste se encuentra adosada una puerta de mármol, pudiéndose contrastar cómo sus relieves y adornos está completamente desgastados y las cornisas y elementos salientes se encuentran mucho más deteriorados que su correspondiente homóloga de la fachada este (foto 3).

El muro sur presenta una acción análoga a la manifestada por la fachada oeste, hecho que cabía esperar, ya que ambas son las más expuestas al viento y ambiente marino, por lo que en días de lluvia y fuerte viento la zona se transforma en un verdadero remolino de agua.

En el interior del templo se puede comprobar que el primer cuerpo del edificio, realizado con ricos mármoles de las canteras de Mijas, durante el primer período de construcción, no presenta ningún síntoma alarmante de alteración fuera de lo normal, sobre todo si se tiene en cuenta la serie de vicisitudes que estos materiales sufrieron durante la construcción del templo.

Foto 3

Foto 4

El segundo cuerpo del edificio, integrado por los arcos, bóvedas, pechinas y paramentos, que constituyen el crucero y la bóveda central, presenta alarmantes síntomas de desintegración, sobre todo en los motivos ornamentales. Por ejemplo, un angel de la vidriera, correspondiente al muro oeste ha desaparecido casi por completo. Dentro de las bóvedas y naves, las situadas en posición oeste y sur presentan daños mayores, puesto que sufren en mayor grado las inclemencias de los agentes atmosféricos.

El mayor grado de desintegración se observa en la denominada Sacristía, pudiéndose calificar de alarmante el estado de sus paramentos. Tanto esta dependencia como la bóveda del crucero a su salida presentan los síntomas más acusados de alteración. Los materiales pétreos que sirvieron para cerrar las bóvedas y ejecutar la Sacristía Mayor son calizas procedentes de una cantera de la Gracejá, que desde el punto de vista petrográfico dejan mucho que desear en cuanto a durabilidad (foto 4).

Los muros aun cuando sean superficies aparentemente planas, contienen salientes, más o menos numerosos, y motivos ornamentales en los que el agua de lluvia detenida, introduciéndose a través de las juntas y ascendiendo por capilaridad hacia las piedras superiores, en la superficie de aquéllas se evapora la disolución transportada y en los poros se depositan las sales en forma de una capa delgada e impermeable. Cuando a esta zona llega una nueva cantidad de disolución se encontrará con dicha capa protectora y acabará por desprenderla, haciéndola caer en trozos de dimensiones variables, comenzando de nuevo el proceso destructivo.

Cuando un edificio se ejecuta con piedras de la misma calidad, los efectos serán análogos; pero en caso de heterogeneidad los elementos más porosos manifiestan una mayor desintegración, incluso atrozmente localizada.

Se observa que la desintegración es más intensa en las zonas superiores, tales como bóvedas y cornisas, debido a que en estas regiones se localizan los efectos de evaporación y cristalización de las disoluciones ascendentes, mientras que en las partes inferiores las humedades se limitan a ascender sin detenerse a actuar (foto 5).

Foto 5

Foto 6

En la catedral de Cádiz la acción agresiva se ha localizado con preferencia en el cuerpo superior, primero por su situación y después por la baja calidad de las piedras calizas que constituyen las dovelas de las bóvedas y el paramento de la Sacristía (foto 6).

Este proceso destructivo, ya previsible, se ha agravado por la presencia de sales marinas en el medio ambiente, sales que no solamente cristalizarán después en los poros de la caliza, sino que por su carácter delicuescente —sulfato y cloruro magnésico— favorecen el mantenimiento de la humedad. Este caso se observa claramente en los muros oeste y sur, que prácticamente lindan con el mar.

Independientemente del tema que se trata, pero como dato curioso de la acción agresiva de los cloruros solubles a las calizas, merece citarse el de un monumento de Londres, cuyo pedestal del material citado, presentaba un lamentable estado. En un principio se atribuyó la causa a la mala calidad de la piedra; pero posteriormente se comprobó, que en todas las piedras desintegradas se detectaba la presencia de cloruro sódico, o sea, de sal común. Al parecer el pedestal se había asentado, durante su colocación, sobre un lecho de sal, que posteriormente se eliminó por riegos sucesivos, a fin de que el enorme bloque se acoplara sin peligro de rotura. El resultado fue una acción tan intensa, que al cabo de dos años, fue preciso renovar los bloques de piedra.

Al hecho de que Cádiz se haya quedado virtualmente sin Catedral ha contribuido un agente agresivo muy potente: el ambiente marino, ayudado sin género de dudas, por la falta de conocimientos técnicos, o quizás con eufemismo, económicos empleando un material calizo de muy baja calidad, precisamente en las zonas más vulnerables, como bóvedas y cúpula; dando de esta forma indigno remate a un bello proyecto de nuestro neoclásico.

Estudio de la piedra del muro oeste

El estudio petrográfico la clasifica como una lumaquela. Se aprecian restos orgánicos (conchas). El carbonato cálcico se presenta en agregados microgranudos, que únicamente se reconocen al microscopio.

Esta lumaquela engloba resto de lo que al parecer fue una cuarcita, por lo cual su riqueza en cuarzo es abundante. No se aprecian en ella yeso, ni anhidrita; si bien existen algunos cristales irreconocibles al microscopio.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	23,04
Anhidrido sulfúrico	0,06
Oxido de magnesio	0,27
Oxido de calcio	28,89
Sesquióxidos	0,27
Residuo insoluble	47,49

Debido a la gran humedad que presentaba, se guardó convenientemente la muestra en una bolsa de plástico precintada, con la finalidad de poder efectuar un análisis de las sales solubles. Con este fin se trituraron y molturaron 50 g de la piedra dañada hasta pasar totalmente por el tamiz de 4.900 mallas. La muestra preparada se introdujo en un Soxhlet, para verificar la extracción total de las sales solubles. Se empleó como líquido de extracción agua destilada.

En una parte alícuota de la disolución así obtenida se determinaron las sales solubles mediante evaporación a sequedad y el resultado se expresó como tanto por ciento de la muestra empleada en la extracción.

Total de sales solubles 0,35 %

Se determinaron los contenidos de ion sulfato, cloruro y calcio, de la sal soluble, expresados en tanto por ciento ponderal en forma de anhidrido sulfúrico, ion cloruro y óxido de calcio respectivamente.

Contenido en las sales solubles:

	(%)
Anhídrido sulfúrico	16,13
Ion cloruro	6,35
Oxido de calcio	12,46

Por consiguiente, la muestra estudiada presentaba las cantidades de los elementos solubles en agua, extraídos por la técnica expuesta.

	(%)
Anhídrido sulfúrico	0,05
Ion cloruro	0,02
Oxido de calcio	0,04

Estudio de la piedra alterada de la Sacristía

El estudio petrográfico la clasifica como una caliza lumaquela oolítica. Se aprecian muy bien los restos de los caparazones, bastante triturados en general. Los oolitos están poco desarrollados. Tanto los oolitos como los caparazones se encuentran cementados por un polvo microgranudo de carbonato cálcico. En este depósito microgranudo no puede apreciarse con el microscopio la composición mineralógica.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	44,04
Residuo insoluble	0,10
Oxido de calcio	55,11
Oxido de magnesio	0,49
Anhídrido sulfúrico	0,20

Cálculo potencial de componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	98,30
Carbonato mágnésico	1,03
Sulfato cálcico	0,43
Residuo insoluble	0,25

Debido al alto grado de descomposición que presentaba la zona a la que pertenecía la muestra, se efectuó un análisis de los sulfatos y cloruros presentes, por la metodología expuesta anteriormente.

Total de sales solubles 3,70 %

Contenido en las sales solubles:

	(%)
Anhídrido sulfúrico	5,00
Ion cloruro	25,00
Oxido de calcio	10,00

Por consiguiente la muestra estudiada presentaba un contenido de:

	(%)
Anhídrido sulfúrico	0,18
Ion cloruro	0,90
Oxido de calcio	1,80

Estudio de la piedra sana perteneciente a la Sacristía

Esta muestra se tomó, porque aparentemente se encontraba en mejor estado que la anterior, si bien al desprenderla se fragmentó inmediatamente. Debido a la escasez de muestra, y a tener idénticas características que la anterior, no se realizó el estudio petrográfico.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	43,80
Residuo insoluble	1,00
Oxido de calcio	54,60
Oxido de magnesio	0,00
Anhídrido sulfúrico	0,20

Cálculo potencial de los componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	98,20
Carbonato magnésico	0,00
Sulfato cálcico	0,43
Residuo insoluble	1,00

Estudio de la piedra desintegrada perteneciente a la vidriera oeste

De esta muestra no se pudieron obtener preparaciones petrográficas debido a su estado completamente pulverulento.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	44,30
Residuo insoluble	0,25
Oxido de calcio	54,60
Oxido de magnesio	0,52
Anhídrido sulfúrico	0,15

Cálculo potencial de los componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	98,00
Carbonato magnésico	1,10
Sulfato cálcico	3,32
Residuo insoluble	0,25

Debido al alto grado de descomposición que presentaba la zona a la que pertenecía la muestra, se efectuó un análisis de los sulfatos y cloruros presentes, como sales solubles, de forma análoga a la expuesta anteriormente.

Total de sales solubles 3,80 %

Contenido en las sales solubles:

	(%)
Anhídrido sulfúrico	3,00
Ion cloruro	31,00
Oxido de calcio	10,00

Por consiguiente la muestra estudiada presentaba un contenido de:

	(%)
Anhídrido sulfúrico	0,11
Ion cloruro	1,17
Oxido de calcio	0,38

Estudio del material atacado procedente de las bóvedas

Debido al estado pulverulento fue imposible obtener preparaciones para el estudio microscópico.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	43,70
Residuo insoluble	0,44
Oxido de calcio	55,80
Oxido de magnesio	0,00
Anhídrido sulfúrico	0,40

Cálculo de los componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	99,00
Carbonato magnésico	0,00
Sulfato cálcico	0,88
Residuo insoluble	0,44

Estudio de la piedra caliza procedente del segundo cuerpo

El estudio petrográfico la clasifica como una caliza oolítica. Los oolitos que se aprecian en ella son de tamaño muy superior a los observados en la muestra de piedra correspondiente a la Sacristía, y se encuentran cementados por un agregado microgranudo no muy fino, que permite en general poner de manifiesto su naturaleza calcárea.

De esta muestra se obtuvieron dos preparaciones petrográficas.

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	43,32
Residuo insoluble	0,20
Oxido de calcio	56,25

Cálculo potencial de los componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	99,60
Residuo insoluble	0,20

Estudio de la costra adherida a la piedra superficial

Análisis químico:

	(%)
Pérdida al fuego	28,00
Residuo insoluble	31,50
Anhídrido sulfúrico	4,00
Oxido de calcio	36,95

Cálculo potencial de los componentes mineralógicos:

	(%)
Carbonato cálcico	60,50
Sulfato cálcico	8,40
Residuo insoluble	31,50

Estudio petrográfico de las piedras procedentes de canteras

La piedra de construcción empleada para la ejecución de arcos y bóvedas procedía de las canteras de Manilva (Málaga). Aunque el estudio histórico de la Catedral, que se ha consultado, no hace mención alguna, los rectores de dicho templo solicitaron, hacia el año 1956, a D. Leandro Lomeña de la Rubia, propietario de una cantera de mármol de Coín (Málaga), que les remitiese piedra procedente de las canteras de Manilva (Málaga), por ser ésta la empleada para la construcción primitiva del templo.

Al parecer esta piedra de construcción ha manifestado repetidas veces características de desintegración de la que son ejemplos el Ayuntamiento de Sevilla y el solado de la Plaza de la Constitución de Málaga.

Las canteras de Manilva se encuentran enclavadas a unos 10 km de dicha localidad, en la sierra de su nombre, colindante con la de Ojen.

La piedra se ha explotado en tres canteras distintas: Los Llanos, La Pedrera y La Gracejá, todas ellas en el lugar conocido por La Hedionda.

La cantera de los Llanos es la única que se encuentra actualmente en explotación. De dicha cantera se tomó una muestra de piedra caliza y otra de mármol rojo, esta última procedente de los estratos inferiores.

El estudio petrográfico de la piedra caliza la clasifica como organógena. Los restos orgánicos están empastados en un cemento microgranudo de carbonato cálcico que en algunos puntos se encuentra sustituido por granos ligeramente más desarrollados del propio carbonato recristalizado. Donde la recristalización es más intensa es en los rellenos de las fracturillas, que abundan en la roca. En las fracturas los cristales son de tamaño considerado. Las fracturillas pueden apreciarse casi a simple vista.

La muestra correspondiente al mármol rojo se clasifica como una caliza oolítica. Los oolitos no alcanzan el diámetro máximo que aparece en otras, y se observa de vez en cuando algún caparazón orgánico, por lo que puede considerarse como intermedia entre una caliza oolítica y una orgánica.

Existen multitud de fracturillas y microfracturas rellenas de carbonato cálcico recristalizado.

La cantera conocida por La Pedrera estuvo en explotación hasta principio de siglo, si bien todavía se aprecia perfectamente el frente de cantera.

La cantera denominada La Gracejá, esta situada en la vertiente opuesta a las otras dos anteriores. Al parecer antiguamente, se la conocía también con el nombre de La Hedionda; según opinión de los nativos es la cantera más antigua. Pertenece al tipo de cantera abierta y actualmente está abandonada.

Las calizas que suministran se han clasificado como organógenas. Contienen restos orgánicos muy abundantes y fáciles de observar, empastados en un cemento microgranudo calcáreo. El cemento está recristalizado en cristales y agregados fibrosos de carbonato cálcico recristalizado.

La muestra recogida en el lugar denominado La Hedionda se efectuó al mismo pie del manantial de aguas sulfurosas que existe en aquella comarca. En dicho lugar, al decir de los habitantes, nunca hubo explotación de la piedra; no obstante, se tomó una muestra con el fin de comparar su estado con el de las canteras antes estudiadas.

La petrografía la encuadra como una caliza organógena. Los restos orgánicos de calpionella y diatomeas se encuentran unidos por un cemento calizo microgranudo, en el que se observan microfracturas rellenas por un cemento calizo recristalizado.

En ninguna de estas rocas, es decir, de todas las canteras estudiadas, ha sido posible poner de manifiesto la existencia de sulfatos; por lo que parece evidente que su presencia, una vez utilizadas como material de construcción, se debe a un aporte externo.

La Basílica de Ntra. Sra. del Pilar de Zaragoza y la contaminación

Aun cuando parezca que la destrucción o alteración de los edificios públicos debida a la contaminación atmosférica, es un problema “pop” de nuestros días, en Inglaterra en 1273 se prohibió el empleo de pinturas a base de hollín para revocar las fachadas de las casas, costumbre que en aquel período medieval era normal y en 1306, sin intervención alguna del Santo Tribunal de la Inquisición, se ejecutó en Londres a un ciudadano por contravenir la citada orden; puede decirse que hasta 1819, la denominada Era Industrial no había causado más que pingües beneficios a los encopetados asistentes de las Cámaras Parlamentarias, pero en esta fecha se nombró un Comité Especial en el Parlamento, para que tratara de estudiar el modo de instalar las máquinas de vapor y los hornos industriales con el fin de originar el mínimo perjuicio a la población. Tras numerosas recomendaciones y tentativas de ley, se dictó una legislación al efecto en 1927, que puede considerarse como proa de la actual.

El dictamen científico acusó como agentes nocivos de los materiales de construcción —presentes en las atmósferas industriales— al dióxido de azufre, compuestos sulfurados, dióxido de carbono y hollín.

A partir de la década de los cuarenta la demografía y los centros industriales de Zaragoza han crecido a un ritmo inusitado y la contaminación industrial ha adquirido carta de naturaleza. En honor a la verdad no puede achacarse la culpa al fenómeno de la industrialización, sino a otro más dinámico y social llamado turismo, capaz de enturbiar con su calor humano y su frenesí impaciente la serenidad de los templos y la majestad de las obras de arte.

La localización de multitudes en edificios cerrados origina fuertes concentraciones de dióxido de carbono, azufre orgánico y hollín.

El hollín, sustancia de difícil definición, es una materia esencialmente alquitranosa con un elevado poder de adherencia con aquellos elementos sobre los cuales se deposita. Rellena los poros superficiales de las piedras porosas, tales como areniscas y calizas, y las ennegrece más o menos uniformemente, e incluso puede originar puntos de erosión sobre todo en los materiales calizos. La acción del hollín es relativamente lenta y en los lugares donde actúa, junto con él, se van acumulando una serie de productos pulverulentos terrosos e incoherentes, procedentes de los ácidos libres y sales solubles que el hollín aporta. Como compuestos típicos presentes en este tipo de alteración cabe citar los sulfatos amónicos y cloruro amónico, así como la presencia de materia orgánica.

Los organismos rectores de la Basílica de Nuestra Señora del Pilar observaron en 1972 una marcada alteración de los zócalos y frisos del templo, que comenzó por una pérdida del pulimento de los mármoles, seguido de picaduras y posteriores fisuraciones.

Las zonas en las que se manifiesta de forma inequívoca son la Sacristía y las dos capillas adyacentes, la dependencia-museo denominada “Tesoro de la Virgen”, los zócalos de la Santa Capilla y los correspondientes a la Adoración del Pilar.

Los zócalos están contruidos con un mármol negro leonado, procedente de una antigua cantera de Tortosa, cerrada en la actualidad, y los frisos de mármol de color ocre son oriundos de las canteras de Puebla, lugar próximo a Belchite en Teruel.

Los análisis petrográficos pusieron de manifiesto que los zócalos estaban integrados por fragmentos de caliza cementados por una matriz arcillo-calcárea, siendo precisamente en esta masa intersticial donde se ha localizado el ataque.

La acción agresiva había depositado sobre los elementos constructivos una serie de productos incoherentes como cristales de carbonato cálcico, sales de aspecto filiforme y motas negras alquitranosas. En la zona interna del zócalo no se apreció síntoma de alteración.

Mediante el análisis químico se comprobó la presencia de sales solubles y entre ellas la existencia de sales amónicas, en forma de cloruros y sulfatos.

Los frisos están formados por una caliza de naturaleza oolítica, cementada por una matriz dolomítica con ligeras impurezas de arcilla. Su alteración se manifiesta en forma de pequeñas picaduras en la masa intersticial dolomítica. Los productos incoherentes dejados por el ataque están constituidos por residuos terrosos y motas alquitranosas. Entre las sales solubles se encontraban sulfatos y cloruros amónicos, aunque en cantidades inferiores que en los zócalos. Las zonas internas de los frisos no presentaban acción agresiva.

De acuerdo con lo expuesto parece ser que la alteración ha tenido lugar en las caras externas de los zócalos y frisos y de preferencia en la masa intersticial arcilloso-calcárea de los mármoles.

Los frisos, por ser elementos de construcción en situación superior a los zócalos, deberían manifestar una alteración más acusada; sin embargo son los zócalos los que presentan un estado ruinoso. Ello se debe a la falta de homogeneidad física de los mármoles que constituyen los elementos de construcción, pues mientras la porosidad de los zócalos es fácilmente detectada, la de los frisos es nula, residiendo precisamente en esta compacidad su propia defensa.

Los distintos ensayos efectuados con los materiales del friso indujeron a pensar que la alteración no se debía a una aportación de sales solubles procedentes del exterior, sino a la acción agresiva de compuestos incorporados por un agente que actuaba en la superficie del paramento.

La presencia de los iones sulfato, cloruro y amonio en las zonas dañadas, y la existencia de estos mismos iones en gran cantidad en las sales solubles del hollín, parecen indicar que el ataque se debe a la presencia de una atmósfera contaminada en el interior del templo. Aserto corroborado por la presencia de motas negras de hollín en los productos incoherentes procedentes del ataque.

La contaminación de la atmósfera interior en construcciones públicas, como grandes iglesias y catedrales, es un hecho comprobado, así como la condensación de los productos deletéreos en los paramentos interiores. La condensación de estos productos es tanto más intensa cuanto más varíen las condiciones de temperatura y humedad. Se tiene experiencia de que la condensación juega un papel muy importante en la intensidad del ataque de las calizas.

Precisamente las zonas más dañadas de la Basílica son la Sacristía y la “cámara del Tesoro”, lugares donde los tiros de aire, que de forma intermitente se originan, por la apertura y cierre de los accesos al templo, determinan cambios termométricos e higrométricos en los zócalos y frisos dañados, que incluso pueden dar lugar a auténticos “ritmos de humedad”.

El SO_3 de la atmósfera reacciona con la piedra caliza de los mármoles, formando sulfato cálcico (yeso), y desprendiendo dióxido de carbono:

El anhídrido carbónico desprendido en presencia de humedad, actúa sobre la piedra caliza, formando bicarbonato cálcico soluble:

este bicarbonato cálcico se desplaza dentro de la masa pétreo haciendo perder compacidad, mientras que la formación de yeso lleva consigo un considerable aumento de volumen. Los productos de esta reacción forman un conjunto terroso de yeso y carbonato cálcico precipitado a partir del bicarbonato:

La presencia de sales amónicas, compuestos presentes en las sales solubles de todos los hollines, en mayor o menor cantidad, indican que esta sustancia ha contribuido a la alteración con una cierta intensidad.

Como resumen puede establecerse que durante los últimos años debido a una afluencia de público creciente, la atmósfera interior del templo se ha contaminado de productos y ácidos deletéreos, que al condensarse en las superficies de los zócalos y frisos, los alteran física y químicamente.

Los elementos constructivos más atacados son los zócalos, debido a su textura de mármol brechoide, que le confiere una acusada heterogeneidad, y en consecuencia una mayor atacabilidad.

La intensidad del ataque se ha puesto más en relieve, en aquellas zonas donde se han originado condensaciones, debido a corrientes de aire o cambios térmicos.

Como solución se aconsejó acoplar junto a la Santa Capilla de la imagen de Nuestra Señora un sistema apropiado que purificase los productos de la combustión de las velas votivas, así como los gases del ambiente, con el fin de amortiguar lo más posible la acción agresiva ya iniciada. Por ahora los resultados obtenidos son positivos.

Estudio de los materiales que constituyen los zócalos y frisos

Los zócalos presentan por su parte vista el aspecto que demuestra la foto 7, apreciándose unas esquirlas de color oscuro francamente angulosas, que se destacan de una matriz intersticial clara que las cementa.

Foto 7

Foto 8

La parte posterior, foto 8, permite apreciar que se trata de una auténtica brecha caliza obtenida por metamorfismo: origen típico de un mármol.

Análisis químico:

	Esquirlas oscuras (%)	Matriz clara (%)
Anhídrido silícico	4,8	8,5
Sesquióxidos	0,9	0,8
Oxido de calcio	51,6	49,6
Oxido de magnesio	1,0	0,7
Anhídrido sulfúrico	0,2	0,4
Pérdida al fuego	41,7	40,2

Cálculo potencial de los componentes mineralógicos:

	Esquirlas oscuras (%)	Matriz clara (%)
Caliza	92,0	88,5
Magnesita	2,1	1,5
Yeso	0,4	0,9
Arcilla	5,5	9,1

Los resultados expuestos indican que la roca que constituye el zócalo es un mármol integrado por fragmentos de caliza de un 92 % de riqueza, cementados por una matriz que contiene un 88 % de carbonato cálcico.

Determinación de las sales solubles en la matriz clara:

Se trataron 16 g de la muestra correspondiente a dicha matriz en un aparato extractor con agua destilada.

Una parte alícuota del líquido extraído se evaporó a sequedad, en una cápsula de platino, obteniéndose un residuo de 0,218 g, correspondiente a las sales totales, lo que representa, respecto de los 16 g iniciales, el 1,36 %.

Sales solubles 1,36 %

En otras partes alícuotas se determinaron los contenidos de anhídrido sulfúrico, iones cloruro, e iones amonio.

	Contenido	ponderal en las sales solubles	ponderal en la muestra
SO ₃	0,014 g	6,3 %	0,08 %
Cl	0,044 g	20,1 %	0,27 %
NH ₄	detectado	detectado	detectado

El estudio petrográfico pone de manifiesto la presencia de unas rocas oscuras de carbonato cálcico con la superficie picada por ataque. Dichas rocas oscuras están separadas por una matriz clara de naturaleza arcillo-calcárea, visiblemente alterada.

La alteración se manifiesta en forma de picaduras, que confieren a la superficie vista un aspecto terroso. En la masa intersticial se aprecian esquirlas pequeñas de carbonato cálcico oscuro.

Como norma general, las rocas oscuras destacan en relieve sobre la masa intersticial terrosa, lo que indica que el ataque se ha realizado preferentemente en la pasta cementante.

En un corte transversal del zócalo se aprecian fisuras en las rocas oscuras, rellenas de sales que afloran al exterior en forma de cráteres. Sobre la superficie externa se aprecia una película de sales que recubren al zócalo.

Los productos incoherentes dejados por el ataque están constituidos por cristales bien conformados de carbonato cálcico, cristales salinos filiformes y motas negras de hollín. También, y de forma aislada, se han apreciado, por microscopía, compuestos de color negro filiformes.

En la zona interticial de la parte interna del zócalo, es decir, la parte más sana, se aprecian oquedades, algunas de ellas recubiertas por geodas de caliza. En general, esta parte interna, no presenta síntomas de alteración.

Las propiedades físicas determinadas fueron:

Porosidad	0,81 %
Absorción capilar	0,52 %
Coefficiente de saturación	0,60
Densidad real	2,65 g/cm ³
Densidad aparente	2,63 g/cm ³

Los frisos presentan por su cara vista, un tono ocre con un bello pulimento. Su interior está completamente sano.

Con el fin de comprobar las características de estos materiales, se efectuaron los oportunos análisis químicos, que a continuación se detallan:

	(%)
Anhídrido silícico	2,28
Sesquióxidos	0,78
Oxido de calcio	42,60
Oxido de magnesio	8,20
Anhídrido sulfúrico	0,10
Pérdida al fuego	46,00

El cálculo potencial de los componentes mineralógicos fue:

	(%)
Caliza	76,1
Magnesita	17,9
Yeso	0,2
Arcilla	5,8

De todo lo expuesto se deduce que se trata de una caliza oolítica, con una matriz de naturaleza dolomítica e impurezas de arcilla.

Determinación de las sales solubles:

Se trataron 14,28 g de la muestra molturada en un aparato extractor con agua destilada.

Una parte alícuota del líquido extraído se evaporó a sequedad, en una cápsula de platino, obteniéndose un residuo de 0,042 g, correspondiente a las sales totales, lo que representa, respecto de los 14,28 g iniciales, el 0,29 %.

Dada la escasa cantidad de sales solubles, no se realizó el análisis cualitativo de iones extraños.

La observación mediante el microscopio pone de manifiesto que se trata de una caliza oolítica, y por consiguiente formada por precipitación química. La alteración se manifiesta en forma de pequeñas picaduras en la matriz dolomítica, dispuesta entre los oolitos de

caliza. Los productos incoherentes dejados por el ataque están constituidos por residuos terrosos y motas negras de hollín. Como es habitual en este tipo de mármoles se observan vetas coloreadas, que generalmente están formadas por materiales arcillosos. Esta heterogeneidad selecciona el ataque y allí se deposita por condensación el hollín, comenzando su acción agresiva.

Determinación de las propiedades físicas del friso:

Porosidad	0,00 %
Absorción capilar	0,00 %
Coeficiente de saturación	0,00
Densidad real	2,70 g/cm ³
Densidad aparente	2,70 g/cm ³

Estudio del hollín, recogido en la cúpula

Con el fin de detectar la procedencia de algunos iones extraños en el zócalo, tales como sulfatos, cloruros y amonio, y sobre todo los dos últimos, se realizaron los ensayos que se exponen:

Se trataron 6,18 g de la muestra recogida en las bóvedas y cúpulas, en un aparato extractor con agua destilada.

Una parte alícuota del líquido extraído se evaporó a sequedad en una cápsula de platino, obteniéndose un residuo de 0,835 g, correspondientes a las sales totales, lo que representa, respecto de los 6,18 g iniciales el 12,2 %.

Las sales solubles contenían un residuo alquitranoso y, por tanto de naturaleza orgánica, conforme se pudo observar en la cápsula. Con el fin de poder determinar las sales orgánicas, al menos aproximadamente, se calcinó el residuo anterior a 1.000°C. El nuevo residuo arrojó un peso de 0,257 g, que como es lógico, está integrado por las sales inorgánicas solubles. Por consiguiente:

Sales inorgánicas solubles	3,8 %
Compuestos orgánicos solubles	8,4 %

En otras partes alícuotas se determinó el contenido de SO₃, Cl⁻ y NH₄⁺.

	Contenido	en las sales totales	en las sales inorgánicas
SO ₃	0,0909 g	10,8 %	35,5 %
Cl ⁻	0,0700 g	8,3 %	27,2 %
NH ₄ ⁺	cualitativo, una gran cantidad.		

Conclusiones

Los productos y ácidos deletéreos, que engrandecen la atmósfera del interior de la Basílica, se condensan en determinadas zonas del centro, tales como zócalos y frisos, alterándolos física y químicamente. Se ha observado que la parte más atacada son los zócalos, constituidos por un mármol brechoide con una matriz clara que le confiere una heterogeneidad, y, por lo tanto, una mayor atacabilidad.

También se ha observado que el ataque más intenso se ha producido en aquellas zonas donde se han originado condensaciones, que han favorecido la agresión.

Lo mismo puede decirse respecto de los frisos, si bien, debido a la mejor calidad del mármol, su ataque está más atenuado.

La Iglesia Parroquial de Loeches y la formación de yeso

El problema que ahora se va a exponer, no tiene la popularidad de los anteriores: primero porque la iglesia de Loeches goza del humilde recato de que carecen los dos monumentos anteriores y, segundo, porque su deterioro no importa más que desde el punto de vista técnico y no artístico.

Tres puntos pueden considerarse como fundamentales en la alteración de este edificio: su edificación sobre un terreno eminentemente sulfatado, la ejecución con materiales calizos, y el empleo de dos tipos de piedra completamente heterogéneas.

Foto 9

Foto 10

La fachada oeste y el campanario, dispuesto en posición norte, se construyeron con obra de mampostería de una piedra caliza de color grisáceo, cuyo estado puede considerarse normal. Sin embargo, las fachadas sur y este, construidas con piedra caliza, de color crema, toscamente labradas presentan claros indicios de haber sufrido reformas posteriores, puesto que se han empleado piedras de demolición. Algunas piedras calizas de la fachada sur, de las columnas que sujetan el coro, manifiestan una descomposición total.

Como dato interesante cabe destacar, que según manifestaciones del arquitecto, que lleva a cabo la restauración, los daños de la piedra caliza se han agravado una vez eliminadas las cubiertas que se pretendían reformar.

La alteración parece localizada en la mitad este del templo, donde la mampostería está integrada por calizas de textura oolítica que de por sí presentan muy poca oposición a la acción agresiva de las aguas salinas y sobre todo sulfatadas, no debiéndose olvidar que las aguas freáticas de las comarcas madrileñas de Carabaña y Loeches presentan un elevado contenido de sales sulfatadas.

Foto 11

Foto 12

Durante los años que lleva de servicio este templo —al parecer data del siglo XVI— las piedras han ido recibiendo por acción capilar, las disoluciones salinas del subsuelo, no solo por la existencia de corrientes freáticas, sino por la propia humedad del agua de lluvia, transformándose cada columna en una auténtica mecha por la que ascendía la disolución salina agresora.

Las columnas han actuado como vehículos del líquido dañino hasta las piedras que forman las dovelas de los arcos formeros de la cúpula, y de las arcadas de separación de las naves.

En todos los casos de alteraciones pétreas aparece una emigración de agua hacia la superficie y con ella un enriquecimiento en sales de las capas externas de la piedra. Todo ello motiva una diferenciación de la capa externa.

Si en estas condiciones, como en el caso presente, se favorece la evaporación del líquido, por eliminación de la cubierta, tiene lugar el denominado “ritmo de humedad de la piedra”, cuyo proceso consiste en que la disolución salina se evapora en la superficie, secándose la zona interna, y efectuándose una concentración de sales en la zona externa. Esta zona llega a diferenciarse de la piedra de tal manera que parece distinta, incluso llega a formar una costra que puede separarse en lájas.

La acción, conforme se viene indicando en los estudios anteriores, se localiza en las zonas superiores, por haber sido allí donde se han centralizado los efectos de evaporación y cristalización de las disoluciones ascendentes.

En algunas columnas, se ha comprobado que ciertos elementos inferiores están más deteriorados que los superiores, debido a su mayor porosidad, puesto, que una vez más hay que manifestar, que la experiencia ha demostrado que si se disponen dos piedras una al lado de otra, la más porosa se deteriora más rápidamente que colocada entre piedras de la misma naturaleza.

Parece evidente que al eliminar la cubierta, no solo se ha favorecido el fenómeno del “ritmo de humedad”, sino que habrá aumentado la acción de bombeo, producida por evaporación del viento y la intemperie.

Las razones expuestas explican el mal estado de las piedras de sillería y las bóvedas de esta edificación, que implicaba un grave riesgo público.

En la actualidad se ha realizado una restauración a base de materiales modernos, si bien se mantiene el aspecto externo que la caracterizaba.

La zona de muro correspondiente a la fachada sur, presenta independientemente de las grietas por fallo de los cimientos, sillares en franco estado de alteración, hasta el punto de poder separar trozos de piedra.

En el interior del templo se observa que la alteración de la piedra se ha localizado en la parte superior de las arcadas de separación de las naves, y en los arranques de los arcos formeros de la cúpula.

En la parte inferior del templo, próxima al coro, se ha observado en una columna soporte de arco, que una de las piedras de mampuesto que la forman está totalmente desintegrada.