

Estudio de la degradación de los materiales pétreos y tratamientos para su restauración, en dependencias del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Madrid)

FRANCISCO MINGARRO MARTÍN (*)
M^{ra} CONCEPCIÓN LÓPEZ DE AZCONA (**)
RAFAEL FORT GONZÁLEZ (**)

RESUMEN Se estudian los granitos adamellíticos del Patinejo y Capilla del Patrocinio, dependencias del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, determinando sus características petrológicas y petrofísicas. Se analiza la procedencia de las humedades en los muros; se determina la naturaleza yesífera de las costras formadas en los granitos, y el comportamiento hídrico de dichos granitos, obteniéndose la génesis de los procesos de degradación: arenización, yesificación, desplazados, etc.

Finalmente, se analiza el nuevo comportamiento hídrico y variaciones petrofísicas del material adamellítico, después de haber sido tratado con consolidantes e hidrofugantes, con objeto de establecer las características idóneas para su mejor conservación y restauración.

THE WEATHERING OF THE STONES AND TREATMENTS FOR THEIR RESTORATION OF THE REAL MONASTERY OF SAN LORENZO DE EL ESCORIAL (MADRID)

ABSTRACT The petrological and petrophysical characteristics of the adamellitic granites of the out buildings "Patinejo" and "Capilla del Patrocinio" in the Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial are determined. The origin of the humidities of the walls, the gypsum crusts formed on the granites and the hydric behaviour of these materials are also analysed, these studies allowed the establishment of the weathering processes that affected these granites.

The adamellites have been treated with different water-repellents and consolidation products. After the treatment a new set of analyses were carried on hydric behaviour, petrophysic properties in order to determine the best conditions for their conservation and restoration.

Palabras clave: Alteration, Durability, Image digital processing, Petrography.

INTRODUCCIÓN

El Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, se comenzó a edificar en 1563, bajo la dirección del arquitecto Juan Bautista de Toledo, por encargo del Rey Felipe II, para conmemorar la victoria sobre los franceses en San Quintín (10 de Agosto de 1557), fue declarado Monumento Histórico Artístico en 1971, y trece años después, el 2 de Noviembre de 1984, la UNESCO, lo distingue con la categoría de "Monumento de interés mundial".

La idea de su construcción, aparte de la ya citada victoria de San Quintín, era ofrecer a Carlos V, padre del fundador del Monasterio, un grandioso mausoleo, y construir para su familia y para él mismo, un templo, panteón, centro de estudios y lugar de recogimiento y oración, para lo cual, no se regatearon gastos en su construcción, que termina bajo la dirección de Juan de Herrera en 1584.

El Monasterio, que comprende una serie de dependencias, como son: la Basílica, Panteones, Biblioteca, habitaciones reales... etc., se construye con gran austeridad, quedando toda la edificación comprendida en un inmenso cuadrilátero, construido con materiales graníticos, y las cubiertas con pizarra. Varias reconstrucciones, especialmente la realizada después de uno de los incendios más importantes el de 1671, y numerosas restauraciones, hace que se vea su imagen ligeramente modificada, especialmente con res-

(*) Catedrático de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid.

(**) Instituto de Geología Económica, C.S.I.C. Madrid.

pecto a la Basílica diseñada por Juan Bautista, y terminada por Juan de Herrera.

Este enorme conjunto arquitectónico, donde a modo de ilustración, podemos decir que tiene 1.200 puertas, 2.600 ventanas, 16 patios, 15 claustros y 88 fuentes, por no enumerar más elementos arquitectónicos, es lógico que esté continuamente en obras, pero atendiendo fundamentalmente a la conservación y mantenimiento que debe tener un monumento de tal envergadura, a pesar de los 410 años de su historia, las condiciones medioambientales y el progresivo aumento de la contaminación atmosférica, dejan sentir su impronta, degradando la piedra granítica de sus dependencias.

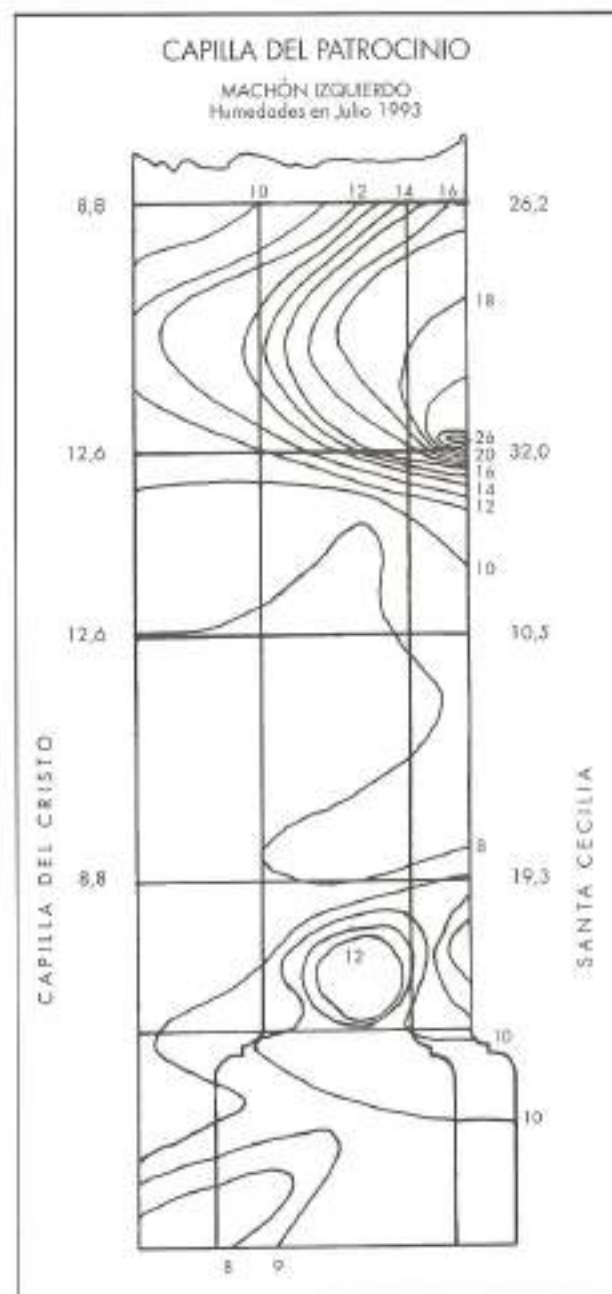


FIGURA 1.

DETERIOROS SUFRIDOS EN LA CAPILLA DEL PATROCINIO Y EN EL PATINEJO

La Capilla de la Virgen del Patrocinio, se encuentra situada en el interior de la Basílica, a los pies de la misma, en su lado derecho, tiene una imagen muy venerada por los fieles de El Escorial. El arco de medio punto que aparece sobre la escultura, presentaba sus elementos fundamentales, tanto la clave como las dovelas, afectados por procesos de formación de sales, debidos a las humedades que entraron por un hueco con puerta, abierto al Patinejo que linda con ésta Capilla, y que hicieron que se alterara el granito con el que está construida, produciendo continuos desprendimientos, tanto de sales como de los minerales procedentes del granito disgregado.

Otro problema que presentaba la Capilla, era el debido a las humedades que aparecían en las partes bajas de los muros, hasta casi 1,33 m del suelo, en el lateral que está situado el cuadro de Santa Cecilia y Santa Bárbara, mostrando incluso los registros de la luz, situados en el suelo, debajo de la tapadera y en su alrededor, una aureola verdosa, por formación de sales de cobre.

Esta Capilla, es simétrica con la que se encuentra en el lateral izquierdo de la Basílica, también a los pies, y que está dedicada al Cristo que preside su altar central, el realizado por Benvenuto Cellini, recientemente restaurado.

El Patinejo estudiado, todo el de material granítico, es el ya citado, que aparece lindando al E con la Capilla anterior, la parte N está dando al Sotocoro de bóveda plana, al W linda con el Pórtico de entrada, y al S con el Claustro.

En esa zona, aparecían varios problemas, la formación de costras negras de hasta 6 y 7 mm de espesor en las partes altas, y en las bajas, restos de antiguos tratamientos, emmugrecimientos, formación de sales y localmente humedades en paramentos, producidas por falta de conducciones en las cubiertas, lo que provocaba salpicaduras en los zócalos.

Las humedades que aparecen en este Patinejo, afectan al ángulo NW del Claustro principal bajo, pintado al fresco por el artista italiano Pellegrino Tibaldi y su taller, llegando en algunas zonas hasta más arriba de los 1,50 m que tiene el zócalo granítico, deteriorando incluso las partes bajas de los hermosos frescos que cubren las paredes del Claustro.

ESTUDIO DE HUMEDADES EN LA PIEDRA

Se han realizado varias determinaciones de humedades, en el muro oriental de la Capilla del Patrocinio, con objeto de cuantificarlas y calificarlas, para intentar determinar la procedencia y origen de las mismas.

Las determinaciones, se realizaron en los cinco sillares más bajos, hasta una altura de 2,67 m, donde los procesos de degradación se presentaban de manera más destacada, siendo necesario, realizar determinaciones de humedad en los sillares y en las llegadas del paramento, e incluso a veces, en la base de la pared, donde aparecían unos registros de electricidad muy degradados.

Las primeras determinaciones, se efectuaron el 27 de Julio de 1993, entre las 11 horas y las 13,52 horas, cuyos resultados se esquematizan en las figuras 1 y 2 de los dos machones izquierdos del altar de la Virgen. Como valor medio de la temperatura ambiental, se obtuvieron 20,1° C, y la humedad relativa ambiental en la Capilla era de 49,9%, correspondiendo a una temperatura de rocío de 9,1° C.

En el registro de electricidad, bajo el suelo, la temperatura medida fue de 17,2° C y su humedad del 66,9%; se

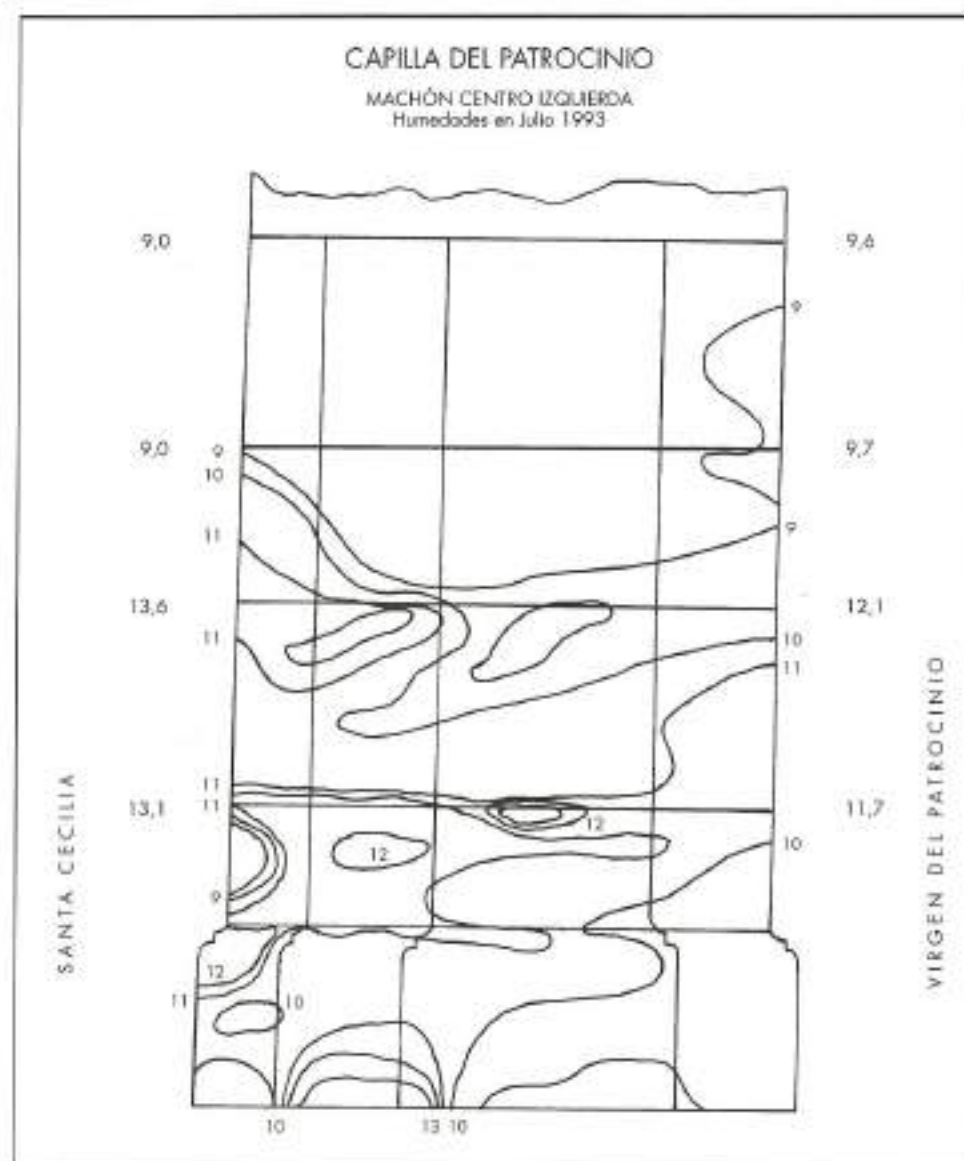


FIGURA 2.

apreciaban abundantes sales blancas y verdosas sobre el mismo registro eléctrico, debido sin duda, a sales de cobre.

Sobre los paramentos, se determinaron tres tomas en cada sillar, y en las llagas existentes entre ellos; en las gráficas, sólo se representan las curvas isohigrométricas, y al margen, los valores de las humedades, en las llagas respectivas, y sólo sobre los sillares de los extremos.

En principio, se puede observar, cómo las curvas isohigrométricas se concentran especialmente en el entorno de las llagas, o están, en parte, reguladas por la humedad de ellas, especialmente, en la llaga del 1,62 m con un 32,0% como valor relativo, y que viene a corresponder, a un 56% de humedad relativa. Estas humedades, se marcan muy especialmente en el machón de la izquierda, con gran humedad en las llagas, que son inferiores a las del machón centro-izquierda.

No obstante, se aprecia, que las máximas humedades, no aparecen en las bases de las columnatas, viniendo a demostrar, unos repartos, si bien relacionados con las llagas, distribuidos al parecer, de una manera un tanto anárquica.

Si se considera que los granitos de los sillares, están fuertemente degradados, se puede también inferir, que la zona, ha estado durante largo tiempo, impregnada en agua, generalmente procedente del suelo, y que todo el material sufrió así, una gran alteración, esencialmente en los feldespatos que han determinado un fuerte estado de arenización, también este proceso está muy marcado sobre las llagas y restauraciones sufridas; así va aumentando y aumentó la porosidad superficial de estos granitos, y hoy, según varía la humedad ambiental, ésta se reparte diferencialmente en los granitos, distribuyéndose estas humedades, según el estado de alteración, en que se encuentra el material granítico.

En las figuras 3 y 4, la representación corresponde a la distribución de humedades del 5 de Octubre, teniendo en cuenta, que en días anteriores, y este mismo día, la lluvia fue abundante, y sobre el Patinejo adjunto, que aún tenía el andamiaje de limpieza, y por lo tanto, el agua salpicaba en los distintos peldaños, y toda la fachada, estaba en su totalidad ampliamente empapada de agua.

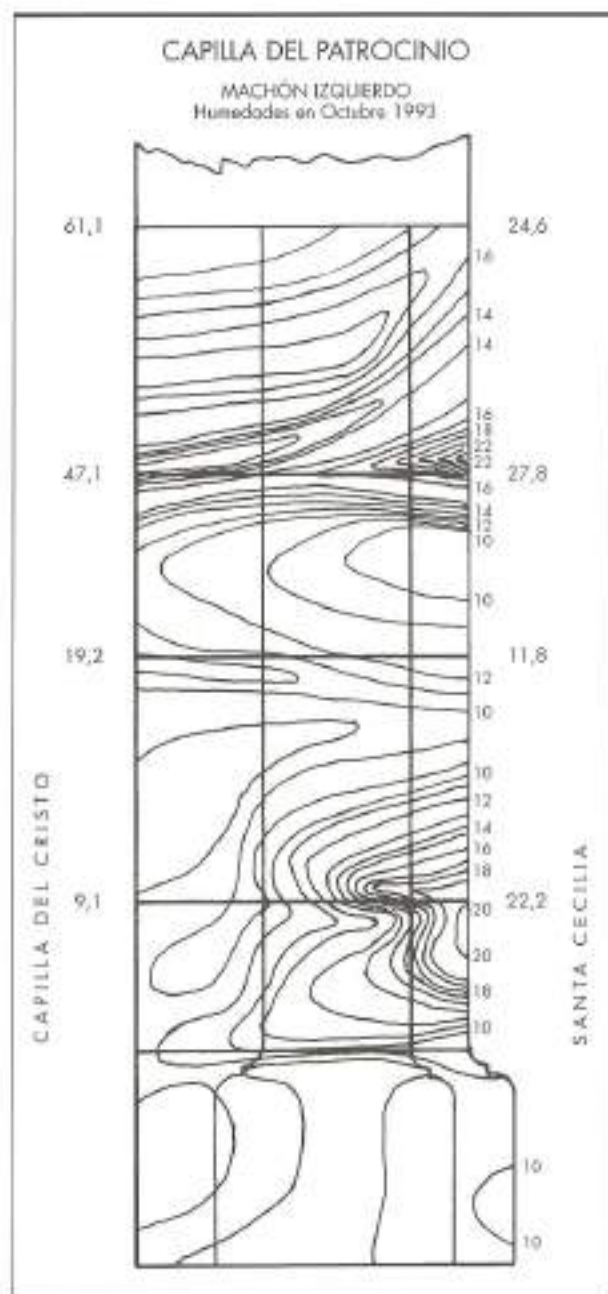


FIGURA 3.

Las determinaciones, se realizaron aproximadamente en las mismas horas, pero la temperatura ambiente, era de sólo 18,2° C, mientras que la humedad relativa, correspondía al 58,2%, con una temperatura de rocío de 13,4° C; en las partes altas de la bóveda, la temperatura era algo más elevada, pero sólo de 18,9° C con lo que la humedad relativa era únicamente de 55,2%.

Se determina, como la influencia de las llagas, es mayor que en Julio, especialmente en el machón izquierdo, también más alterado, por lo que la mayor humedad ambiental, también se concentra en los materiales más porosos; llagas y granitos alterados.

De todas formas, según alteraciones observadas en la Capilla, así como en el Patinillo adjunto, e incluso en el Claus-



FIGURA 5. Determinación de humedades, en el machón-columna, centro derecha de la Capilla del Patrocinio.

tro principal y las determinaciones allí realizadas, es evidente, que este ángulo del Edificio, fue objeto de grandes humedades en el suelo, que degradaron fuertemente las partes bajas, pero hoy, la humedad, parece deberse al aumento de la porosidad entonces adquirida, lo que conlleva al proceso de arenización cediéndose, por el aumento de porosidad detectado, en la degradación del mortero que rellena las llagas.

Análogamente, en el contacto de la bóveda central con éste paramento sur de la Capilla, y que precisamente la delimita con el Patinejo, también muestra fuertes procesos de arenización, debido sin duda, a la entrada de agua por la puerta del coro, que comunica éste con el Patinejo y que queda justamente encima de ésta zona de la bóveda. Hace poco esa puerta, ha sido restaurada y reconstruida, especialmente en su parte inferior, pues debía de sufrir una gran pudrición, por la continua impregnación áquea; por esta puerta, debió de entrar suficiente agua, como para pudrir la



FIGURA 6. Determinación de humedades, en la parte superior de la bóveda central, de la Capilla del Patrocinio.



FIGURA 7. Base de la columna izquierda de la Capilla del Patrocinio. Aspecto de los resultados de los procesos de arenización, desplacada, formación de sales y fragmentación de sillares.

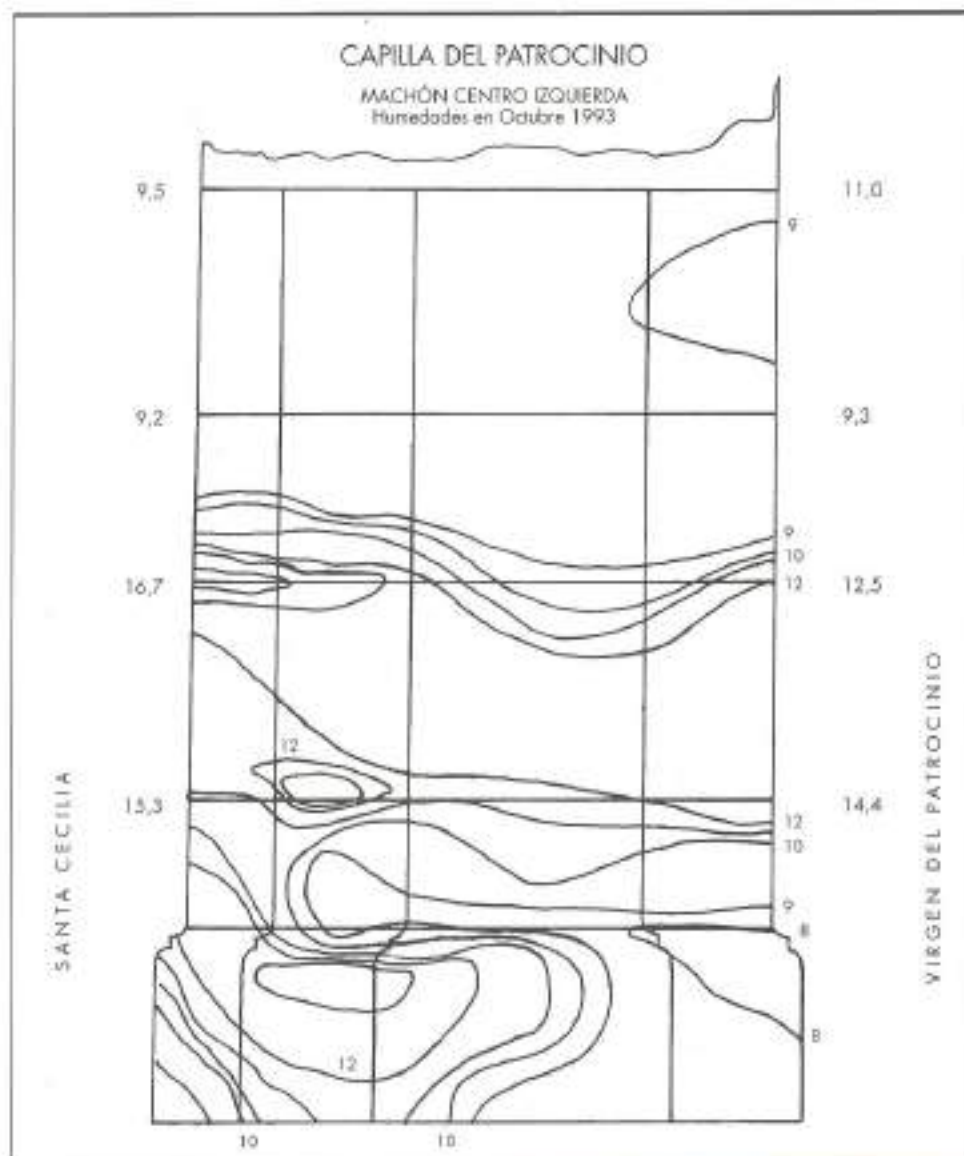


FIGURA 4.

FIGURA 8. Capilla del Patrocinio. Columnata derecha. Aspecto del efecto de humedades y formación de sales.



madera y penetrando en el parámetro, arenizar los sillares graníticos del interior.

PETROGRAFÍA POR MICROSCOPIA DE POLARIZACIÓN

El análisis de las rocas por Microscopía de polarización se ha realizado en las Rocas graníticas, sobre algunas muestras obtenidas en el Patinejo, así como en los desplazados, tanto de la Capilla como del Patinejo.

Se trata de una Roca plutónica, de grano medio a grueso, de 5 a 8 mm como término medio, con algunos Feldespatos, que llegan hasta los 19,6 mm y micas desde 2 mm, aunque a veces, aparecen Feldespatos potásicos, que llegan hasta los 19,6 mm, tal vez, denunciando un tránsito, entre rocas equigranulares a rocas con estructura porfídica. Las micas, exclusivamente de Biotita, a veces, forman agregados de hasta 10 mm.

Mineralógicamente, están formados especialmente por Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasas y Biotita, y como minerales accesorios, aparecen Rutilo, Circón e Ilmenita, junto con Clorita, Sericita y Pinnita en menores cantidades; se trata de una roca granítica, clasificable como una Adameilita biotítica. Fig. 9.



FIGURA 9. Fotomicrografía de Adameilita biotítica. Se aprecian los Cuarzos (blancos), Feldespatos (gris turbio), Plagioclasas con maclas poissintéticas (listado blanco y negro) y Biotitas (amarillentas).

El Cuarzo, aparece como cristales subidiomorfos, con extinción ondulante, y a veces inclusiones de Biotita y Plagioclasas, indicando su formación posterior a estos minerales.

Las Plagioclasas, son los minerales más idiomorfos, con inclusiones de Biotita y frecuentemente maclados según Carlsbad, presentando casi siempre, una clara zonación, con núcleo de Andesina, una zona de Oligoclase, y finalmente una corona albitica. Fig. 10.



FIGURA 10. Fotomicrografía de Plagioclasas con su zonación y alteración características, junto con los minerales propios de estas granitos.

Generalmente tienen transformaciones en el centro del mineral, por existir neoformaciones en Sericita y alteraciones actuales a agregados calcíticos, denunciando procesos de carbohidrólisis, que dejan en libertad el calcio de las Andesinas, aunque en general, se trate de Plagioclasas que denuncian su carácter ácido. Fig. 11.

Los Feldespatos potásicos, forman cristales alotriomorfos o intersticiales, con maclas de Carlsbad y de Microclina, con Perfitas en pequeñas venillas. También muestran alteraciones superficiales y en los bordes. Fig. 12.



FIGURA 11. Fotomicrografía de feldespato potásico en Adamellitas, alterado en su interior, y con abundantes Biotitas.



FIGURA 12. Fotomicrografía de una Plagioclasa con madas polimórficas en una Adamellita biotítica.

La Biotita es relativamente abundante, es el mineral más idiomorfo, formando a veces, agregados policristalinos, con frecuentes transformaciones a Cloritas, con formación de Rutilos.

Estas Adamellitas, se presentan fuertemente fisuradas, y en alteraciones intercristalinas, por procesos de carbohidrólisis, y especialmente en las del Patinejo, aparecen fuertes encostramientos negros, por procesos de yesificación de los Carbonatos cálcicos, procedentes de la alteración de las Plagioclasas.

Estas costras, llegan a presentar superficies muy amplias, que se separan del Granito, en placas que pueden llegar a tener 25 a 30 cm de diámetro, con espesores variables de 6 a 7 mm, y zonas de ampollas, que llegan hasta los 8 mm de grosor. Dichos encostramientos, que por el aumento de volumen que conlleva la transformación del Carbonato cálcico en Yeso, se desprenden de los sillares Fig. 13. Tam-

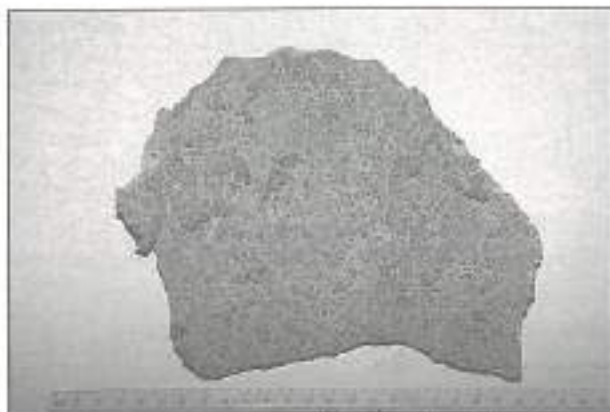


FIGURA 13. Aspecto de una costra yesífera sobre el material granítico del Patinejo. Se observan las características morfológicas de las ampollas.

bién se desarrollan sobre los morteros calcáreos, que durante restauraciones posteriores a la ejecución de la obra han rellenado las llagas de sillares, pero en su formación, también afectan a estos Granitos (Adamellitas), arrancando tanto la Roca granítica como el mortero de relleno de la llaga, Fig. 14.



FIGURA 14. Costra de yesificación formada en las llagas, entre sillares de Granito. Al formarse la costra, arranca el relleno de la llaga y la superficie de los sillares adyacentes.

En general, son muy fuertes los procesos de arenización de la Roca granítica así como los de enmugrecimiento general, y desplazado, especialmente en las zonas inferiores o de zócalos, Fig. 7, sin olvidar los encostramientos, procesos de



FIGURA 15. Formación y desprendimiento de placas en Adamellitas biotíticas, por efecto de ciclos de humedad-sequedad sobre sillares.



FIGURA 16. Aspecto de la formación de sales en los rellenos entre sillares graníticos.

alteración debidos fundamental y respectivamente a mecanismos de carbo-hidrólisis de plagioclasas y feldespatos potásicos, suciedad de contaminación ambiental, periodicidad alternativa de humedad-sequedad e incluso de heladicidad de la roca, ya en parte arenizada, y procesos de sulfatación, también debidos a la contaminación atmosférica.

Aunque no se han estudiado, ni reconocido las canteras de procedencia de estas Adamellitas biotíticas, pueden pertenecer a las formaciones graníticas del Sur de El Escorial, entre Las Mochetas, Zarzalejo, Valdemorillo y Norte de Gajapagar.

PETROGRAFÍA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La técnica analítica por Difracción de Rayos X, ha sido utilizada para reconocer, por una parte, la composición mineral de los materiales graníticos en que algún componente significativo y característico que por su escaso tamaño y propor-

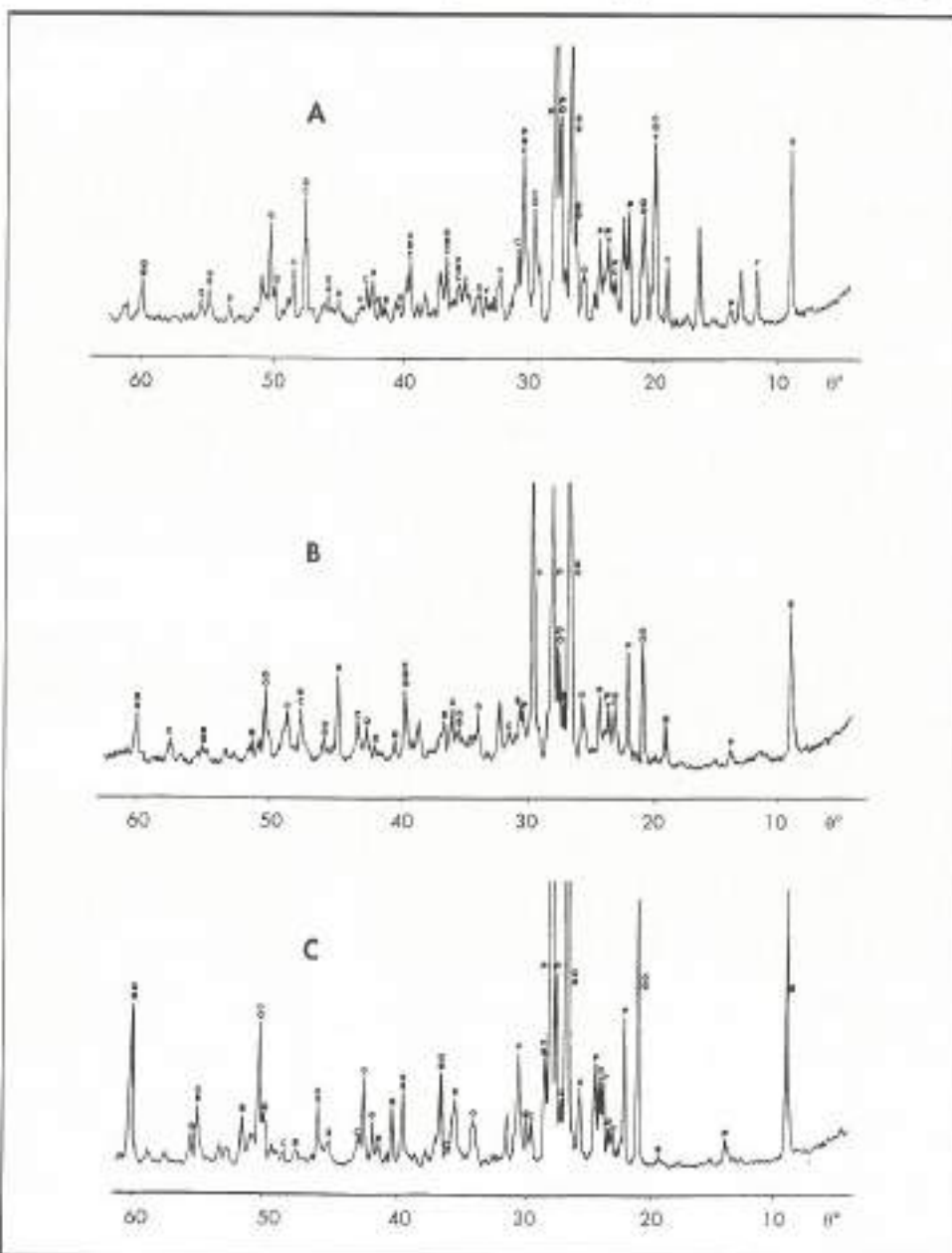


FIGURA 17. Difractogramas de Adamellitas biotíticas de la Capilla del Patrocinio.
A = Polvo entre lagos de sillares.
B = Alteración de sillares.
C = Granito adamellítico.
B = Biotita, Y = Yeso,
P = Plagioclasa, Q = Cuarzo,
O = Ortosa, C = Calcita.

ción, no hubiera sido identificado con la Microscopía de polarización y, por otra parte, para determinar la composición de aquellos otros productos pulverulentos de la alteración o costras formadas, que caracterizan el deterioro de las rocas y no se pueden identificar al microscopio.

De todos los análisis realizados, sólo se resumen en las figuras adjuntas, los más significativos y correspondientes a la Capilla del Patrocinio y al Patinejo, y ambos, comparándolos con el difractograma característico de los granitos adamellíticos que forman los paramentos estudiados.

Los difractogramas C de ambas figuras 17 y 18, utilizados como elemento comparativo, corresponde y corrobora la composición determinada por Microscopía de polarización, aparecen todos los picos característicos de su mineralogía fundamental: Cuarzo, Feldespatos potásico, Plagioclasas tipo Albíta y Biotita, pero considerando el estudio por Microscopía de polarización, en que se observan éstas Plagioclasas zonadas, con núcleos de Andesina y bordes de Albíta, es ló-

gico identificarlas como Albítas, pero en su destrucción por carbo-hidrólisis, el calcio liberado, forma Calcita, que es el otro mineral identificado, denunciando la degradación de éstas Adamellitas biotíticas, pues al destruirse el edificio petrográfico, por alteración de las plagioclasas, el proceso de arenización, es evidente.

El difractograma B, de la figura 17, corresponde al resultado de la alteración entre sillares, en la Capilla del Patrocinio, donde se denuncia la misma composición mineral que en la muestra C, pero en este caso, es el resultado de una fuerte degradación de la Adamellita; en el estudio comparativo, tal vez se pueda afirmar, que cuantitativamente, se presentan en menor proporción, excepto la Calcita, que es mucho más abundante.

Se podría pensar que la presencia de Calcita en la llaga, fuera como un estado de carbonatación de una pasta de cal, pero no se aprecia entre los sillares, ni tampoco se utilizarán estos morteros para la unión de los mismos; y si fueran de

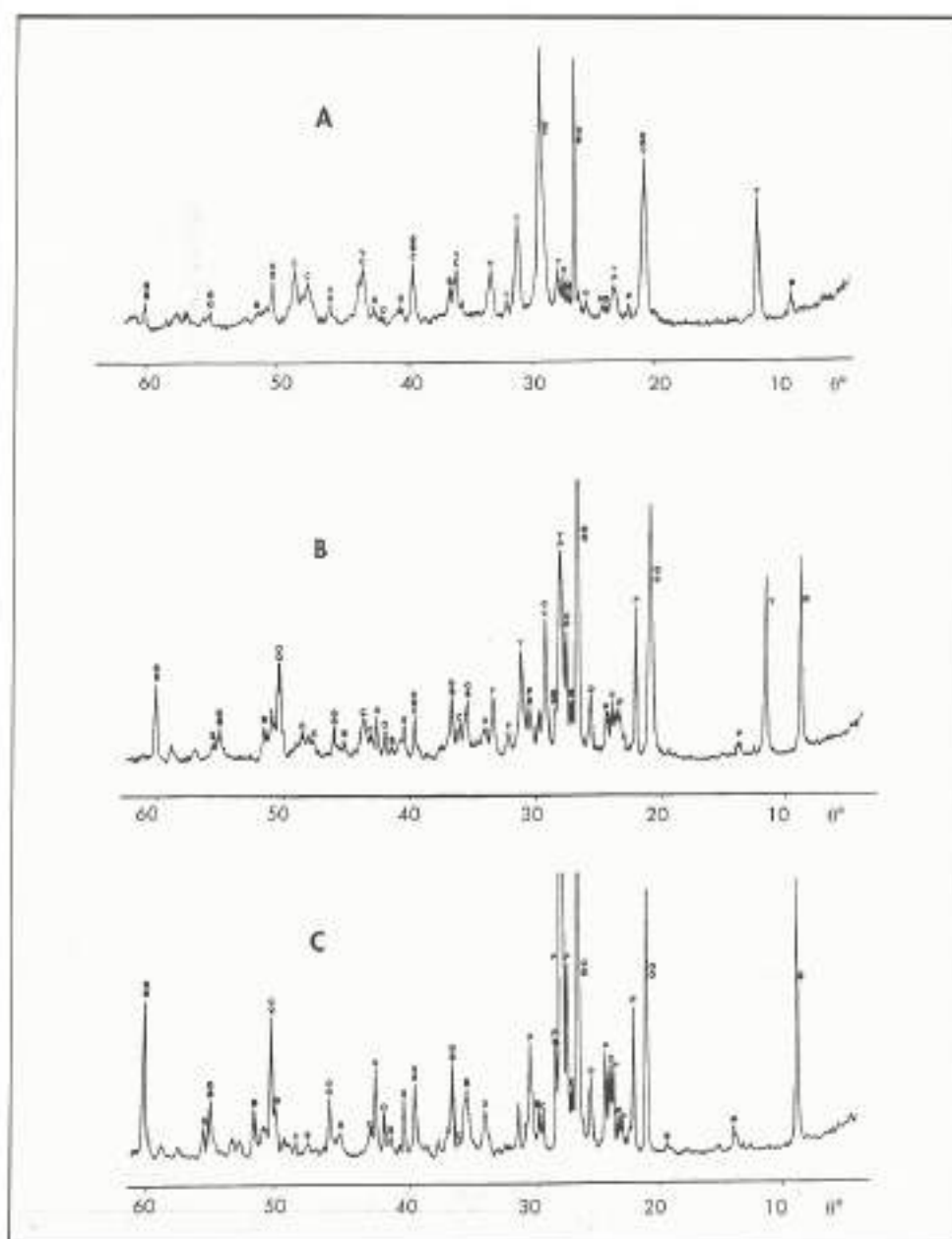


FIGURA 18. Difractogramas de Adamellitas del Patinejo. A = Encastamiento sobre relleno de llagas. B = Castro negro de la bóveda. C = Granito adamellítico. Y = Yeso, F = Feldespatos, Q = Cuarzo, O = Ortosa, C = Calcita.

restauraciones posteriores, es muy raro que no se aprecie el más mínimo relicto de Yeso, por lo que es necesario pensar, en un proceso de carbo-hidrólisis de los granitos, formando Calcita como subproducto del mecanismo, ya detectada su presencia en las Adamellitas, pero aquí, mucho más desarrollada, al no existir escurrientías y permanecer más tiempo el agua en contacto con los sillares y especialmente entre ellos.

En el difractograma A, de esta figura 17, se presenta otro tipo de polvo entre llagas de sillares, también correspondiente a la Capilla del Patrocinio y precisamente de la tercera llaga del machón izquierdo, donde las humedades son tan intensas y permanentes.

Se trata de un material arenoso, producido por los sillares, con análoga composición que las Adamellitas, pero a diferencia con la muestra anterior, aquí sí se hacen presentes algunos picos característicos del Yeso, además de la Calcita, aunque ésta, no sea tan abundante; por lo que si se podría pensar en este caso, en una restauración con mortero de cal, para tapar la gran llaga, ocasionada por la alteración de los sillares; de todas formas, los restos de este material de relleno, son escasos, ya que los procesos de alteración y pulverización los hacen desaparecer pronto.

Por otra parte, en la figura 18, se representan algunos productos de la degradación de estos granitos, al menos, de los que quedaban cuando se visitó el Patinejo, ya casi limpio en su totalidad por abrasión con chorro de arena.

El difractograma B, pertenece al análisis de las grandes costras formadas en la pequeña bóveda de cañón por la que este Patinejo se comunicaba con el pórtico de la Basílica. Según se aprecia, la costra, está formada por los minerales característicos de la Adamellita, aunque en menor proporción, especialmente en lo referente a los Feldespatos potásicos, sobre la cual, y a expensas de la misma, se ha formado; se puede ver la gran abundancia de Yeso y la escasa presencia de Calcita, lo que indica que ésta última, una vez formada, sufre un proceso de yesificación, propio de las atmósferas contaminadas por óxidos de azufre, sin agua de escurrientía, pero con mucha humedad sulfúrica, al formarse el Yeso a expensas de la Calcita, el aumento de volumen producido, hace el efecto de cuña y facilita que se desprendan de los sillares, estas costras negras, con su enmugrecimiento propio, también procedente de la contaminación por aerosoles orgánicos.

El difractograma A, de esta figura 18, corresponde también a un encostramiento formado sobre un mortero de relleno de llagas en el parámetro de saliente de éste Patinejo. En este caso, el encostramiento, ha afectado al mortero de cal y al granito de ambos sillares, por eso se aprecian, los picos característicos del Cuarzo, Biotita, Feldespatos potásicos... etc., pero están fuertemente marcados, los correspondientes a la Calcita del mortero y al yeso propio de la sulfatación de ella, junto con los propios del granito, que arrastra la costra al desprenderse.

Todo lo anterior, viene a determinar y demostrar también, que éstos morteros alcalinos, tan utilizados en la restauración de sillares, aceleran el deterioro de las rocas ácidas tipo adamellítico.

PETROFÍSICA Y COMPORTAMIENTO HÍDRICO

La degradación de los materiales pétreos, guarda una íntima relación entre la composición de la roca, sus propiedades petrofísicas y su comportamiento hídrico, ya que es el agua, con su quimismo particular, la que regula toda alteración química.

El comportamiento hídrico, se ha realizado según las recomendaciones de la RILEM (1980), a veces modificadas según las características peculiares de la roca.

Los granitos estudiados (Adamellitas biotíticas), presentan pesos específicos reales (promedios) de 2.693,705 Kg-m⁻³, pudiendo llegar, especialmente en la Capilla del Patrocinio, a 2.695,78 Kg-m⁻³, y en el Patinejo a 2.691,63 Kg-m⁻³, lo que aun estando entre valores normales, si se denuncia una mayor alteración en estos últimos.

Respecto a los pesos específicos aparentes, siempre menores, en los Granitos de la Capilla, muestran un descenso del 2,95%, mientras que en el Patinejo, este descenso llega hasta el 3,50%, lo cual corrobora un alto grado de deterioro, especialmente en el Patinejo, y que también justifica, el bajo índice de compacidad, en que como valor medio, sólo llega a 0,9675.

POROSIMETRÍA

La porosidad determinada por inyección de mercurio a altas presiones, y que analizan los poros de tamaños comprendidos entre 200 y 0,005 µm, da unos valores de porosidad de 3,14%, siendo los poros más abundantes, los correspondientes a la microporosidad (7,5 µm a 0,005 µm), que representan el 1,93% (Tabla I), mientras que los poros de mayor tamaño sólo son el 1,21% restante.

Peso específico aparente	2.597,36 kg-m ⁻³
Peso específico real	2.693,71 kg-m ⁻³
Compacidad	0,9675
Porosidad [200-0,005 µm]	3,14%
Macroporosidad [200-7,5 µm]	1,21%
Microporosidad [7,5-0,005 µm]	1,93%
Porosidad atrapada	61,00%
Porosidad libre (circulante)	39,00%
Tamaño poro	
Media	0,10 µm
Mediana	1,90 µm
Porosidad accesible al agua	3,24%
Saturación	1,24%
Sorción	
24 horas	1,08%
Grado 24 horas	80,75%
Tiempo rápida	0,04 horas
Rápida	0,95%
Grado rápida	70,22%
Desorción	
24 horas	1,12%
Grado 24 horas	90,37%
Tiempo rápida	1,96 horas
Grado rápida	56,30%

TABLA I. Porosimetría, Petrofísica y comportamiento hídrico del Granito.

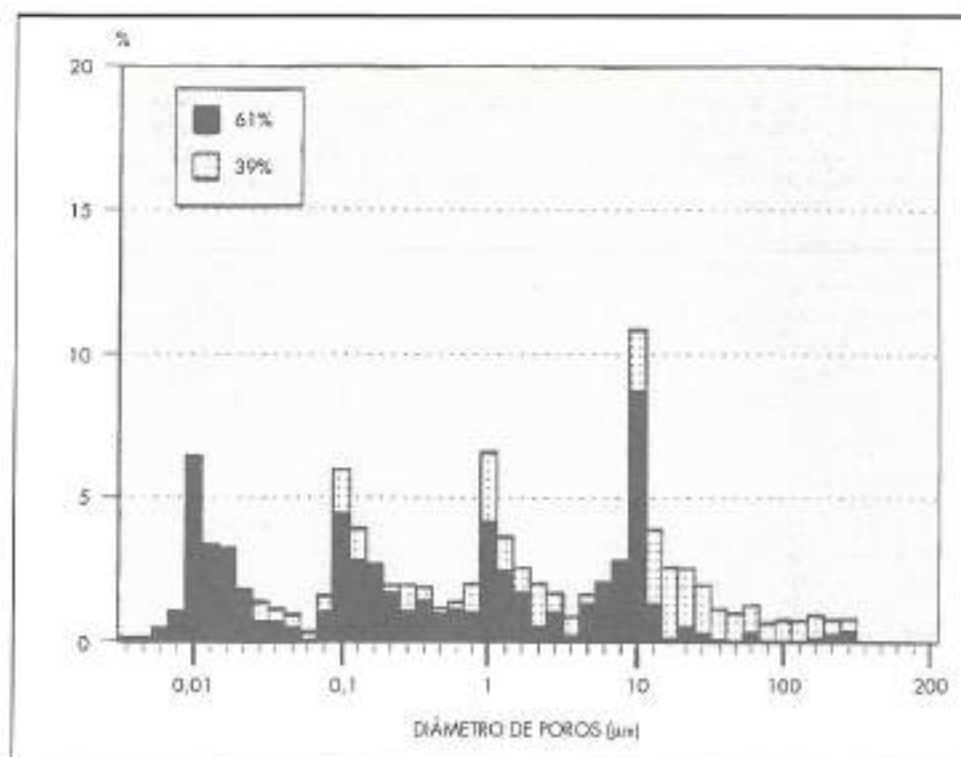


FIGURA 19. Histograma porosimétrico del Granito adamellítico sin tratamientos. En negro Porosidad atrapada y en puntos la Porosidad circulante.

La distribución de tamaño de poros, es multimodal, localizándose la moda más importante, en el intervalo 10-20 µm, con un 10,86% de la distribución, lo que sólo representa el 0,34% de la porosidad de la roca. Las otras modas, no llegan a superar el 6% de la distribución (Fig. 19), y todas localizadas en tamaños inferiores 1-2 µm, 0,09-0,1 µm y 0,01-0,02 µm.

Hay que considerar que el 61% de la porosidad, corresponde a la porosidad atrapada, y sólo un 39% a la circulante, generalmente, en los tamaños mayores, y cuanto menor es el tamaño de los poros, menor es también la porosidad circulante; lo que podría considerarse como que la porosidad, es por alteración de la roca, y no por una fisuración.

COMPORTAMIENTO HÍDRICO

A este respecto, la saturación de agua media es del 1,24% (Tabla I), que corresponde al 3,24% de porosidad accesible al agua.

Se ha analizado la cinemática de los procesos de sorción (absorción libre de agua) y de desorción (evaporación), como factores petrofísicos que mejor determinan el deterioro de las rocas, y los procedimientos más adecuados de tratamiento para su conservación.

Los Análisis de Sorción, se han realizado a 21,0° C, y un 73,0% de humedad relativa, mientras que los de Desorción, se realizaron a 17,0° C y un 70% de humedad relativa; la Sorción de estos granitos a las 24 horas, es de 1,08%, que corresponde a un grado de Sorción del 70,75% del agua de Saturación total de la roca (Figura 22), y en su cinemática resulta que la Sorción rápida, se efectúa en sólo 2 minutos, con una Sorción de 0,95%, que corresponde al 70,22% del agua de saturación, siendo muy lenta la Sorción restante del 20,78%, por lo que se manifiesta netamente la porosidad por alteración de la roca y la debida a la alteración intercrystalina o de fisuración-alteración que, poco a poco, tienden a resquebrajar y deteriorar la roca.

Las pérdidas por evaporación del agua sorbida o desorción, a las 24 horas, es del 1,12% (Figura 23), que corresponde a un grado de desorción del 90,37% del agua de saturación, siendo mucho más lenta la pérdida de agua que al cabo de 8 días, sólo ha perdido el 93,89%, lo cual, pone de manifiesto la existencia de dos tipos de poros fundamentales, uno procedente de la alteración de la roca, muy importante y otro, de microfisuración intercrystalina, por inicios alterológicos.

La desorción rápida media, es de 1,96 horas, que puede llegar al 0,90%, es decir, con un grado de desorción (evaporación) del 56,30% del total del agua sorbida en su saturación.

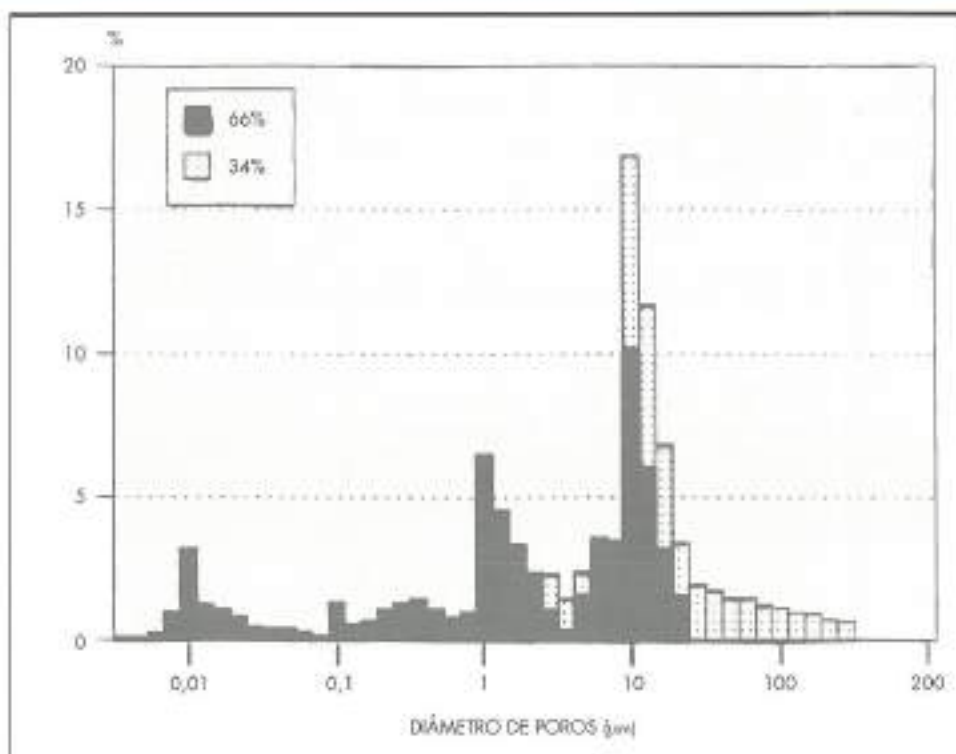
De esta manera, se pone de manifiesto, la existencia de una fuerte porosidad por alteración (macro y mesoporosidad), de fácil absorción y evaporación de agua y otra (microporosidad) que más lentamente, toma el agua y la deja evaporar. La primera, es por desaparición de minerales por degradación y la segunda, por iniciación de esa alteración, por intrusión de agua entre los minerales y que es la correspondiente a los poros más finos.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El agua, se introduce entre los minerales que forman el Granito adamellítico, atacándoles por hidrólisis, especialmente a las Plagioclasas, que son menos resistentes, proceso que se acelera cuando el agua contiene iones carbonato o sulfato, procedentes de los ácidos que contaminan y acidifican las aguas, ya que además intervienen procesos físicos, al formarse nuevos minerales.

De esa manera, se forma primero Carbonato cálcico, tomando este ion de las Plagioclasas degradadas; posteriormente, o casi de una manera simultánea, dicho carbonato, se descompone por la presencia de ácido sulfúrico, formando Yeso y aumentando el volumen molecular y consiguientemente se originan las costras negras, que se desprenden

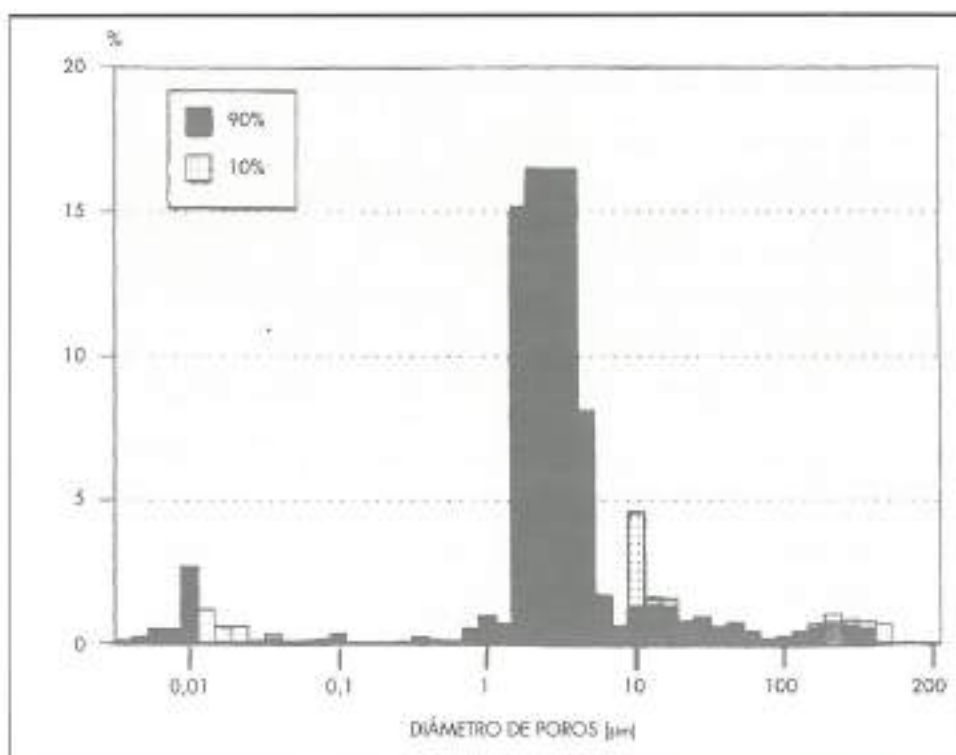
FIGURA 20. Histograma porosimétrico del Granito adamantítico tratado con Consolidante. En negro la Porosidad atrapada y en punteado la Porosidad circulante.



arrancando el Granito en forma de escamas. Cuando eso ocurre, el agua penetra más fácilmente hacia el interior del Granito y así sucesivamente, el proceso va prolongándose de manera exponencial.

Todo ello determina, la gran porosidad accesible al agua de estos materiales, pero el conjunto del proceso, también se pone de manifiesto, con la gran Sorción de agua en los primeros momentos, que evidencia el aumento del tamaño muy

FIGURA 21. Histograma porosimétrico del Granito adamantítico tratado con consolidante + hidrofugante. En negro la Porosidad atrapada y en punteado la Porosidad circulante.



grande de poros y el porqué, en la porosidad más pequeña predominan los poros más finos, pero esta porosidad, es esencialmente atrapada, el agua no puede circular, no hay encostramientos, pero va atacando a los minerales de el granito.

Así se justifican los desplazados de El Patinejo, como mecanismo fundamental, que también va acompañado de los desprendimientos, por aumento del agua y evaporación de la misma, e incluso los mecanismos de heladas, que también conllevan un aumento de volumen, ocasionando el desplazado de estos granitos.

Por otra parte, estas humedades y agua, incluso la tomada del ambiente por condensación y más aún, debido a proceso de antiguas aguas de capilaridad y de entrada directa por la puerta de el Coro, que afectaron especialmente a la Capilla de El Patrocinio y que hoy han aumentado ya la porosidad de dichos granitos y así aumentan también la capacidad de retención de agua por condensación y como en esta Capilla, la contaminación es mucho menor, el proceso fundamental de hidrólisis conduce únicamente a una fuerte arenización de el granito.

ESTUDIO DE LOS PRODUCTOS CONSERVANTES

Los procesos de deterioro determinados, de fuerte carbohidrólisis e incluso de gran sulfatación en los granitos, conllevan a la formación de desplazamientos, encostramientos y también en general, a una gran arenización de los materiales.

Para paliar este continuo estado de deterioro, se han tratado las probetas con productos adecuados para detener la alteración y mejor conservar la piedra existente, analizando su comportamiento hídrico y variaciones petrofísicas ante conservantes e hidrofugantes.

Así, para aglutinar y pegar los minerales sueltos, las probetas correspondientes, se han consolidado, tratándolas con compuestos alquilsilicatos, del tipo de ésteres orgánicos de

ácido silícico, mediante inmersión durante 3 minutos. Posteriormente, algunas se conservaron para ser tratadas pasados 10 días, con hidrofugante del tipo de metilsiloxano. Ambos productos, elaborados por la firma TEXSA, bajo la denominación comercial de Cotefilm END y el Cotefilm HF, como consolidante e hidrofugante respectivamente.

CONSOLIDACION

Respecto al tratamiento con consolidante, se aprecia, como es natural, un aumento del peso específico, de 1,0%, mientras que el peso específico real, representa un 0,74% de disminución, propio del sólido introducido entre sus poros, y así, su compactibilidad, también aumenta en un 1,23%.

Lo más significativo, es el descenso de la saturación, en un 39,47% y sobre todo, la porosidad accesible al agua, que desciende en un 39,80%.

POROSIMETRÍA

La aplicación de ese consolidante, produce una disminución de la porosidad (inferior a los 200 μm), del orden del 27,71%, lo cual, se traduce esencialmente, en una disminución de la microporosidad (inferior a 7,5 μm), en un 51,81%, mientras que la macroporosidad (entre 7,5 μm y 200 μm), presenta un aumento del 9,09%, lo que viene a indicar, que hay poros o fisuras tan grandes, que forman la superficie de la roca, y al verse sus superficies recrecidas por el consolidante, disminuyen su volumen, y entran en el sistema poroso analizado entre 200 y 0,005 μm .

Respecto a la distribución del tamaño de poros, también se modifica (Figura 20), ya que la moda, entre 10-20 μm , se acentúa con un valor máximo de hasta 17%, mientras que las otras modas, dentro de la microporosidad, no superan el 3%, e incluso, existe una distribución importante de los poros, entre 0,1 y 1 μm .

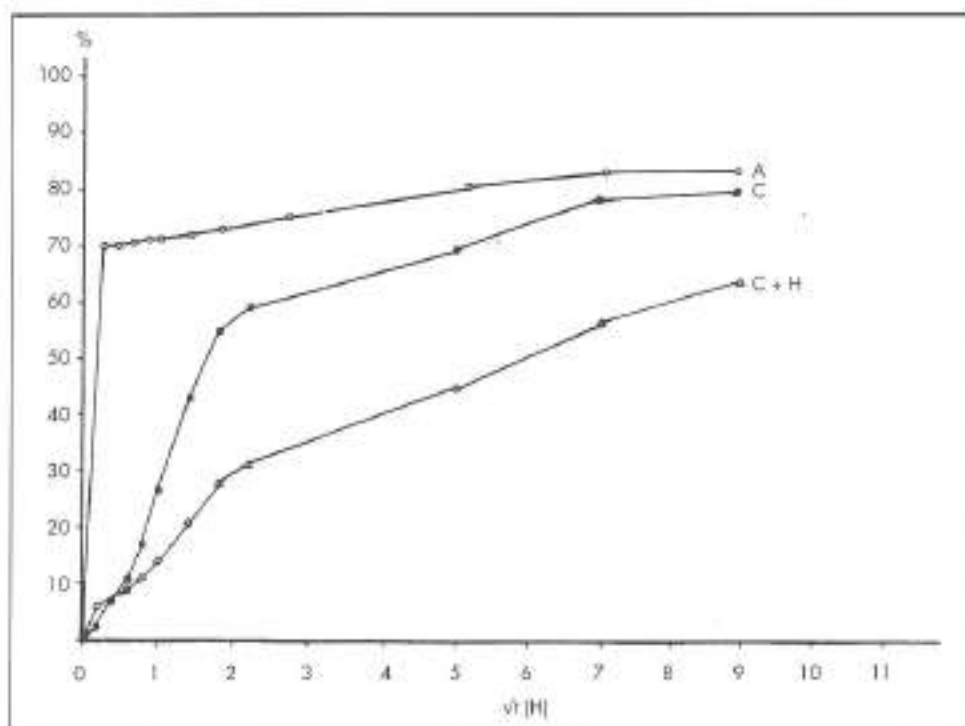


FIGURA 22. Cinemática de la Sorción en el Granito adamantino. A = Sin tratamiento, C = Con Consolidante y C + H = Tratado con Consolidante + Hidrofugante.

Lo que también hay que considerar, como efecto fundamental al cerrar los poros de la roca, es que toda la porosidad inferior a los 5 μm , es atrapada, por lo que al no haber circulación de fluidos, las aguas intersticiales, no alteran la roca. El conjunto de la porosidad atrapada, en este rango porosimétrico, aumenta en un 8,71%, con el consiguiente descenso de la porosidad circulante.

COMPORTAMIENTO HÍDRICO

Después de haber consolidado el granito, se aprecia un notable descenso de la porosidad accesible al agua (Tabla II), de un 16%, así como del agua de saturación, que sólo llega al 1,05%.

Respecto a la cinemática de Sorción (Figura 22), a las 24 horas, el agua tomada, sufre un descenso del 31,48%, con notable disminución del grado de saturación, o porcentaje tomado del agua de saturación (descenso de un 13%), lógicamente, aumenta mucho el tiempo de Sorción rápida, y el

agua tomada, es menor, luego los poros, son menores por el efecto de la consolidación.

Todo ello explica, el porqué la evaporación es menor, y el tiempo de Desorción rápida, es también menor, ya que los poros, al ser más pequeños, presentan una superficie más reducida en contacto con el aire.

Si transcurridos 10 días, se vuelve a consolidar la roca, la porosidad accesible al agua disminuye en un 20,37% y el agua de saturación lo hace en un 26,67%, lo que pone de manifiesto la mayor consolidación adquirida por la roca y la disminución de la penetrabilidad del agua con que se hace la roca más inalterable.

HIDROFUGACIÓN

Después de la consolidación, se procedió a hidrofugar el granito con objeto de analizar su comportamiento antes de ser aplicados estos tratamientos en el monumento.

Como es natural, y aunque en este tratamiento, prácticamente no se rellenan los poros, o lo hacen las siliconas en muy poco espesor, sí se aprecia, una disminución de la densidad real, y el consiguiente aumento de la aparente, puesto que se introduce un nuevo sólido en el material.

POROSIMETRÍA

La aplicación del hidrofugante, no modifica sustancialmente esta porosidad, inferior a los 200 μm , sólo disminuye en un 4,4% (la cantidad de silicona es muy pequeña), pero respecto a la roca, sin tratamiento, la disminución es próxima al 31% (Figura 21).

Con este nuevo producto, se aprecia un aumento de la macroporosidad (200-7,5 μm), en total del 17,35%, respecto al granito sin tratar, como consecuencia de la incorporación de nuevos poros al sistema, pero en este caso, y sólo por la adición del hidrofugante, el aumento, es del 5,97%, mientras que al tratarla con el consolidante, el aumento resulta ser del 10,74%, luego el consolidante, al rellenar más los poros, incorpora más cantidad de poros que el hidrofugante.

La microporosidad (entre 7,5 y 0,005 μm) tiene una disminución muy importante, del orden del 61%, con lo que se evidencia, la efectividad del tratamiento, especialmente, en lo referente a los procesos de alteración de minerales, por no poder penetrar el agua entre ellos, y fundamentalmente, por mantenerlos aislados del agua. La porosidad atrapada, aumenta en un 47,5% (agua que no circula), y lógicamente, la porosidad circulante disminuye en el 74,36% respecto a la roca sin tratamiento, y del 70,58% comparándola con la muestra que únicamente tiene consolidante, corroborando todo lo anteriormente indicado. El tamaño medio de los poros aumenta (incorporación de poros al sistema porométrico), en un 155,56%.

COMPORTAMIENTO HÍDRICO

El primer efecto que hay que destacar, cuando el granito ha sido tratado con consolidante, seguido por el hidrofugante, es que el agua que puede acceder al interior del material, disminuye, quedándose prácticamente en la mitad, y lógicamente, también lo hace en el mismo porcentaje el agua de saturación (Tabla II).

Análogamente, la cinemática de absorción, también se acentúa, resultando muy lenta la Sorción rápida de agua que aumenta en un 98,77%, es decir, que lo hace mucho más lentamente, y también en menor cantidad y proporción, siendo sólo el 27,94% de su escasa agua de saturación.

La disminución del tamaño de los poros, hace también que la evaporación o desorción, sea más lenta en 24 horas, e

	C	C + H
Peso específico aparente	2.599,55 kg m ⁻³ (2.606,65 kg m ⁻³)	2.621,55 kg m ⁻³
Peso específico real	2.666,98 kg m ⁻³ (2.665,12 kg m ⁻³)	2.664,90 kg m ⁻³
Compacidad	0,9728 (0,9742)	0,9837
Porosidad (200-0,005 μm)	2,27%	2,17%
Macroporosidad (200-7,5 μm)	1,34%	1,42%
Microporosidad (7,5-0,005 μm)	0,93%	0,75%
Porosidad atrapada	66,00%	90,00%
Porosidad libre (circulante)	34,00%	10,00%
Tamaño poros		
Medio	0,19 μm	0,23 μm
Mediana	16,6 μm	7,5 μm
Porosidad accesible al agua	2,72% (2,58%)	1,63%
Saturación	1,05% (0,99%)	0,62%
Sorción		
24 horas	0,74%	0,28%
Grado 24 horas	70,58%	45,40%
Tiempo rápido	1,96 horas	3,24 horas
Rápido	0,58%	0,17%
Grado rápido	55,06%	27,94%
Desorción		
24 horas	0,89%	0,41%
Grado 24 horas	85,21%	66,82%
Tiempo rápido	1,00 horas	1,06 horas
Grado rápido	50,83%	38,35%

Tabla II. Porosimetría, Petrofísica y comportamiento hídrico del Granito rojo. C = Consolidante, C + H = Consolidante + Hidrofugante. (-) = Doble consolidación.

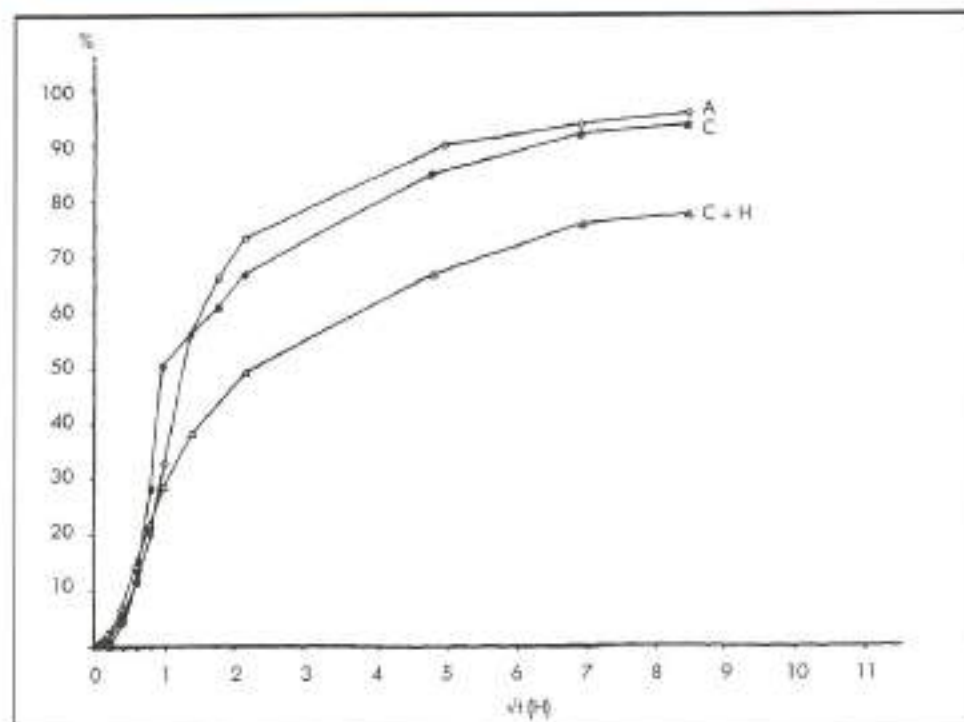


FIGURA 23. Cinemática de la Desorción en el Granito adamellítico. A = Sin tratamiento, C = Con Consolidante y C + H = Tratada con Consolidante + Hidrofugante.

incluso, la desorción rápida, es decir el agua que se evapora, también lo hace más lentamente, por tener menor cantidad de agua, y ser el tamaño de los poros, también más pequeño.

CONCLUSIONES

Analizados los procesos de degradación de los granitos del Patinejo y Capilla del Patrocinio del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, se concluye:

1. Ambos materiales son idénticos: Adamellitas biotíticas.
2. En la Capilla, predominan los procesos de arenización, acelerados por humedades antiguas, que aumentando la porosidad, aún continúan tomando el agua de la existente en la atmósfera, que se condensa en el granito y en las llagas de los sillares.
3. En el Patinejo, éstos procesos son más intensos y además, se presentan grandes desplazados, propios de los cambios térmicos del agua de imbibición, efectos de las heladas y, muy netamente, por procesos de yesificación.
4. Además de estos deterioros, en ambas localidades, aparece un enmugrecimiento general, por contaminación ambiental y local.
5. Todos estos resultados, han podido ser observados y analizados, aunque en general, sea especialmente en el Patinejo, donde ya se había efectuado una profunda limpieza de sus paramentos.

BIBLIOGRAFÍA

1. FORT GONZÁLEZ, R., BUSTILLO REVUELTA, M., LÓPEZ DE AZCONA, M. C., MINGARRO MARTÍN, F. "Tendencias geoquímicas durante el proceso de alteración de los granitos de la Catedral de Toledo". Bol. Geol. y Min. V. 103-1, pp. 136-147, Madrid 1992.
2. GARCÍA ESCUDERO, P. "La Puerta de Alcalá, su historia y su restauración". Ed. Ayuntamiento de Madrid. 100 pp. Madrid 1993.
3. KUBLER, G. "La obra de El Escorial". Alianza Editorial, S.A., 224 pp. Madrid 1985.
4. LAZZARINI, L., LAURENZI-TABASSO, M. "Il restauro della pietra". Dott. Antonio Milani (Edit) 320 pp, Padova (Italia) 1986.
5. LÓPEZ DE AZCONA, M. C., MINGARRO, F., FORT GONZÁLEZ, R., PALACIOS, J.M. "Estudio de la degradación de los materiales pétreos del Puente de Toledo (Madrid)". III Congreso Geológico de España. Simposio Tomo I, pp 243-252. Salamanca 1992.
6. MINGARRO, F., LÓPEZ DE AZCONA, M. C., FORT, R., ALONSO ZARZA, A. M. "Degradación de los materiales pétreos en la Fuente de Cibeles (Madrid)". Informe para el Ayuntamiento de Madrid. 86 pp, Madrid 1993.
7. RILEM "Essais recommandés pour l'altération des pierres et pour évaluer l'efficacité des méthodes de traitement". Matériaux et constructions V. 13 (75), pp 216-220. París 1980.



Alonso
Constructora S.A.

LA HUMEDAD VENCIDA Y CONTROLADA

Es de sobra conocido el problema que nos plantea a todos los profesionales de la construcción, la presencia de humedades en los muros.

Estas humedades en su mayoría, se producen por causa de fenómenos eléctricos. En condiciones normales, los muros y paredes presentan una polaridad natural, de carácter positivo en la parte superior, y negativa en la inferior. La acumulación de agua en cimientos, y base de los muros puede dar origen a modificaciones químicas que provocan una inversión de la polaridad, que pasa a ser positiva en la parte inferior, con lo que se produce un efecto de bomba. Como resultado, los iones de H_2O enlazados hasta entonces con los cristales, son impulsados hacia arriba, dando origen a las "HUMEDADES POR CAPILARIDAD".

Este fenómeno, que se agrava con el tiempo, provoca el deterioro de los revestimientos superficiales, y lo que es peor: la disgregación de los materiales aglutinantes de la pared.

La solución definitiva a este grave problema es el KIT 921 DMF, que supone para sus inventores la Medalla de Oro del Salón Internacional de Inventos y Nuevas Técnicas de Ginebra.

Su éxito se basa en la supresión de ese "efecto de bomba" que provoca la ascensión del agua por capilaridad.



Kit Antihumedad 921 DMF.

Para ello, el Kit envía impulsos de polaridad positiva, desde un transformador alimentado a 200 voltios, a través de unas barras colocadas en sentido oblicuo en el muro. La frecuencia está calculada para que los impulsos entren en resonancia molecular con el agua, lanzándola con fuerza hacia las superficies de evaporación de la pared, produciendo al mismo tiempo una inversión de la corriente ascendente en el interior de los capilares.

En este proceso, la electrólisis parcial de las barras de cobre, libera iones que provocan una reacción de precipitación y la posterior mineralización del electrólito en el interior de los capilares del muro. De esta forma, en pocas semanas, estarán completamente obturados.

El dispositivo permanece conectado hasta que sus mecanismos de control detectan que el muro se ha secado completamente. En este momento, pasan a la situación de vigilancia, y permanecen así hasta que con el tiempo, vuelvan a detectar humedad. El dispositivo se pone en marcha automáticamente, repitiendo el proceso.

RESTAURACION Y CONSOLIDACION DE ESTRUCTURAS DE MADERA

Las restauraciones o el mantenimiento de los edificios antiguos con alto valor histórico y artístico, o la simple casona familiar heredada de los abuelos, da lugar en la mayoría de los casos a intervenciones en madera.

A pesar del magnífico comportamiento de este material como elemento estructural, el paso de los siglos, y en muchos casos la desidia, causan graves deterioros en la misma.

Vigas partidas por sobrecargas y movimientos del edificio, testas destruidas por la acción de los agentes xilófagos, etc..., son muestras claras de esta degradación.

La reparación de estos daños suele ser costosa en el supuesto de que haya que desmontar las estructuras dañadas. Pero con la tecnología RENOANTIC se consiguen resultados espléndidos sin necesidad de obras complementarias, trabajando "in situ" y directamente sobre la madera.

RENOANTIC es una técnica de restauración de la madera, desarrollada a principios de los años 70, y que ha sido aplicada con éxito durante 25

años en numerosas obras de diferentes países europeos. La calidad de sus materiales y técnicas está avalada por los exhaustivos ensayos realizados en la Universidad de Laussane y el Laboratorio de la Escuela Técnica

Superior de Ingenieros del Estado, en Iverdun (Suiza), todos ellos homologados por el Instituto Lignum, y además, por la gran cantidad de obras realizadas con resultados totalmente satisfactorios. Con estas técnicas se han restaurado edificios tan variados como el Teatro Farnesio en Italia, o la Catedral de Laussane, en Suiza, o conventos e iglesias como el Monasterio de Santa Clara de la Columna en Belalcázar (Córdoba), pasando por palacios, castillos, edificios civiles y casas particulares.

Edificios todos ellos de variado uso y en distintos países y climatologías, desde España hasta Rusia, en los que el excelente resultado obtenido siempre, avala la flexibilidad, eficacia y economía del sistema, así como su buen comportamiento con el paso del tiempo.

Las características y ventajas más importantes de la tecnología RENOANTIC son:

- Actuar sobre estructuras de madera antiguas conservando los elementos originales.
- Reforzar estáticamente las estructuras trabajando "in situ" sin necesidad de desmontarlos, lo que produce una gran economía de dinero y de tiempo.
- La garantía absoluta de éxito gracias al desarrollo de toda una teoría de cálculo y a la larga experiencia de obras realizadas.

Los buenos resultados de RENOANTIC se basan en sus componentes y en su metodología de puesta en obra.

Los componentes son la resina (del grupo de las epoxídicas), de fabricación propia y formulación altamente compleja, que se utiliza

como aglomerante reforzado con áridos lavados y secos, y las varillas de fibra de vidrio que absorben los diferentes esfuerzos.



Las características y coeficientes de trabajo de estos materiales son perfectamente conocidos por haber sido sometidos a los correspondientes ensayos de laboratorio, lo que unido a la larga experiencia práctica, permite la confección de proyecto y su ejecución.

El primer paso para

conseguir una perfecta restauración de la madera con la técnica RENOANTIC será pues el cálculo de las armaduras a emplear, que pueden ser de acero tratado, o de fibra de vidrio, y su puesta en obra, mediante cajeados o taladros.

A continuación se eliminan todas las partes degradadas de la madera y se procede a la colocación de las armaduras. En las zonas en que falta una parte importante de la madera, se confecciona un encofrado para el relleno posterior con el mortero de resina.

El aspecto exterior de la zona a restaurar, es absolutamente igual al de la madera original.

La resina RENOANTIC es extremadamente fluida lo que permite una total penetración y colmatación de los taladros y cajeados que contienen las armaduras. Después de su polimerización la resina queda

sólidamente unida a los dos elementos (armadura y madera).

Los valores estáticos obtenidos después de la restauración son al menos equivalentes a los de la construcción original, y casi siempre superiores. Esta técnica permite, por ejemplo, aumentar las cargas de uso en el edificio restaurado.

Con la tecnología RENOANTIC se puede también reforzar un forjado plano y realizar la unión de vigas antiguas de madera y una capa de compresión de hormigón armado, y aumentar así la resistencia eliminando los movimientos de cimbra de dicho forjado.

RENOANTIC HISPANO PORTUGUESA, con su personal especializado, formado en propia fábrica en Suiza, está al servicio de los arquitectos, técnicos y constructores para la ejecución de todo este tipo de trabajos.



LA REACCION DEL LIDER

*"Solamente el LIDER es capaz de
alcanzar las cotas más altas".*

Más de diez años de experiencia en la tecnología de los betunes modificados y la ejecución de veinte millones de metros cuadrados de distintos pavimentos, junto con un gran esfuerzo de investigación, nos permiten hoy, la presentación de nuestros nuevos productos **SUPERTELCOLASTIC**, una gama de betunes modificados producidos por **REACCION QUIMICA**, cuya virtud principal es la óptima adecuación a cada tipo de tratamiento.

SUPERTELCOLASTIC

Gama de betunes modificados especializados por aplicaciones.

- MEZCLAS DE ALTO PODER DE REFUERZO
- MEMBRANAS ANTIRREMORTE DE FISURAS
- RODADURAS ESPECIALES, ETC.

COMPOSAN
DISTRIBUCION

Tecnología viva

Correa de San Jerónimo, 14 - 28014 Madrid (91) 522 64 90