

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**  
**DEPARTAMENTO DE**  
**CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS**



**TESIS DOCTORAL**

**ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y**  
**COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS**  
**LEONES. INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE**  
**DETERIORO**

**M<sup>a</sup> PAZ SÁEZ PÉREZ**

**2004**



A Néstor (Padre e hijo)



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de varios años de formación e investigación que lógicamente ha sido posible gracias a la colaboración y ayuda de numerosas personas e instituciones a las que estoy sinceramente agradecida.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los Directores de esta Tesis Doctoral Dr. D. José Rodríguez Gordillo que me propuso este tema de investigación y que tantas satisfacciones me ha proporcionado y a Dr. D. Jorge A. Durán Suárez, ambos me animaron a introducirme en el mundo de la Restauración y en ellos siempre he encontrado constante apoyo, asesoramiento y colaboración que hoy tiene reflejo en esta Memoria. Además de Directores, son entrañables amigos.

Al Departamento de Mineralogía y Petrología por haberme concedido la oportunidad de realizar este Trabajo de Investigación como uno más de sus miembros y poner a mi disposición todos los medios del Departamento. Sus profesores, siempre han estado animándome, sobre todo en estos últimos años, haciendo mención especial por su interés y colaboración a los Drs. D. Eduardo Sebastián, D. Daniel Martín, D. Carlos Rodríguez, D. Fernando Nieto, D. José Torres, Dña. Inmaculada Palomo, Dña. Purificación Fenoll y D. Antonio Sánchez Navas.

No puedo olvidar la excepcional ayuda que el profesor Dr. Nicolás Velilla me ha proporcionado. Su amabilidad, entusiasmo y enorme capacidad de trabajo han facilitado la culminación de este trabajo.

Al Grupo de Investigación RNM 179 de la Junta de Andalucía por la financiación prestada para la realización de esta Tesis Doctoral. Y especialmente a su responsable el Dr. D. Miguel Ortega Huertas por su constante interés y apoyo a la realización de este trabajo.

Al Proyecto MAT 2002-03227 del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Investigador responsable Dr. J. Rodríguez Gordillo) por su amparo científico y, como no, económico.

Diversos organismos y empresas han facilitado mi labor de obtención de muestras poniendo a mi disposición los más diversos medios. En este sentido tengo que agradecer a Mármoles José Fernández (Macael) por facilitarme el material utilizado durante toda la investigación. A la Sociedad Administradora de la marca Mármoles Macael, S.A. por posibilitarme un mejor conocimiento del material de la Región de Macael. A las empresas de control de calidad IACC S.A. y CECH por permitirme utilizar sus laboratorios y la maquinaria disponible.

Al Centro Tecnológico del Mármol de Cehegín (Murcia), y especialmente a D. Antonio Molina, por su colaboración tanto en los ensayos realizados en el centro como por la aportación desinteresada de trabajos científicos.

A D. Francisco Navarro de la empresa TECOA S.L. quién me ha facilitado amplia información sobre la localización, accesos y obtención del material de cantera, fundamental en esta investigación.

Al Patronato de la Alhambra y Generalife, sin cuya colaboración la realización de esta Tesis no hubiera sido posible. A D. Jesús Bermúdez López por su apoyo en los primeros momentos de este trabajo, a Dña. Esther Cruces y Dña. Silvia Pérez por facilitarme la entrada a zonas privilegiadas, cuyo acceso es hoy más que difícil. A la Oficina Técnica y en concreto al Arquitecto Técnico D. Jorge Calancha por su desinteresada colaboración en las distintas fases del estudio. Al Departamento de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra y en especial a Dacia por su ayuda en la búsqueda de documentación gráfica. A Dña. Carmen Navarrete Aguilera, Jefa del Departamento. de Restauración en la Alhambra durante el primer periodo de este trabajo, sus datos y asesoramiento han sido de gran ayuda.

A D. Agustín Rueda, por su ayuda, paciencia y profesionalidad en el corte de un gran número de probetas y en la elaboración de láminas delgadas realmente “imposibles”. A D. Pascual Sánchez por su ayuda en la difracción de Rayos X y a D. Rafael Loza que siempre atendió mis peticiones en la Secretaría del Departamento.

A compañeros y amigos de otros Departamentos Universitarios:

Al profesor D. Manuel Jiménez Domínguez del Departamento de Construcciones Arquitectónicas, sus consejos, y el entusiasmo que dedicó a este trabajo han facilitado el conocimiento y estudio del Monumento.

Al profesor D. Juan José Cajal del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, su ayuda y colaboración han permitido obtener una parte muy importante de los resultados de esta Tesis Doctoral.

Al Dr. D. Miguel Cabrerizo del Departamento de Física Aplicada, quién puso a mi disposición los laboratorios para determinar la variación de ángulo de contacto en un número interminable de gotas, siendo para ello inestimable la ayuda recibida del becario de investigación D. Pedro Gea, sin él la realización del ensayo y la obtención de resultados no hubieran sido posibles.

Al Dr. D. Ángel Delgado del mismo Departamento por la ayuda recibida en la realización del ensayo de Picnometría de Gases.

Al Dr. D. Antonio García Beltrán del Departamento de Óptica por el uso del espectrofotómetro y la interpretación de los resultados obtenidos.

Al Dr. Francesc Guirado, del Servei de Recursos Científics (Universitat Rovira y Virgili) por los estudios de texturas mediante DRX.

Al Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada, y en concreto a las personas con las que he tenido la oportunidad de trabajar y que han participado de alguna forma en la adquisición de datos de esta Tesis Doctoral: Bendición Funes, Juan de Dios y Domingo. De forma especial quiero mencionar a Isabel Guerra (SEM) por el gran esfuerzo realizado para que en el menor tiempo posible tuviera las imágenes necesarias que permitieran finalizar con los distintos ensayos realizados y a Olga Cazalla por su apoyo y ánimo continuado.

A mis compañeras de trabajo Patricia (Dpto. Geodinámica) y Lucía (Dpto. Mineralogía y Petrología) por la ayuda prestada en conocimientos y técnicas en las que son verdaderas expertas. Incluyo en esta mención y con todo reconocimiento al Dr. Giuseppe Cultrone (Dpto. Mineralogía y Petrología).

A mis amigos Silvia, Clara, Paco, Begoña, Pedro, Rafa, Adela y Julia.

A Albert Ribera por su paciencia, apoyo y ayuda incondicional, que en forma de sabios consejos me ha ayudado a mantener la ilusión y a superar los momentos difíciles.

A la persona que ha estado tan cerca de mí en estos últimos años, con quien he compartido el día a día, y que ha hecho lo imposible porque este trabajo esté terminado. A NÉSTOR.

A mi hijo Néstor y a los que están por venir, por ellos, especialmente, he mantenido la ilusión de este trabajo.

A mi familia por el apoyo continuado y por estar siempre que los he necesitado.

Finalmente quiero manifestar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de forma anónima han colaborado en la elaboración del presente estudio. A todas ellas y a las ya citadas dedico los resultados obtenidos.

# **1 INTRODUCCIÓN**







# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1. PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS

El Conjunto Monumental de la Alhambra constituye la expresión artística viva más representativa del pasado islámico español. En esta Memoria, y como se recoge en su Título, se aborda el estudio de la columnata de una de sus zonas más emblemáticas: El Patio de los Leones.

La Alhambra, como máxima expresión de un pasado histórico, social, artístico, religioso, ideológico y político, es algo que incluso la mera observación es capaz de revelar. Por otra parte han sido multitud los estudios que han abordado estos aspectos. Ensayos e investigaciones histórico-artísticas, obras poéticas y de ficción, relatos de viajes, obras plásticas (grabado, pintura, filmografía) etc., han consagrado los valores intrínsecos (arquitectónicos, artísticos y estéticos) de esta magna obra.

Poco se puede añadir por nuestra parte en este sentido. Quizás resaltar un aspecto que consideramos de sumo interés, y es, el valor añadido que para la ciudad de Granada representa el Monumento. En efecto, difícil resulta romper el binomio Granada-Alhambra. Ambas se han apoyado mutuamente y su consideración ha

corrido pareja en la obra de poetas, pintores y en los relatos de viajeros, maravillosamente asombrados.

Hoy quizás el binomio se resiente. Todos sabemos –y sufrimos– del ritmo acelerado con que las ciudades pierden su carácter, se uniformizan, resultando prácticamente una proeza el mantenimiento de pequeños botones de muestra de su pasado histórico, artístico y cultural, aislados de sus contextos originarios las más de las veces.

Granada, desgraciadamente, no ha sido una excepción, sino más bien una discípula aventajada en este acontecer, de manera que en la actualidad es la Alhambra la que mantiene en gran medida el carácter de la ciudad (así, nunca mejor que ahora, Granada es “la ciudad de la Alhambra”).

Con esto no se pretende decir que el Monumento nazará haya estado preservado de agresiones. Muchas han sido, y a lo largo de toda su historia, aunque las más recientes las consideremos más perjudiciales, entre otras cosas por lo innecesarias, gratuitas, y sin aporte de valores propios.

No obstante, la personalidad del Monumento es tal que ha sido capaz de imponerse a catástrofes, agresiones de invasores y ocupantes, a intereses actuales e ideas estéticamente adocenadas, y a mil avatares más.

Abordamos este –quizás poco usual– punto de vista de aproximación a la importancia del Monumento, que demanda –si cabe– una mayor preocupación y obligación por su conservación y mantenimiento.

En esta Memoria se intenta colaborar a tal fin. Concretamente, y como ya se ha citado, se pretende contribuir a un mejor conocimiento de una de las dependencias más representativas y representadas de la Alhambra: El Patio de los Leones. Una contribución al conocimiento del estado, comportamiento y peculiaridades del material marmóreo de la columnata del Patio, así como un estudio arquitectónico-estructural de las cargas de las galerías que soportan.

Como es sabido, la famosa fuente, sus leones, y las columnas que soportan galerías y templetos del Patio, presentan importantes problemas de conservación. Concretamente las columnas aparecen afectadas por desplazados, pérdidas de material, manchas, etc., deterioros que en algunas de ellas adquieren niveles relevantes, lo que hace que se especule con sus posibilidades de consistencia estructural.

Si no numerosos, varios han sido los estudios que se han ocupado de investigar el estado de conservación y naturaleza del material de columnas y fuentes, así como de los factores ambientales que contribuyen a su deterioro.

Hemos de citar en primer lugar los estudios que entre 1980-1990 fueron llevados a cabo por el Dr. Galán y otros investigadores de la Universidad de Sevilla. El Patronato de la Alhambra y Generalife encargó a este equipo un estudio sobre la naturaleza y estado de los materiales de las columnas, taza de la fuente y leones del Patio, y el establecimiento de los agentes de su deterioro. Sus principales conclusiones fueron expuestas en los “III Encuentros en la Alhambra. Problemas de Conservación e Intervención en Fuentes Monumentales”, celebrados en Granada en 1990. Así mismo, y de forma fraccionada, los resultados del citado estudio han sido objeto de publicaciones y ponencias en Congresos (e.g. Galán, 1991; Galán et al., 1992).

En este estudio se concluye en términos generales que los indicadores de alteración son destacables en gran parte de las columnas y especialmente significativos en la galería de Dos Hermanas. Así mismo se pone de manifiesto como principal causa de alteración en el material los elevados gradientes térmicos que soportan diariamente las columnas, así como otros factores de orden menor (heladicidad, salpicaduras de agua, elementos extraños, etc.) que contribuyen al deterioro actual.

Zeza et al. (1992) abordan también el estado de las columnas, acompañando este estudio con el establecimiento de algunas características físico-mecánicas del mármol de Macael que constituye el material de origen de las columnas. En este trabajo se invoca la sustitución parcial o total de varias columnas sin que quede manifiesto que el estado de degradación o capacidad mecánico-estructural de las mismas lo haga ineludible, lo que únicamente, desde los más elementales criterios conservacionistas justificaría una sustitución de material original.

Finalmente, diversos aspectos relacionados con el deterioro de las yeserías de los rombos de las galerías y templetos, así como las intervenciones de restauración fueron presentados en forma de conferencia por C. Navarrete Aguilera en el “III Curso Internacional de Conservación y Restauración del Patrimonio: Yeserías y Estucos”, celebrado en Alcalá de Henares (26-30 Junio 1995), y en el “Ciclo de Biología y Conservación del Patrimonio Histórico Artístico” (Universidad de Jaén, 26 de Mayo de 1997). Los aspectos analíticos de estas yeserías fueron presentados por la Dra. Cardell en las citadas Conferencias de Alcalá de Henares.

No obstante, e independientemente de la mayor o menor extensión y profundidad de los trabajos que versan sobre la naturaleza y estado de las columnas,

en ellos se ha obviado un aspecto que nos parece esencial, y es la función que como elemento estructural estas desempeñan. En efecto, en los citados trabajos solo se ha considerado la interacción del material mármoleo con los agentes ambientales de su entorno (posibles agentes polucionantes, gradientes térmicos, fenómenos de hielo-deshielo, insolación, etc.), pero no se ha hecho un estudio estructural con determinación de las cargas que las columnas soportan, y en que medida incide la combinación de ambos factores, ambientales y estructurales, sobre el comportamiento y posibilidades futuras del material de las columnas. Esto constituye el **Objetivo** fundamental de esta **Memoria**. Para su consecución, en primera instancia, además de completar diversos aspectos sobre características y estado del material de las columnas (direcciones de anisotropías estructurales, tipo y alcance de alteración superficial, etc.), se realizará un estudio estructural-arquitectónico de las cargas que galerías y templete hacen gravitar sobre las columnas.

En segunda instancia se abordará el estudio combinado de factores ambientales y estructurales sobre las columnas. Para ello, y ante la imposibilidad de disponer de material de las mismas como material de ensayo, se someterán probetas de mármol de Macael a los “estrés” ambientales predominantes en el entorno del Patio (estrés térmico, hielo-deshielo, etc.), y esfuerzos mecánicos, y evaluar la variación de los correspondientes módulos de resistencia y los deterioros acaecidos. Los datos obtenidos y su estudio comparado con los esfuerzos de carga reales a que están sometidas las columnas, posibilitarán un mejor conocimiento de la situación de estas, permitiendo a los equipos de restauración la adopción de las medidas oportunas con el mayor respeto posible a las implicaciones arquitectónicas (estructurales), estilísticas y de originalidad histórica.

Finalmente, y no obstante la pormenorizada descripción que el Dr. Galán y colaboradores hicieron del estado de conservación de las columnas, dado que desde la presentación del mismo (1991) no se ha producido una intervención sobre las mismas, hemos optado por volver a estudiar y detallar su estado actual de conservación para, además de disponer de datos más actualizados, poder evaluar el ritmo de deterioro.

## 1.2. EL PATIO DE LOS LEONES

El núcleo de edificios constituyentes del Palacio denominado Cuarto de los Leones fue construido durante el reinado de Muhammad V (1354-59 y 1362-91), y puede considerarse como la manifestación más importante del arte granadino nazarí, tanto por la culminación del estilo precedente como por las innovaciones que introduce; a ello contribuye de manera relevante el Patio de los Leones, elemento primordial y central de este conjunto (Figura 1.1).



*Figura 1.1. Panorámica del Patio de los Leones donde se aprecia en primer término la fuente y la disposición perimetral de la columnata.*

Según Gómez Moreno (1970) “aquí se rompió con la tradición andaluza de viviendas”, y se ofrece una distribución claustral, con galerías alrededor, en las que se disponen varias fuentes en sus laterales cortos, protegidas por templetes, según fue costumbre en algunas mezquitas. Las habitaciones principales se disponen en los laterales de mayor dimensión destacando el que se orienta al norte, que viene a ser una vivienda completa, con dos pisos y subterráneo debajo; hacia el sur, en el piso alto, hay otra vivienda con su patio interior, retiro tal vez de alguna favorita. En el ángulo de sureste, se encuentra la entrada, formando un elevadísimo portal, con elegante cúpula de gallones, probablemente vestigio de otra edificación anterior.

El Patio de los Leones posee una planta rectangular de 28,5 x 15,7 m, con galerías en todos sus lados soportadas por 124 columnas de mármol de Macael, exentas unas, otras dobles o en grupos de tres o cuatro en los ángulos. En el centro de cada uno de los laterales más cortos sobresale un templete de planta cuadrada sostenido por columnas. En el centro del Patio se sitúa la famosa fuente de taza dodecagonal sostenida por los doce leones, cuyo arcaico o tosco aspecto ha motivado múltiples hipótesis en cuanto a su procedencia y época. Según Vilchez (1990), la fuente la mandó poner Muhammad V, como consta en la inscripción de su taza que fue compuesta por el visir Ibn Zamrak: *“Bendito sea aquel que otorgó al imam Muhammad bellas ideas para engalanar sus mansiones”*. Además, existen otras fuentes de menor tamaño en el suelo de mármol de las galerías este y oeste (tres circulares en cada una). Otras dos en el centro de los templetos, y por último una en la Sala de Dos Hermanas y otra en Abencerrajes (Figura 1.2).

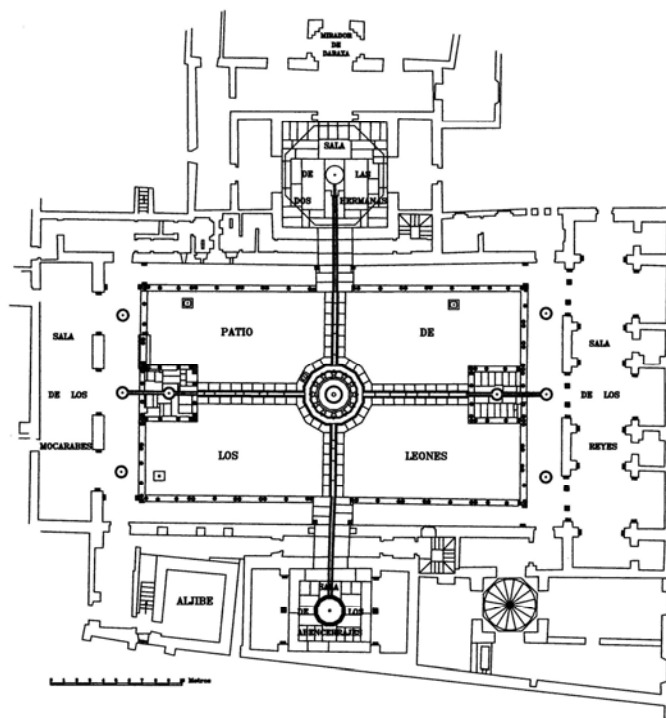


Figura 1.2. Plano de planta correspondiente al Palacio de los Leones. Adaptado del Plano nº nuevo 158 de la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra.

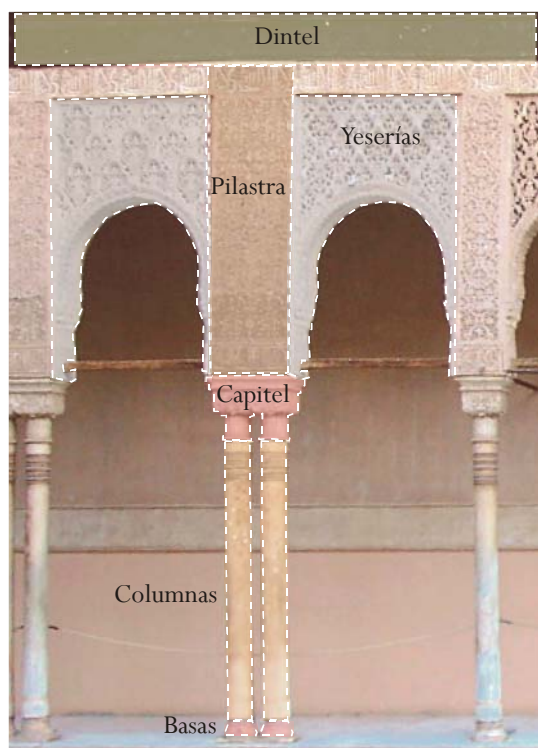
Las columnas presentan varios anillos en la parte superior, y sobre cada una de ellas se dispone un capitel cilíndrico coronado por otro cúbico. Sobre estos se



asientan ábacos gruesos de mármol blanco que soportan los pilares de ladrillo y jabalcones, sobre los que apoyan las vigas de madera que constituyen los dinteles horizontales sobre los que cargan los aleros y armaduras (Figura 1.3). La profusa decoración de yeso, escayola y mocárabes contribuyen a eliminar cualquier apariencia de pesadez estructural, dotando de gran ligereza al conjunto.

Tras la conquista cristiana los Palacios Nazaríes quedaron reservados como residencia de los monarcas castellanos lo que hasta el siglo XIX fue conocido como Casa Real, es decir el Palacio del Trono o Cuarto de Comares, el Cuarto de los Leones, y algunos edificios anejos más.

En el lado norte del Patio se ubica una estancia de ocho metros de lado, rica en decoración y bien conservada; es la conocida como Sala de las Losas (posteriormente denominada Sala de Dos Hermanas), debido a las dos losas gemelas de mármol existentes en su pavimento. Posee dos alcobas laterales, y otra al fondo de la estancia (Sala de los Ajimeces), y avanzado, se sitúa el Mirador de Daraxa (Lindaraja), cuya visión del paisaje se cortó en parte por la construcción del Peinador de la Reina en época de Carlos V. Desde allí podía contemplarse el Albaicín, según consta en los versos allí labrados: *“En mi, a Granada ve, desde su trono califal”*. A la derecha de la entrada hay una puerta que comunica con una escalera de acceso a las estancias superiores, cerradas al público, y compuestas por un mirador y dos habitaciones. La puerta de la izquierda da paso a un retrete.



*Figura 1.3. Esquema de la composición arquitectónica-constructiva de la columnata perimetral del Patio.*

En el muro sur del Patio se ubica la Sala de Abencerrajes, de planta cuadrada y una alcoba a cada lado, además de una gran pila de mármol en el centro, que según Torres Balbás (1953) estuvo situada más próxima a la puerta de entrada. Como sabemos, el nombre dado a esta sala responde a los expeditivos métodos con los que la nobleza y dinastías reinantes de la época resolvían entre sí sus diferencias, ya que allí –según historias más o menos legendarias– fueron degollados los caballeros de ese linaje.

Por el pasadizo a la izquierda de la Sala de Abencerrajes una escalera da acceso al Patio del Harén. Se compone de un pequeño patio decorado con dos pórticos de tres arcos en los extremos este y oeste. Está construido sobre un aljibe con parejas de finas columnas y capiteles de caliza marmórea de color negro en el extremo oriental y pilares de ladrillo en el occidental.

En el lateral oeste del Patio, se encuentra la Sala de los Mocárabes. Su nombre hace alusión a la bóveda que la cubría, demolida tras la explosión del

polvorín de la Carrera del Darro en 1590. Concebida como sala vestibular, es una estancia rectangular de 19,6 x 4 m, desde la cual y a través de los tres arcos de mocárabes que dan acceso al Patio se obtiene una de las mejores perspectivas del mismo. Es una estancia sencilla con las paredes decoradas con yeserías. Hoy puede observarse parte de la antigua bóveda recuperada junto con la restante, perteneciente al S.XVII. Junto a esta estancia se situaba una de las antiguas entradas al Palacio.

Finalmente, al extremo oriental del Patio según su eje longitudinal se sitúa la Sala de los Reyes, a la que se accede desde la galería del Patio a través de puertas con finas columnas de mármol y arcos de mocárabes. En el interior de la sala otros arcos de mocárabes dividen ésta en nueve recintos: cinco rectangulares y cuatro cuadrados. Los primeros eran alcobas y los segundos alacenas. Sobre estos recintos existen cúpulas de mocárabes, y desde los espacios cuadrados se accede a las tres alcobas centrales en cuyas cúpulas de madera están adheridas las famosas pinturas sobre cuero (Figura 1.4), de clara influencia gótica que debieron realizarse a finales del siglo XIV (1396-1408). Son pocos los ejemplares de este tipo de cubiertas que han llegado a nuestros días, constituyendo esta una muestra de la excelente técnica empleada en la carpintería islámica granadina. Estas pinturas junto con otras aparecidas en las casas del Partal prueban como la decoración musulmana no prescindió por completo de la representación de figuras de hombres y animales (Barbosa y Ruiz, 1992).



Figura 1.4. Pinturas sobre cuero en los techos de las alcobas laterales de la Sala de los Reyes (alcoba central).

Volviendo al Patio, además de la fuente central, hay una pequeña fuente circular en el centro del suelo de mármol de cada uno de los pabellones, tres en cada

una de las galerías (este y oeste), y otra de mayor dimensión en cada una de las Salas de Abencerrajes y Dos Hermanas. Estas fuentes se comunican con la central a través de canalillos en losas de mármol, que siguiendo los ejes longitudinales conforman una cruz en el Patio.

Actualmente los suelos de galerías y templetos son de mármol, y hacia el interior del Patio, adosada a las galerías, existen andenes de 0,90 m de losas de mármol que rodean el Patio. Los espacios cuadrados angulares comprendidos entre las galerías y la cruz de las losas con canalillos en los ejes del Patio, están rellenos con grava. Ocasionalmente se disponen separadores móviles para encauzar el itinerario de los visitantes.

Sin temor a equivocarnos ningún otro lugar de la Alhambra ha sido tan difundido y alabado como éste, fama que perdura a pesar de sus deterioros y carencias (zócalos alicatados, policromías en yeserías y maderas, etc.). En él, como en el caso de las pinturas sobre cuero de la Sala de los Reyes, la influencia occidental es evidente, lo que incluso ha alentado a algunos investigadores a hipótesis sobre la común autoría de ambos. Sin embargo, no obstante las evidentes semejanzas con claustros cristianos medievales o renacentistas, en este caso la riqueza ornamental y de formas es incomparablemente mayor.

En cuanto a jardinería, Torres Balbás (1953) cita la descripción de Antonio de Lalaing, el cual vio en 1502 seis naranjos en el Patio, lo que justificó al arquitecto para volver a plantar varios (tres) de dichos árboles en este recinto. Según Bermúdez (1987) el aspecto del Patio era diferente del actual; así los cuatro parterres eran jardines con un nivel inferior al de los andenes y galerías. En la actualidad, existen cuatro naranjos distribuidos en cada uno de los parterres y a ambos lados de los templetos. Estos son de porte bajo para no afectar la visión de los visitantes.

Como descripciones y estudios más autorizados sobre el conjunto del Cuarto de los Leones y su Patio –además de los ya citados– nos atrevemos a recomendar, entre la enorme existencia, las obras de Torres Balbás (1929), Gómez Moreno (1892), Gallego y Burín (1963) y Seco de Lucena (1919) que nos han permitido desarrollar el presente Capítulo.

### **1.3. EVOLUCIÓN E INTERVENCIONES EN EL PALACIO DE LOS LEONES**

Aunque el objetivo de estudio en esta Memoria lo constituye la columnata del Patio y galerías que soporta, en este apartado se ha optado por recoger las

intervenciones que afectan no sólo al Patio sino también algunas que afectan a las Salas adyacentes integrantes de este Palacio. Esto permitirá una visión más global e integradora de la evolución sufrida por el propio Patio.

Se recogen, pues, a continuación y ordenadas cronológicamente las intervenciones realizadas sobre el Patio y estancias anejas, registradas documentalmente (y a las que hemos tenido acceso).

Consideramos que el interés de esta recopilación no estriba únicamente en poder disponer en un solo documento de esta información generalmente dispersa sino que además, de dicha exposición podrán extraerse una serie de datos tales como:

Evolución estructural y estética del conjunto

Principales intervenciones y tipos (acondicionamientos, modificaciones, restauraciones, etc.)

Políticas de intervención en cada época, etc.

Por otra parte, y con el fin de agilizar la exposición, se ha optado por no incluir en el texto que recoge esta recopilación de intervenciones las múltiples y repetidas citas bibliográficas que cada reseña y descripción implicaría, y será al final de este apartado donde se citen todas las fuentes bibliográficas de donde se ha extraído la información.

Asimismo el lector advertirá notables diferencias en el tratamiento que en el texto se da a la descripción de unas intervenciones frente a otras. Así, mientras que algunas se recogen de forma muy sucinta, otras alcanzan un nivel de detalle notable; evidentemente esto viene condicionado por el tratamiento que las fuentes bibliográficas dedican a cada una de las intervenciones.

Por nuestra parte se ha intentado pulir las descripciones excesivamente prolijas, y obviar aquellos aspectos que no contribuirían a los fines que con esta recopilación se persiguen, manteniendo por supuesto –y de ahí la extensión de algunas descripciones– todo lo que consideramos de interés. Mención especial merecen las detalladas descripciones de Torres Balbás que, en algunos casos y dado su peculiar e insustituible estilo, ha habido que transcribirlas casi literalmente. El lector familiarizado con la obra de este insigne arquitecto e investigador las reconocerá fácilmente.

La primera descripción del conjunto tras la conquista cristiana corresponde a Münzer. En la versión española de “Viaje a España” que data del año 1494 realiza una descripción del Patio de los Leones en la que especifica con cierto detalle los distintos elementos que en él ve; así dice “...en el centro de uno de los palacios, una

*gran taza de mármol, que descansa sobre trece leones esculpidos también en blanquísimo mármol, saliendo agua de la boca de todos ellos como por un canal. Había muchas losas de mármol de quince pies de longitud por siete u ocho de anchura, e igualmente muchas cuadradas, de diez y once pies. No creo que haya cosa igual en toda Europa”.*

Otra primitiva referencia se debe a Lalaing, que en 1502 relata que el Patio contaba con seis naranjos, estando el resto solado de mármol. Las primeras referencias a obras sin embargo, se tienen a partir de 1537; a partir de esa fecha y hasta el año 1540 las obras se centran en la Sala de Dos Hermanas. Sólo se conoce de estas obras que se gastaron gran cantidad de ladrillos, yeso (arreglos en yeserías) y madera de pino en su ejecución. En ese último año se adquieren también gran cantidad de azulejos a Gabriel de Peñafiel para colocar posteriormente en el zócalo perimetral del Patio.

Durante los años 1537 y 1538 se lavan los techos de las habitaciones altas; no será hasta 1541 cuando de nuevo se tenga constancia de los trabajos realizados; en ese año y en el siguiente se renuevan las yeserías de los templetos y se instalan tirantes; será esta la primera de una larga serie de obras que durante siglos tratará de evitar la inestabilidad de los templetos.

Entre los años 1537-1547 se rehace la bóveda de mocárabes de la Sala de Dos Hermanas.

Hacia mitad de siglo continuarán de nuevo las obras del Patio y así en el año 1549 se le encargarán a Gabriel de Peñafiel la realización de un gran número de ladrillos vidriados (azulejos) para el Cuarto de los Leones.

Años después (1552), por orden del Conde de Tendilla se realizan reparaciones en yeserías y reposición de leyendas que según testimonios de la época faltaban en las mismas, así como la reparación de grietas y desperfectos en los arcos y templetos, haciendo especial mención a que se realizaran “conforme a la obra morisca”.

En el año 1553 de nuevo se realiza un pedido de azulejos, necesarios para las reparaciones.

Las obras realizadas hasta el momento no conseguirán evitar el deterioro del Cuarto de los Leones y será en el año 1565 cuando se dicten las normas para la intervención en toda esta zona de las yeserías (paños de yeserías y albanegas de los arcos). Después de 7 años y tras varias adjudicaciones las obras necesarias para la reparación no son llevadas a cabo completamente; esto exigirá intervenciones posteriores. A partir de ahora se tratará de imitar o reproducir los elementos antiguos,

no considerando como en un principio las actuaciones como simples reparaciones; todo ello provocado por la marcha de los trabajadores que realizaban los trabajos, ocurrida por las continuas interrupciones y paradas de obra que se sucedían en la época.

Tras un periodo de 10 años en los cuales no tiene lugar ninguna actividad conservacionista, será en el año 1585 cuando comiencen de nuevo las “reparaciones”; se adquieren gran cantidad de mostagueras vidriadas de colores para colocar en el solado del Patio, así como tejas vidriadas para colocar en sus cubiertas. Ese mismo año continuarán las compras de material para terminar el aplacado y solado de la Sala de Abencerrajes y del Patio.

En este mismo año también en la Sala de Abencerrajes se pintan los techos de lazo con pinturas platerescas, así como el resto de la Sala.

Estas obras se verán ampliadas con las reparaciones realizadas en los capítulos de fontanería (adquisición de caños de plomo) y solados (remates de solería), en los que se precisa de gran número de piezas de mármol de Filabres, distintos tipos de losas, piezas sueltas, etc.

En el año 1590, se produjo el incendio y explosión de un molino de pólvora ubicado en la Carrera del Darro junto a la iglesia de San Pedro y San Pablo, lo que ocasionó graves daños en el palacio nazarí, destruyendo paredes, bóvedas, vidrieras, yeserías, etc. La Sala de los Mocárabes se vio afectada principalmente en su zona alta; la cúpula sufrió grandes desperfectos que por no repararse en su momento llevaron a su derribo posterior; un elemento singular que fue sustituido posteriormente por una bóveda elíptica de yeso.

En ese mismo año, 1590, comienzan a repararse partes emblemáticas del Conjunto que se vieron fuertemente afectadas (Cuarto de Comares, el Mexuar,...), y se procede a la sustitución completa de todas las vidrieras de la Casa Real que fueron destruidas por la explosión.

Además de las obligadas reparaciones de los desperfectos ocasionados por esta explosión, la Casa Real necesita de continuas actuaciones en temas de enlosado, azulejería, yeserías, carpinterías, etc. Así, en el año 1593, se adquieren, como ocurrió años antes, piezas o losas de la Sierra de Los Filabres, embocaduras de los canales para la fuente y otras piezas necesarias en las actuaciones llevadas a cabo.

En el año 1597 se adquieren los ladrillos necesarios para los corredores del Patio, y en el año 1599 se encargan azulejos de colores verde, blanco, azul y negro como piezas de remate colocadas en distintos puntos del Patio (solado, zócalo, ...).

En el primer año del nuevo siglo las obras son de muy poca entidad existiendo solamente referencia de la colocación de puertas en la Sala de Abencerrajes y la sustitución de revestimientos en el Patio.

No se tienen noticias de nuevas actuaciones hasta el año 1614 en el que el pintor Blas de Ledesma diseña la Sala de Mocárabes que, derruida en la explosión, tuvo que ser derribada. En este mismo año el maestro Juan Martínez instalará las nuevas vidrieras traídas de Cuenca y se colocarán por todo el Patio, balcones y ventanas.

En 1618 se acometen reparaciones en la Sala de los Reyes que, desde 1576 y hasta dicho año, fue usada como capilla.

En 1622, a estas intervenciones se unen reparaciones en las dos hornacinas de la Sala de Dos Hermanas. Las obras citadas, junto con otras intervenciones (cerrajerías, ...), se prolongan hasta 1624, fecha de la anunciada visita de Felipe IV.

En 1625 se sustituyen las vidrieras por encerados de lienzo. En el año 1626 se prepara el Patio para el acondicionamiento de la fuente, y será entonces cuando se le agregue a la fuente otra taza circular agallonada con decoración esculpida pero sin inscripciones. Alonso de Mena repara las orejas de los leones, limpia la inscripción de la taza grande y bruñe la taza superior, lo que provocará confusión en cuanto al esclarecimiento del posible arquitecto del Patio. Ese mismo año se colocarán 16 tirantes en los paramentos de las galerías.

Comienza en torno a 1630 (S.XVII) la adecuación del Mexuar como capilla, la cual se encontraba ubicada con anterioridad en la Sala de los Reyes.

En el año 1631 se colocan tirantes en la Sala de los Reyes, así como mostagueras, y en el año 1633 tablillas de azulejos cuadrados vidriados en el Patio. La Sala de Mocárabes que estaba cubierta en un principio por una bóveda de mocárabes, fue demolida por lo deteriorada que quedó en 1590 a consecuencia de la relatada explosión, y se procedió entonces a dividirla en dos partes, cubriéndose la de la izquierda en 1614 con otra bóveda de yeso de forma elíptica realizada por el pintor Blas de Ledesma, y separando ambas zonas entre sí con una reja, hasta 1636 por lo que entonces se nombró a esta parte como “salón de las rejas”; ese mismo año el dorador Gabriel Ruiz pintó de azul y doró los botones de las rejas de esta sala. La bóveda de Ledesma ostenta las iniciales F.Y. de Felipe IV e Isabel de Farnesio, colocadas con seguridad con motivo de la estancia en Granada de los monarcas. Entre los años 1634 a 1636 se renueva toda la solería.

En el año 1658 se renuevan los aleros, se labran canecillos y cenefas en los tejados.



En el reconocimiento llevado a cabo en el año 1687, se referencia el desplome de las “144” columnas, mal estado de las yeserías, falta de solería y azulejos, así como el atirantado de paramentos con barras de hierro.

En el año 1688 se reparan los muros y cubiertas de la Sala de Abencerrajes.

Nuevamente en el año 1691 se hace mención al estado ruinoso en el que se encuentra el Patio de los Leones, y se destaca lo siguiente: desplome de todas las columnas, hundimiento de los templetes, daños en los tejados, enchapados, solerías y necesidad de reconstruir el zócalo de azulejo (vara y media de altura y con una superficie cubierta de 130 varas cuadradas). En este mismo reconocimiento se dice que el Mirador de Daraxa se encuentra completamente desplomado y amenaza ruina, y teniendo en cuenta que los tirantes colocados no evitan el desastre y que el desplome existente seguía incrementándose, se hace necesario el recalce de los muros. Estas obras se realizarán poco después.

Como reparación Juan de Rueda propuso el desmontar las armaduras de los templetes, modificar la pendiente de los tejados, aplomar las columnas, construir de nuevo los arcos, rehacer los vaciados de yeso y reparar las solerías. Todo esto se incrementó con los problemas también incluidos en el reconocimiento de las Salas de Abencerrajes y Dos Hermanas (en estas referencias aparece por primera vez el nuevo nombre de la Sala de las Losas como Sala de Dos Hermanas).

Las cubiertas de los pabellones o templetes fueron modificadas de 1691 a 1694 subiéndose los muros sobre el friso de madera y disminuyéndose su inclinación; la reforma fue realizada por Diego del Arco.

Las obras siguen un ritmo lento y en 1700 sólo se habían reparado las columnas y tejados. De hecho en un informe de este año, después de un reconocimiento ordenado por la Junta de Obras y Bosques se recoge que el resto de las obras están sin realizar. A partir de estas fechas las actuaciones de reconstrucción-reparación casi se paralizan, cuestión que se confirma con la falta de referencias y datos en los años siguientes. Se tiene sin embargo una breve reseña del año 1705 sobre reparaciones realizadas en la Sala de Dos Hermanas por el albañil Diego del Arco.

De nuevo la presencia en el recinto nazarí de determinadas personalidades activa las actuaciones en temas de adecuación y reparación. Así en el año 1729 y con motivo de la visita de Felipe V se repara la fontanería, solería y yeserías (zona de templetes) en el Patio de los Leones, también se actúa en las Salas de Abencerrajes y Dos Hermanas. En el caso del Patio de los Leones las obras consistieron en el recubrimiento de las cañerías de plomo; la colocación de saltadores de latón en todas las fuentes; el solado de nuevo de los templetes y la adecuación de sus paramentos

“imitando lo antiguo”; en la Sala de Dos Hermanas se restauraron las paredes y se enlució lo que estaba liso, sin tallar; de igual forma se realizó en la Sala de Abencerrajes.

La anulación de esta importante visita paraliza de nuevo las obras, y no será hasta 1744 cuando aparezcan nuevos datos de intervenciones realizadas en el palacio nazarí. Sigue a continuación una época de desgana hacia la Alhambra, pero de alguna forma también comienza a resurgir un interés por los restos árabes y su restauración, que será predominante en el siglo XIX. De las primeras obras que se inician con este nuevo avance destacar en el año 1757 el aplomado de las columnas, arcos y arreglo de los aleros de los templetos del Patio. Pero será a final de siglo cuando de nuevo la necesidad obligue al reinicio de las obras. Así en el año 1784 se precisa apuntalar el Patio por el desplome que presentan las columnas, y es necesaria la reconstrucción de los tejados y el arreglo de azulejos, que presentan numerosos desperfectos.

En el año 1787 (5 de Noviembre) se produce la descarga de un rayo, que contribuyó al estado de ruina en toda la Casa Real.

En los años 1791 y 1792 se detalla tras los reconocimientos realizados, el estado que presentaba el Patio de los Leones: las paredes del Patio se encontraban desconchadas y sus revocos y chapados en muy mal estado o incluso perdidos; las columnas del cuarto de Poniente están muy desplomadas y su tejado necesita reparación.

En el año 1792 se tiene referencia de la presencia de un taller de sedas y telares en la Sala de Dos Hermanas. En el año 1795 el hundimiento de la cubierta y la lluvia continuada dañan el Patio y la fábrica, por lo que es preciso eliminar el material ruinoso y reconstruir las cubiertas.

En 1802 se compran azulejos del Convento de la Cartuja para reponer en la Sala de Abencerrajes.

Durante los años 1810 a 1812 las tropas francesas ocupan la Alhambra usándola como cuartel. El mariscal Sebastiani en el primer año de ocupación arranca el pavimento del Patio de los Leones y coloca en su lugar un jardín de rosas, jazmines y arrayanes; en 1812 se procede a la realización de pequeñas reparaciones en los tejados del Patio. De la breve estancia napoleónica solo decir que su política de intervenciones fue compensada negativamente por su desastrosa retirada.

Hasta el año 1820 solo se tienen noticias de pequeños arreglos en los tejados del Patio.

En el año 1828 se inicia la dinastía de los Contreras, que se prolongará hasta 1907. José Contreras fue nombrado encargado de las obras del Monumento nazarí, y a partir de entonces será este arquitecto y los sucesores de su dinastía los que continúen con los trabajos y obras en el Monumento. Todo ello, coincidiendo con una mayor asignación en los presupuestos, reactivará de nuevo el proceso de reparaciones, remates, arreglos, etc.

A partir del año 1830 se realizan según Gómez Moreno “limpiezas del palacio de los modernos aditamentos que desfiguraban y no se descuidó el embellecerlo”, (esos modernos aditamentos consistían en la colocación en los ángulos de pilares de madera, y se debió a la visita que realizó a la Alhambra el Infante D. Francisco de Paula). Son muy pocas referencias las que se tienen de estas fechas; todo se resume a breves reparaciones en tejados.

En el año 1835 se añaden a la fuente la pequeña pirámide y el surtidor que, como es sabido, estuvieron colocados bastante tiempo (hasta el año 1966, en el que la fuente fue restituida al esquema que tuvo en el siglo XVI).

En 1837 se quitan las puertas de madera de la Sala de Abencerrajes. Durante la restauración se corta en dos mitades su postigo no obstante la fina labor de lacería que poseían.

En 1839 se raspó y limpió toda la fuente de los leones. La operación, que afectaba también a las columnas del Patio fue suspendida ante las protestas de las Academias y los medios artísticos granadinos. También en este mismo año se proyectó corregir el desplome de las galerías y templete del Patio, así como reparar las armaduras de cubierta y los techos de lacería.

El mal estado del Patio de los Leones con las galerías y arcadas desplomadas y cuarteadas, con los adornos perdidos o deteriorados y un templete prácticamente en ruinas, hizo que en 1846 se realizara un presupuesto para las obras; eso propicia que ese mismo año comiencen las obras del Patio.

Con el nombramiento de Rafael Contreras como jefe del taller de restauración comienza una de las etapas más fructíferas en actividad constructiva, también será una de las que más polémicas susciten con diversas entidades ciudadanas. Es el año 1846 después de su nombramiento en el que comienzan las obras en el Patio de los Leones. La primera de ellas tuvo afán eminentemente conservador: se hacen desaparecer los jardines que Sebastiani mandó realizar en 1810, debido principalmente a las filtraciones de agua que provocaban y que ponían en peligro la estabilidad de la construcción.

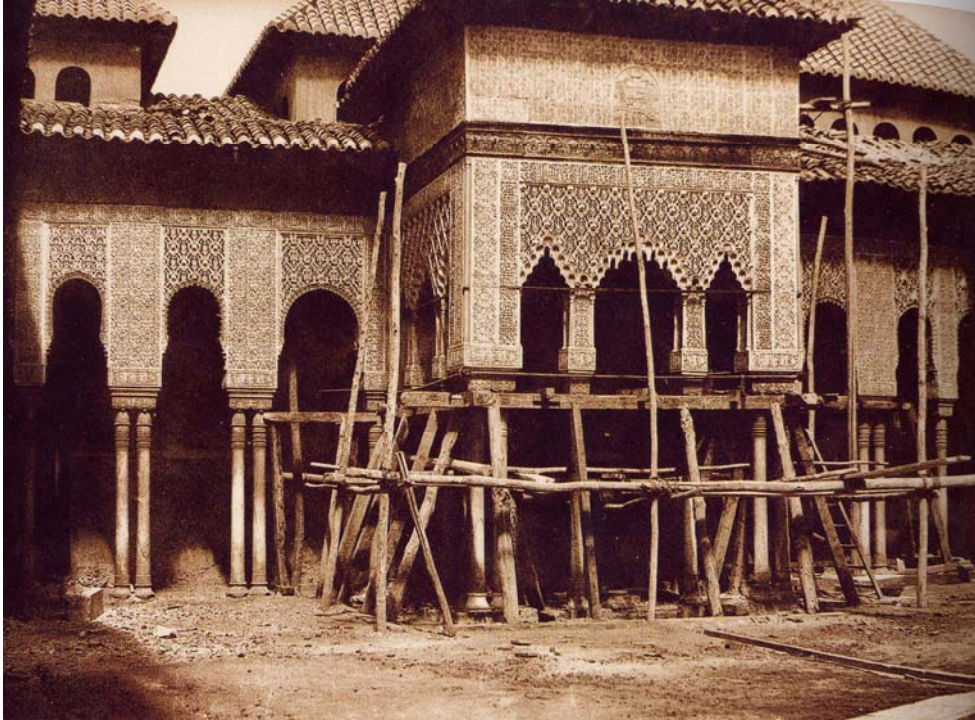
En el año 1851 el Patio de los Leones fue también objeto de obras de gran entidad. Se atiranta el templete oriental y se elimina el apuntalado de madera; a esta reparación estructural se le añaden la renovación de los arabescos y solados de las galerías. El arquitecto Juan Pugnaire proyectó el alero con canes y frisos así como las armaduras de las cubiertas a renovar, entre ellas las de la cúpula. Se tardó en acometer el proyecto ya que en el año 1853 el estado del conjunto seguía siendo deficiente. Es de destacar, sin embargo, de ese año la reconstrucción de la mitad del tejado y armadura de la galería junto a la Sala de los Reyes y parte contigua a la Sala de los Abencerrajes así como la reposición de los arabescos. Ese mismo año se recalzan de nuevo los muros del Mirador de Daraxa. Obras de menor importancia también se realizarán ese año en la Sala de Dos Hermanas, descubriéndose tres ventanas sobre el Patio de los Leones en el Mirador de Lindaraxa.

A partir de 1854 se inician de nuevo los trabajos en el Patio de los Leones extendiéndose las obras hasta aproximadamente 1859. En ese periodo una de las primeras obras a destacar será la sustitución de la cubierta general de la Sala de la Justicia (actualmente Sala de los Reyes), obras que se desarrollaron entre 1854 y 1858. La obra, a juicio de Gómez Moreno González 30 años después, no fue acertada.

Entre los años 1855 y 1857 se renuevan parte de las armaduras de las galerías, rehaciendo el alero con talla basada en dos canes que se encontraron de la primitiva cornisa; también se repararán yeserías y zócalos de azulejos.

En el año 1856 se restauran las puertas de lazo de la Sala de Abencerrajes.

En el año 1857 se tiene previsto el proyecto de la reforma de la armadura de la galería inmediata a la Sala de los Reyes, actuaciones que requieren eliminar la fábrica sobre el friso, sustituir el alero y cambiar la armadura y el tejado. En la ejecución de las obras fue preciso realizar apuntalamientos, desmontado de columnas, realización en ellas de cimientos de hasta 3 m de profundidad y asentamiento sobre sillares de piedra dura de Alfacar, así como labrar 8 basas nuevas. La nueva cubierta se hizo con estructura diferente a la antigua y en el templete se construyó la bóveda exterior. Estas obras fueron dirigidas por Rafael Contreras y el arquitecto Baltasar Romero (Figura 1.5).



*Figura 1.5. Obras de remodelación en el templete de Levante (fotografía año 1858).*

En 1859, se coloca la cubierta cupular del templete de Levante del Patio de los Leones.

En 1863, son descubiertos los antiguos adornos de la Sala de los Mocárabes, que aparecen con todo su colorido. Como es lógico, se reconstruyó la parte destruida de acuerdo con lo existente. Pero, curiosamente, se conservó la bóveda cristiana del siglo XVII. Las obras se prolongan durante el año 1865, completándose la restauración en el año 1866, cuando se le añaden al templete de Levante unas “caprichosas y desgraciadas almenitas” en sustitución de las de barro cocido y sin barniz que se habían colocado provisionalmente; estas se mantendrán hasta el año 1934. Esta reforma ocasiona humedades y recalos en los templetes, que serán reparados posteriormente por D. Mariano Contreras. Ese mismo año también se interviene en la galería de la Sala de Dos Hermanas.

En 1870 la Alhambra pasa a ser considerada Conjunto Monumental, este mismo año se abre la puerta de la alcoba izquierda de la Sala de Dos Hermanas, y se cierra la que desde el pasillo que va a las habitaciones de Carlos V se abría a la Sala de los Ajimeces (Sala de Dos Hermanas).

En el año 1871 fueron restauradas las pinturas de la Sala de los Reyes, que se encontraban en mal estado debido a las continuas filtraciones de agua de lluvia. Las reformas anteriores a esta etapa no dieron resultado, y las humedades presentes, debido a las innovaciones de mitad de siglo, acabaron pudriendo la estructura de madera del templete de Levante del Patio. La intervención realizada por Mariano Contreras en el año 1889 evitó el desastre. También las habitaciones altas de la Sala de Dos Hermanas (al poniente del mirador) necesitaron de la reconstrucción del alero con canchillos inclinados, debido al estado de pudrición en que se encontraban. Con estas intervenciones se inician las referencias a la etapa de Mariano Contreras que se extiende de 1888 a 1907.

El año 1890 estuvo marcado por un grave accidente: “en la noche del 15 de Septiembre Granada se conmueve: la Alhambra está ardiendo. El incendio se propaga con rapidez, se extiende por el Patio de los Arrayanes y amenaza con extenderse al Patio de los Leones”. No llegó a afectarle.

Modesto Cendoya durante los años 1905 a 1915 será quien aparezca como parte interviniente en las diversas obras que tienen lugar en el Monumento en este ya principios del S.XX. La primera de ellas, en el año 1905, consiste en reparar los arabescos del Patio de los Leones. Además se trabaja en los arcos de la galería anterior a la Sala de los Reyes, en los del templete de Levante, y en los desperfectos provocados por los pájaros en los calados de las galerías.

De estos primeros años destacar un estudio preliminar realizado por Zabala sobre las características del subsuelo y su problemática, debido a la humedad y la falta de saneamiento; destacando además de la permeabilidad del suelo, la pérdida en las conducciones de agua de las que se desconoce el encauzamiento y el curso de las mismas, causas que pueden producir la ruina completa a las distintas zonas entre ellas el Patio de los Leones. Comenta también la existencia de escombros bajo algunos de los cimientos y como puede afectar al deterioro de las construcciones. Respecto a las cubiertas las bóvedas de las Salas de Dos Hermanas y Abencerrajes, presentan grietas que indican un principio de movimiento.

En cuanto al Patio de los Leones Zabala comenta de forma general: “*es preciso señalar muy especialmente la conveniencia de registrar y restaurar las conducciones de agua y de reponer las solerías, viéndose en muchos sitios abolsados los suelos y los zócalos; ..... y en algunas de las grandes salas llegarán a producirse desprendimientos de azulejos y otros males si no se evita el daño*”. Dichos zócalos ya no existen en las paredes de las galerías. Finalmente este autor comenta la no existencia de peligro en galerías y templetos.

Al igual que el comentado, el informe presentado por García Alix ante la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando los primeros días de Junio de 1906 bajo el título de “Alhambra de Granada. Obras de seguridad que urge realizar en ella”, incluye como obras necesarias para la conservación del Patio de los Leones y sus salas, las siguientes: en el Patio de los Leones aplomar todas sus columnas, reconstruir las armaduras de las cubiertas de sus galerías y del templete de Poniente, y colocar zócalos y solerías. En las Salas de Abencerrajes, Dos Hermanas y de los Reyes, hay que reconstruir la cubierta de la Sala de Abencerrajes, colocar contrafuertes exteriores en el muro de Poniente de la Sala de los Reyes reponer su solería y colocar cristaleras en los vanos de los cuerpos de luces de estas tres salas, para evitar que el agua de lluvia penetre en el interior como viene sucediendo hasta ahora.

Las obras se inician durante el mes de julio de ese mismo año y así se realiza el extendido de arena en el Patio y la reparación de las cañerías de la fuente. También se labra y coloca el alero de madera para la galería norte, y se repara la armadura de esta galería. Se lleva a cabo una limpieza y revisión general de los tejados de la Casa Real y se trabaja en los de la Sala de la Justicia, Patio de los Leones, Sala de Dos Hermanas, Sala de Abencerrajes y templete de Poniente del Patio. Igualmente se repara la solería de la galería de Levante del Patio de los Leones.

Durante el año 1908 se inicia un completo plan de saneamiento en el área del Patio de los Leones con la finalidad de restablecer la red de alcantarillado. Al mismo tiempo se reparan las zonas más afectadas por las humedades anteriores. Así, a principios de año se repara el saneamiento del foso existente a espaldas de la Sala de Abencerrajes y se inicia la investigación del alcantarillado del Patio de Lindaraja y el existente bajo la habitación del ángulo segundo izquierda del Patio de los Leones. En esta misma época se apuntala el suelo de esta habitación, se realiza un empedrado en el foso tras la Sala de los Abencerrajes y se reparan los muros en esta sala. En la Sala de Dos Hermanas se eliminan los revestidos modernos colocados. También en el año 1908 se investiga la red de alcantarillado del Patio de los Leones, los templetos y el retrete general del Palacio. Se reconstruye el alcantarillado y se revisan los tejados del Patio de los Leones. En cuanto a carpintería, se restauran las puertas de las Salas de Dos Hermanas y Abencerrajes, y se colocan las almenas una vez talladas.

En el verano del año 1909 continúan los trabajos en el Patio de los Leones, acometiéndose el saneamiento del suelo del ángulo sureste. Se sanean los ángulos noreste, noroeste y suroeste. Se reconstruye la alcantarilla de la Fuente de los Leones; a continuación se colocarán los canales de mármol del Patio y se instalarán las tuberías de plomo y canales de la Fuente de los Leones. Finalmente se colocan las tuberías de hierro del Patio y galerías y será entonces cuando se pongan las faldetas

de mármol para acompañar las canales. Por último se reparan las cuatro puertas de madera de los ángulos del Patio.

A lo largo del año 1910 se reducen las actuaciones en el Patio y las Salas; tan solo cabe destacar la reparación del tejado de la galería de entrada, el remate de la Fuente de los Leones, las solerías de las galerías y el arreglo de las goteras en la Sala de los Reyes y en las alcobas de la Sala de Abencerrajes. El arquitecto D. Modesto Cendoya realiza importantes modificaciones en el saneamiento, colocando colectores impermeables en forma de artesas de hormigón en los cuatro sectores del patio y arreglando conducciones de agua y atarjeas.

En el año 1911 se acometen obras de restauración, mantenimiento y limpieza, sin que las intervenciones que se conocen muestren ninguna actuación estructural. Se realizan trabajos de restauración en los arabescos de las galerías del Patio de los Leones y la limpieza de los tejados del Patio de los Leones, Sala de los Reyes y Dos Hermanas.

En 1912 se coloca la solería de mármol de las salas de Abencerrajes y Dos Hermanas según lo previsto en las actuaciones de Modesto Cendoya. La canalización definitiva del Patio de los Leones no se realiza porque la pavimentación de sus galerías está en “litigio arqueológico” debido al desconocimiento que se tiene respecto a la existencia o no de jardines en los cuatro cuarteles en los que se divide su suelo, el cual está preparado para recibir cualquiera de las dos soluciones. De todas formas y a pesar de los posibles enfrentamientos entre técnicos, las actuaciones no se paralizan, así en la Sala de Dos Hermanas se instala la tubería de hierro para la fuente y se arregla y limpia la solería de mármol. En la Sala de los Abencerrajes también se reparan y sanean las solerías y se restauran los arabescos de su entrada. Por último se inician trabajos de investigación en el Museílo del Cuarto de los Leones.

Durante el año 1913 se continúan las labores de investigación y reforma en el citado Museílo. También durante este año se reparan los retretes del Patio de los Leones y se siguen restaurando sus arabescos y los de la galería existente delante de la Sala de la Justicia. También en esta sala se reparan las imitaciones de azulejos de las pilastras. En la Sala de los Abencerrajes se pule la solería de mármol, además se colocan dos losas de mármol a su entrada. En la zona intermedia entre el Patio de los Leones y Comares se abre el hueco para el acceso que comunica desde el Patio del Estanque con el foso a espaldas de la Sala de Abencerrajes, colocándose una puerta de dos hojas. Asimismo se reparan los paramentos lisos de la nave de entrada al mismo, llevando a cabo la construcción de las cisternas, y la colocación y restauración de los arabescos de la entrada al Patio.



En el año 1914 se redacta un prolijo Plan de Obras en el Monumento sin que se tenga constancia de proyecto al respecto. De la previsión de obras sólo se realiza el enlucido del paso entre los Patios de la Alberca y de los Leones, para posteriormente colocar la solería.

En el año 1915 se repararon las cubiertas de las salas de Abencerrajes y Dos Hermanas. A partir de entonces y hasta el año 1923 no se tiene constancia de las obras realizadas. Será Torres Balbás, quien de nuevo inicie un seguimiento detallado de todo lo realizado, y que de forma continuada irá reflejando en su diario; esto va a permitir conocer en detalle la evolución sufrida por el Patio de los Leones durante al menos los años en los que actuó en el Monumento.

Según estas anotaciones, a principios de verano del año 1923 comienzan a solarse los locales del Patio del Harén continuando con el Patio de los Leones y sus pórticos, que se solaron con rombos vidriados blancos y verdes con aliceres verdes. En la galería de Poniente del Patio, en la puerta que antiguamente daba a las habitaciones destruidas para construir el Palacio de Carlos V, se colocó un antepecho con balaustres torneados de los que existían en el almacén. Se abrió la puerta, que antiguamente se encontraba tapiada, en el paso existente entre el aljibe y el Patio de los Leones con la habitación contigua a la capilla del palacio de Carlos V. Se quita el repartidor de agua en el Patio del Harén y locales inmediatos que impedía el paso de la puerta de salida de la escalerilla inmediata al aljibe a la habitación con acceso directo al Patio de los Leones, y se completa la bóveda de cañón de ladrillo de dicha escalera hasta enrasarla con el paramento exterior del muro norte del aljibe.

En la alcoba de Levante de la Sala de los Abencerrajes se quitó el suelo de la habitación y se descargó todo el relleno que tenía debajo. Se colocaron también vigas de hierro en los suelos de las habitaciones, sobre las dos alcobas, que a su vez ataban una viga transversal a la que se atornillan las que mantenían la tablazón de los techos. Entre las vigas se forjaron bovedillas de rasilla y los muros se maestrearón y guarnecieron.

Se repasan los techos de las alcobas de Abencerrajes, se reparan sujetando las piezas sueltas, y colocando las piezas lisas que faltaban y se aplica aceite de linaza y barniz a todo.

En las ventanas de las habitaciones situadas encima de las alcobas de Abencerrajes, se colocan rejas típicas del siglo XVII. Se limpiaron y aseguraron las yeserías del Patio y galerías, dejando dadas de yeso, lisas y en un plano algo más bajo, todas las superficies no decoradas. Los arcos de la galería de Poniente se completan, dejándolos lisos. Se sacó el zócalo, todo ello cuidando de no tocar los restos de pintura que quedaban en la zona.

A comienzos del año 1925 comienza la exploración del Patio de los Leones; es el inicio de una serie de obras que afectan a dependencias y elementos tales como la “cocinilla” situada al norte del Patio de los Leones, otras habitaciones sobre la anterior, salida del Patio de los Leones al Partal, etc. De todo ello Torres Balbás nos lega una pormenorizada e ilustrativa descripción en su Diario de Obras.

El año 1926 comenzó con la limpieza de polvo de las decoraciones de escayola existentes en las habitaciones a saliente y poniente de la Sala de Dos Hermanas, quitando las capas de cal sucia que tenían sus revestidos para finalmente blanquearlas.

En octubre se envía a Madrid el proyecto de reparación de la galería del Patio de los Leones. Se levantan los tejados y se rehacen las armaduras de la galería sur entre los templetes, además de sujetar bien los techos. Igualmente se arreglan por completo los aleros sin aprovechar de ellos más que los canecillos y alguna parte decorada de las tabicas. Encima de los pares se pusieron dos hojas de rasilla y sobre ellas la teja. Los aleros se sujetaron convenientemente con flejes a una canera. Se arreglan y limpian los tejados altos de esta zona. También se repararon los techos de lazo así como las decoraciones de escayola de las arquerías, y se colocan algunas parejas que faltaban.

En los primeros días del año 1927 se envió a Madrid el proyecto de obras complementarias a realizar en el Patio de los Leones, Sala de los Reyes y galería sur del Patio de la Alberca.

A principios del mes abril comenzó la reparación de la parte que faltaba de las cubiertas y alero del Patio de los Leones (mitad septentrional). Se retira la teja y las cubiertas, para volver a colocar los pares bien sujetos y dos hiladas de rasilla, la primera con yeso, y la otra con cal hidráulica. Se quitan las tejas vidriadas, sustituyéndolas por viejas corrientes. Se aseguran los aleros, fijándolos a las rastras con pletinas. Los techos de las galerías también se sujetan con pletinas a viguetas colocadas sobre ellos, poniendo nuevas las piezas que les faltaban. Se quitan del mirador que está sobre esta zona los guarnecidos de sus muros exteriores, volviendo a guarnecerlos. Se abrió el hueco de ventana que daba a la escalera de subida a la planta alta de la Sala de las Dos Hermanas, se repararon todos los techos de lazo de las galerías clavando las piezas sueltas, y poniendo nuevas las que faltaban. Siguieron luego reparando los techos de lazo de las galerías, el del templete de Levante, terminando por hacer la cubierta del ángulo al noroeste que había quedado suspendido.

Así mismo, se realiza una intervención de gran envergadura en las habitaciones altas de la Sala de Dos Hermanas que se encuentran en la zona de los

baños (desmontado de cubiertas, investigación de sus muros y toda una serie de intervenciones de reparación y reposición de disposiciones originales). De todo ello vuelve a dejar Torres Balbás una inestimable descripción.

Se repararon las arquerías de yeso del Patio de los Leones, y se quitaron los revestidos del Museillo (nave norte del Patio de los Leones, entre este y el de los Baños), levantándose también las solerías. Finalmente se abrieron las ventanas en los retretes que daban al Patio de los Leones.

En este año (1927) se envió a Madrid el proyecto de reparación de las habitaciones de la Sala de Dos Hermanas.

En el año 1928 se realizan trabajos de jardinería, con la plantación de tres naranjos.

En el año 1929 se quitó la decoración de dibujos grabados hecha en el siglo XIX en los revestimientos de los muros de las galerías, colocando en la zona del zócalo de azulejos fragmentos de la antigua cenefa de yeso compuesta de círculos y cartelas con inscripciones cursivas, y además se sustituyó la solería de barro cocido de las galerías por losas de mármol.

La nueva construcción y reforma del tejado de la Sala de los Mocárabes del Patio de los Leones obliga a un nuevo encaje de sus desagües hacia el sur con los tejados contiguos, e incluso a realizar pequeñas modificaciones en esa parte de los edificios que cubrían. Se trató de una obra intrascendente, pero que permitió observar de nuevo la singularidad de la arquitectura nazarí, perdida entre reformas y adosados cristianos a la obra musulmana, especialmente difuminada en esta parte por numerosas vicisitudes que cambiaron profundamente el aspecto, función e importancia del lugar y de aquella parte de los edificios que delimitan con él.

Al modificar la organización de los palacios de Comares y de los Leones, reajustados para crear la Casa Real cristiana, la puerta del Palacio de los Leones pasó a ser puerta común para Comares y Leones.

Durante el año 1930 se restaura la armadura de la parte más al norte de la Sala de los Reyes; se observan recalos y aparecen podridas casi todas las cabezas de los pares que entraban en los muros. Se pone un canal de plomo y se sustituyeron los pares podridos, además se colocó sobre ellos rasilla y teja. Se quitaron los revestidos de la galería de mediodía del Patio de los Leones, dejando a la vista tres ventanas y una pequeña puerta que se tabicó luego por el lado del Patio. Esta puerta daba al arranque de la escalera al Patio del Harén. Se quitaron también todas las decoraciones realizadas por Contreras, se guarnecieron los muros previamente desyesados con un enfoscado de cemento, y se solaron las galerías con mármol. Sobre el lugar que ocupó

el zócalo se puso la faja horizontal de escayola decorada que había antiguamente, y parte de cuyos fragmentos se conservaban en la parte alta del templete de Poniente, de donde se habían desmontado previamente. Donde no existía esa faja se proyectó su posible continuidad con dos líneas. En la galería del sur aparecieron bajo el pavimento los restos de un suelo de gujarros más bajo y ladrillos de construcciones antiguas. En la galería de Poniente se observa la antigua construcción compuesta por tubos morunos recibidos con zulaque y protegidos en una envoltura de ladrillo que daba agua a las fuentes más pequeñas. En la galería de Levante apareció una capa de hormigón, moderna, de asiento de solería, que no se levantó. Se termina el solado de mármol, a falta de solar los batientes de los arcos a la Sala de los Reyes, y colorear el zócalo.

Se colocan los batientes de mármol en las puertas del Patio de los Leones a la Sala de los Reyes y se encola el zócalo del Patio de los Leones.

En 1933 se levanta la solería de la Sala de los Reyes, y se volvió a solar de nuevo. Se investiga el subsuelo sin éxito, encontrándose tan solo unas atarjeas, posiblemente salida de humos de un horno o caldera. Se rehizo el alero y se reparó la armadura del Mirador alto de la Sala de Dos Hermanas.

Durante el año 1934 las actuaciones fueron bastante importantes, la primera de ellas consistió en el terraplenado y colocación de firme y solería en la habitación del ángulo noroeste del Patio de los Leones. Se estucaron en blanco las paredes y se demolió la escalera. A fines de diciembre se terminó de reconstruir la cubierta del templete de Levante del Patio de los Leones, sustituyendo la media naranja de escamas vidriadas de colores por el actual tejado a cuatro aguas, decisión que provocó discusiones de muy diversa índole. En la parte trasera de la cubierta se hizo una falsa pequeña. En la Sala de Abencerrajes se limpian las decoraciones de escayola, se levanta el zócalo de azulejos de las alcobas que estaba hinchado y se coloca de nuevo. También se sanearon los muros.

La rebelión militar de 1936 acaba con la fecunda labor de Torres Balbás en la Alhambra y a partir de aquí los datos recogidos corresponden a intervenciones de F. Prieto Moreno entre otros.

En el año 1940 se crea el Patronato de la Alhambra y Generalife como organismo autónomo.

En el año 1966 tiene lugar la consolidación y restauración del templete oeste del Patio de los Leones.

El muro interior existente entre el templete y la sala contigua se encontraba desplomado hacia el Patio a causa del empuje de las cubiertas de la nave. Esto

impedía llevar el templete a su situación original. Se opta por adelantar las basas de las columnas hasta conseguir la verticalidad de los paramentos. Esta operación ya se realizó en anteriores obras de consolidación de las galerías del Patio. Precisamente en los ángulos, donde los empujes quedan contrarrestados, no hubo necesidad de avanzar las basas de las columnas. Las yeserías que cubren el cuerpo alto son reemplazadas por una reproducción con el fin de preservarlas del desgaste y la acción del tiempo, y colocarlas después en los paramentos interiores de las galerías. Realizada la consolidación, se hicieron desaparecer las barras de hierro que desentonaban con la decoración del templete.

Respecto a la Fuente de los Leones, se suprimen los apoyos de la taza sobre los lomos de los leones y se baja la taza a su posición original.

Se realiza un alero para el templete del Patio de los Leones y una armadura de cubierta en el mismo templete.

Durante el año 1969 predominan los trabajos de carpintería, que consistieron en la construcción de armaduras de madera, reproduciendo las existentes en forma de barca, para posteriormente colocarlas en los techos abovedados de las pinturas de la Sala de los Reyes, con el fin de realizar estudios sobre técnicas de restauración y copia de dichas pinturas.

En el año 1970 se restauran los aleros del Patio de los Leones; las puertas de las Salas de Abencerrajes, de Dos Hermanas y los artesonados de las antesalas.

En 1974 y tras varios años de debate sobre el tema, se procede al ajardinamiento del Patio de los Leones, que tiene lugar entre febrero y junio de ese año. Se hizo una exploración para tratar de obtener su nivel primitivo, pero ante la dificultad que ofrecía la perforación de la losa de hormigón construida a principios de siglo con el fin de consolidar las galerías y privarlas de humedades, se abandonó el proyecto y se acometió la plantación con el nivel existente.

Se levantó el relleno de arena sobre las cuatro artesas de hormigón de los cuadrantes, y manteniéndose el drenaje de piedra y grava, se procedió a echar la tierra vegetal que habría de constituir la base para la vegetación. Se eligieron plantas de bajo porte con calidades de flor pequeña y colores oscuros en la mayor proporción junto a otras de color más destacado.

En el año 1975 y viendo el resultado de las reparaciones llevadas a cabo el año anterior, y tras llegar a la conclusión de que el trabajo realizado fue poco satisfactorio, ya que la vegetación adquirió un desarrollo excesivo y el color de las flores restaban serenidad a la arquitectura del Patio, el jardín se levantó y se procedió

a un tapizado con plantas de diversas tonalidades, gris verdoso, verde claro y verde oscuro, conservándose algunos arbustos de porte bajo en diversos puntos aislados.

Se restauran los restos de muros de la primitiva organización inicial de acceso al Patio de los Leones entre el Patio y la Rauda, y se construyen las barcas para la reproducción de las pinturas de las bóvedas.

Durante los años 1974-1975, se procede a la restauración de las puertas de madera situadas en el Patio de los Leones.

Durante el año 1977 las referencias sobre las obras realizadas en la Casa Real nos remiten a reparaciones en las cubiertas de las galerías. Se hace referencia de nuevo a la reproducción en escultura de un león de la fuente por el artesano de Córdoba García Rueda. Asimismo se procede a la restauración de las pinturas de la Sala de los Reyes por Santos Ramos, que realiza en las bóvedas nº 1 y 3 la fijación y consolidación de las capas pictóricas. Destacar también de este año las restauraciones llevadas a cabo en las inscripciones de algunas salas del Patio.

A lo largo del año 1978 se llevan a cabo diversas pruebas para la ordenación del Patio. El proceso fue lento por la diversidad de criterios existentes, que obligaban a un sinnúmero de pruebas, visitadas en numerosas ocasiones por la Comisión de Obras y diversos vocales del Patronato.

Aprovechando el levantamiento del suelo del Patio, se renuevan los áridos del drenaje existente en el subsuelo y se colocan nuevas conducciones de agua obstruidas en un 80% de su sección. Las obras afectan también a la pavimentación y jardinería. En la Sala de los Reyes se continúa con la restauración y consolidación de las pinturas de la bóveda nº 3 de la sala.

En el año 1979 se terminan las obras de la nueva solución de pavimentación y jardinería del Patio de los Leones. La solución adoptada consiste en la colocación de una acera de mármol blanco Macael de 0,90 m de anchura, colocada a 18 cm por debajo del nivel de solería de la galería. Perimetralmente y rematando el pavimento de la acera se coloca un bordillo también de mármol.

Para determinar el nivel real del jardín con referencia al nivel de las galerías se realizó una cata estratigráfica del suelo; dicho estudio fue realizado por el Equipo de Geología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Granada. En él se informaba que a partir de los 0,40 m del nivel de las galerías, el terreno es el primitivo, geológicamente coincidente con el de la colina de la Alhambra, lo que demuestra, según ellos que no existía jardín con nivel inferior al actual.

En el año 1980 se repara el alero y cubierta de la primera bóveda de la Sala de los Reyes (la de la derecha según se entra en la sala), además de una nueva solería. Posteriormente se repara la bóveda de madera que soporta las pinturas de la primera bóveda de la Sala de los Reyes. También se realizan restauraciones en la piel y pinturas de la primera bóveda de la Sala de los Reyes. Finalmente se reponen varias losas de mármol en la galería del Patio de los Leones y en la entrada a la Rauda. Las últimas actuaciones de este año consistieron en colocar triángulos mixtilíneos (pechinas) en los vértices de las estancias de las bóvedas de la Sala de los Reyes.

En el año 1981 se llevan a cabo diversas obras en el palacio, con actuaciones en las distintas salas así como trabajos de limpieza y restauración de carpinterías, celosías, yeserías, escayolas, etc.

Una de las primeras actuaciones tiene lugar en la Sala de los Reyes, donde se restaura la primera bóveda de la sala. De allí se extraen gran cantidad de clavos, se injertan nuevos cueros en zonas determinadas, e incluso se inicia el dibujo de figuras. Se desmonta la cubierta de la que se repone la armadura, las rastras perimetrales, los parecillos y la tablazón; posteriormente se forra la cubierta con chapa de plomo de 3 mm. de espesor, y se cubre con una capa de compresión de mortero de cemento P-350 de 3 cm de espesor intercalando en el mortero mallazo metálico electrosoldado, donde mediante alambre galvanizado se ataron las tejas para evitar su desplazamiento, dada la gran pendiente de los faldones. También se renuevan las canales de chapa de plomo, colocándose tubos de aireación en la cámara que se forma entre la bóveda de las pinturas y la tablazón de la cubierta. Se construyen tableros tallados para la puerta del Patio de los Leones y puertas de la Sala de Abencerrajes y Dos Hermanas, y se realizan reproducciones de piezas de escayola en la Sala de Dos Hermanas.

Durante el año 1982 las actuaciones son algo más reducidas que en años anteriores limitándose las actuaciones a la Sala de los Reyes y poco más. De nuevo la bóveda centra los trabajos de restauración y consolidación de las pinturas en la Sala de los Reyes, aunque destacan también de este mismo año algunos trabajos realizados en solerías, techos y artesonados, incluyendo en los primeros el solado en una de las galerías del Patio y Sala de Dos Hermanas, y en los segundos la limpieza de los techos y artesonados de la Sala de los Reyes y paseo de la Sala de Dos Hermanas al Palacio de Carlos V. Se restaura además el collarín de un capitel en la sala de Mocárabes.

En el año 1986 se pinta a la cal la Sala de Mocárabes, ajustando la tonalidad a la de las yeserías existentes. Se protegen los umbrales cerámicos alicatados de los lados norte y este de la Sala de Dos Hermanas.

A lo largo del año 1990 los distintos servicios técnicos del Patronato incluirán obras de mantenimiento en distintas zonas del Monumento; por lo que se refiere al Palacio de los Leones destacar: colocación de los elementos del hueco en el paramento de la planta superior de la alcoba derecha de la Sala de Dos Hermanas (parteluz). Colocación de tablas policromadas y consolidación de la película pictórica en el capialzado de las zonas altas y dependencias de la Sala de Dos Hermanas. Consolidación y reintegración en taller de artesonados de Dos Hermanas. Colocación de dos almenas talladas en la Sala de Abencerrajes y en los artesonados centrales de entrada a la Sala se pegan y aplican pátina a algunas piezas de los laterales.

En la Sala de Dos Hermanas se restaura y coloca el ajimez de la parte alta de la alcoba desmontado en el año 1982. Una vez finalizados los trabajos de restauración se le aplica agua-barro; se limpian también los arcos de las habitaciones altas de esta sala.

En el año 1991 se acometen distintas labores de mantenimiento en el Palacio, entre ellas la mejora de la instalación eléctrica, instalación de iluminación a través de bañadores de techo y luz indirecta sobre los pies y limpieza y mantenimiento de fuentes ornamentales. En el taller de restauración de madera se finaliza la reparación del alfarje ataujerado de la alcoba izquierda de la Sala de Dos Hermanas.

Durante el año 1994 se interviene en trabajos de restauración y mantenimiento en los capítulos de yeserías, alicatados y cantería. Respecto a los trabajos de yesería decir que estos incluyen labores de mantenimiento y reparación de fragmentos y fisuras en los rombos calados del Patio. Por parte del taller de cantería se continua con la talla de la réplica de la taza de la Fuente de los Leones y en el Patio se limpia la columnata de los excrementos de los pájaros. Destacar por último en este año y con motivo de la exposición “Arte islámico en Granada. Propuesta para un museo de la Alhambra”, la restauración de diversas piezas entre las que se encuentran los capialzados y puertas de la Sala de Dos Hermanas.

Entre las actuaciones llevadas a cabo durante el año 1995 hay que incluir en el capítulo de mantenimiento de cubiertas la limpieza de las de la Sala de Dos Hermanas. Hay que destacar así mismo en los trabajos de restauración y mantenimiento los realizados en el capítulo de escayolas, con la reparación de los rombos calados en los arcos n<sup>os</sup> 19, 41, 42 y 43, y la colocación de malla de fibra de vidrio en la cara interior de los citados rombos. Igualmente conviene comentar además la intervención concreta en la puerta de la Sala de Abencerrajes.

En junio de 1995, y por una Comisión designada al efecto, se redacta un informe sobre las principales actuaciones en materia de conservación y obras en curso. Este informe es elevado al Pleno de la Real Academia de Bellas Artes de San



Fernando, y en él, además de aquellas actuaciones y soluciones ya adoptadas, se recoge un plan de disposiciones y actuaciones a realizar. Por lo que se refiere a las más directamente relacionadas con el Palacio de los Leones es destacable: el sistema de circulación de visitantes en torno a la galería perimetral, el tratamiento actual de la zona ajardinada con gravilla gris y la incidencia visual que provoca frente a soluciones anteriores, el estado de deterioro de la Fuente, actuaciones necesarias y posibles soluciones a la sustitución de elementos escultóricos, el desmontaje de piezas de carpinterías que provoca la supresión de yeserías originales del Patio, el estado actual de las pinturas sobre piel de las bóvedas de la Sala de los Reyes y la actuación y reparación de intervenciones anteriores.

Durante el año 1996 las actuaciones a destacar en el Patio de los Leones y sus salas se centran principalmente en los trabajos de carpintería y en la restauración de rombos calados y escayolas. Por lo que se refiere a elementos líneos se colocaron los capialzados de las puertas de la Sala de Dos Hermanas (desmontados y restaurados con motivo de la exposición del Legado Andalusi) actuando sobre una superficie de 9 m<sup>2</sup>. También en la Sala de Dos Hermanas se restaura el alfarje ataujerado de la alcoba este de la Sala, realizando los siguientes trabajos: “sentado de la policromía por medio de espátula caliente previa colocación de papel de celulosa con colletta, limpieza con tricloroetileno, reintegración de las lagunas de la preparación de la policromía, reintegración cromática con la técnica “rigatino”. Y protección final con Palaroid B72 al 3% en tricloroetileno”.

Para el año 1997, e incluidas en las tareas de mantenimiento que se realizan de forma periódica en los últimos años, merece destacar de nuevo en el Patio la restauración de rombos calados en la zona de acceso a la Sala de Dos Hermanas y la colocación de malla de fibra de vidrio en el interior de 35 de estos rombos. Durante estos trabajos se pudo comprobar la no originalidad de las escayolas por la falta de policromía e incluso por la firma del maestro de escayolas que las colocó hace unos años. Este mismo taller de escayolas también realizó labores de mantenimiento en las tacas de la Sala de los Reyes, Sala de Ajimeces, pasillo de entrada a la Sala de Abencerrajes y alcoba izquierda en la Sala de Dos Hermanas.

Después del traslado de las puertas de la Sala de Dos Hermanas al Museo de la Alhambra y tras su restauración se comenzó la ejecución de una copia de las mismas, de ella se tuvo terminada la estructura (peinazos y tablazón), el agramilado y la talla de taujeles de una cara y del 90% de la otra.

Durante este año (1997) se siguen realizando actuaciones en la restauración de rombos calados en los arcos de los pórticos del Patio, así como la colocación de malla de fibra de vidrio que eviten el deterioro provocado por el anidamiento de las aves, tareas que como ya se comentó se iniciaron en el año 1992.

Durante el año 1998 y dentro del programa de actuaciones periódicas que incluye el Patronato de la Alhambra y Generalife destaca en el apartado de mantenimiento de obras e instalaciones, que resumimos a continuación, trabajos en: mantenimiento de cubiertas consistente en limpieza completa de vegetación en las cubiertas del Patio y Sala de los Reyes, realizando también la sustitución de las tejas rotas. Mantenimiento de elementos pétreos, acometiéndose la limpieza de polvo y excrementos de pájaros en las columnas del Patio de los Leones; posteriormente se realizó una consolidación superficial en aquellas columnas que presentan problemas de desplazados; además se continúa con la réplica de la taza de la Fuente de los Leones.

Mantenimiento de escayolas y alicatados: se interviene en los rombos incluidos en los arcos n<sup>os</sup> 2, 3, 6, 17, 18, 30, 31 y 32; en este caso se realizan trabajos de limpieza, reparación de tabicas y rombos y colocación de la malla de fibra de vidrio.

Mantenimiento de elementos ligneos: se interviene por razones de urgencia dado el mal estado que presentan, en el alero y friso del Patio de los Leones, consistiendo en limpieza del polvo adherido, fijación de elementos desprendidos y reparación de piezas rotas y tratamientos específicos para la conservación de la policromía existente. Se procede además al decapado de las cuatro puertas ataujeradas del Patio.

Entre final del año 1999 y la primera mitad del año 2000 se realizan obras de adecuación en la Sala de Mocárabes que al igual que ha ocurrido en el resto de dependencias del Monumento abiertas al público se ve afectada tanto por el transcurso del tiempo como por el paso de millones de visitantes que por esta zona acceden al Patio. Los trabajos consistieron en la eliminación y sustitución del revestimiento o revoco existente en los muros y estucado hasta el nivel de arranque de las yeserías originales.

Paralelamente se procede a la sustitución completa del pavimento cerámico (incluidas piezas originales) por otro de similares características.

Dentro de las actuaciones previstas en el programa de conservación del Patronato de la Alhambra para el año 2001 se incluyen en la zona de palacios nazaríes y en concreto en el Palacio de los Leones el Proyecto de rehabilitación de la “cocinilla” completando así el programa de rehabilitación de cubiertas prioritario a la rehabilitación. Las obras se desarrollarán durante este año y parte del año 2002.

En el apartado de mantenimiento de fábricas y jardines se incluye la consolidación de las estructuras históricas de la Sala de los Secretos (sótano de la Sala de Dos Hermanas), procediéndose a la limpieza de las antiguas fábricas, refuerzo

estructural y eliminación de apuntalamientos de bóvedas y huecos realizados en fechas desconocidas.

En el año 2002 se interviene en el Patio del Harén, centrandose las actuaciones en las yeserías existentes en los muros que se encontraban en mal estado procediendo a su limpieza y aseguramiento. También se actúa en los aleros de esa zona procediendo a su limpieza, fijación y barnizado posterior.

Se realiza también en este año 2002 un estudio comparado de las pinturas del zócalo del Patio de Harén con otras zonas de la Alhambra (retrete de la Sala de la Barca y el Peinador Bajo) así como con las existentes en el Cuarto Real de Santo Domingo.

Se desmonta un león (orientado al sureste) de la fuente del Patio para proceder a su restauración.

En el año 2003 se sigue actuando en las habitaciones altas de la Sala de Abencerrajes, en concreto en la restauración de las pinturas existentes en los techos de madera de las habitaciones del Patio del Harén y del balcón orientado al oeste, sobre la primitiva entrada al Palacio de los Leones.

De la relación expuesta, un primer aspecto que resulta evidente es el diferente grado de intervencionismo que el recinto ha experimentado según las épocas, así como el diferente criterio y naturaleza de las intervenciones en cada periodo.

Son igualmente apreciables la falta de continuidad en las campañas de intervención, con periodos de obras e informes, a los que siguen largos periodos de inactividad y desinterés, de los que a menudo se sale merced al acaecimiento de alguna catástrofe o estado de inminente ruina, o el anuncio de alguna visita regia. En la Figura 1.6 se indican desde 1490 hasta la actualidad, aquellos años sobre los que se tienen referencias de informes o actuaciones, destacando aquellos en los que ocurrieron lo que podríamos considerar “eventos significativos” en el devenir del Monumento.

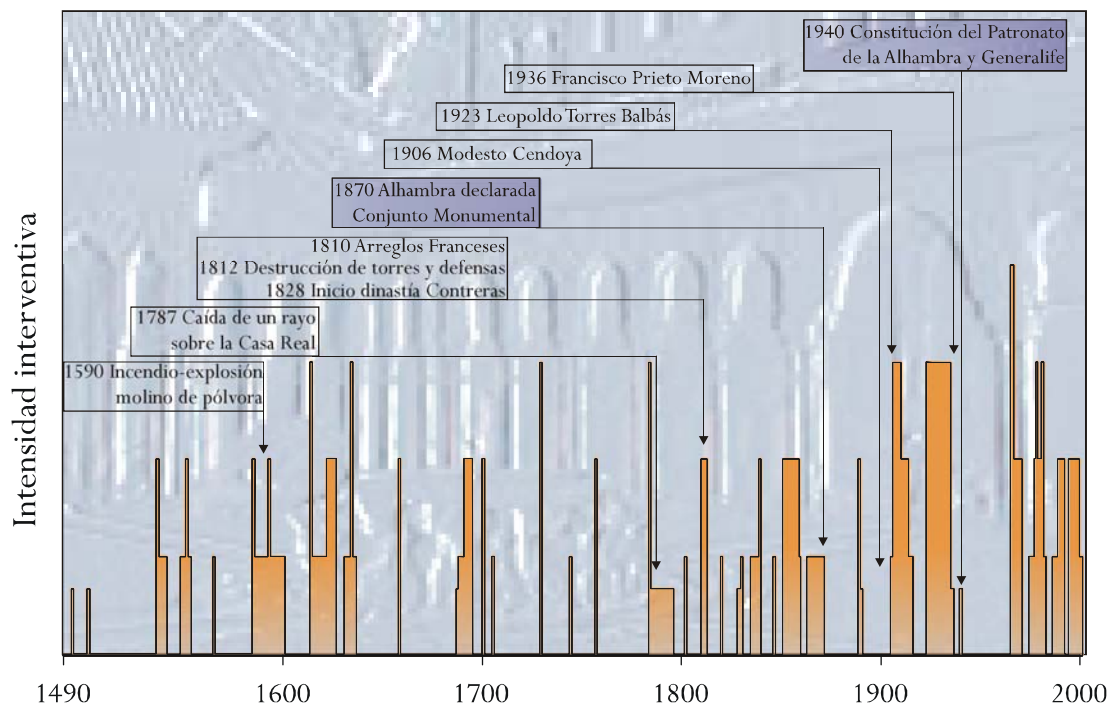


Figura 1.6. Esquema gráfico con las principales intervenciones acaecidas en el Patio de los Leones ordenadas cronológicamente (1494-2003).

Se observa que el número de años con intervenciones o informes constatados referentes al recinto del Palacio de los Leones varía sensiblemente de unos siglos a otros, con un lógico incremento de las correspondientes al S.XX.

Evidentemente la diferencia en el número de citas o de referencias no puede relacionarse directamente con el número de intervenciones en el recinto en cada época, puesto que no siempre ha existido el mismo interés y criterio en el registro documental de las intervenciones, e incluso de existir o haberse producido esta documentación, sus posibilidades de pervivencia y accesibilidad son diferentes.

En cualquier caso resulta llamativa la escasez de referencias a intervenciones en el S.XVIII, época de evidente desidia, de la que apenas se sale no obstante el anuncio de la visita de Felipe V, o la conmoción que debería haber ocasionado la caída de un rayo en 1787.

Son igualmente pobres en referencias la primera mitad del S.XVI, la segunda del S.XVII, la última etapa de la dinastía Contreras hasta la entrada de Modesto Cendoya como Arquitecto Conservador, y ya en pleno S.XX, la etapa de la guerra y

la posguerra civil hasta los años 60 en que el arquitecto F. Prieto Moreno reinicia la actividad en el Palacio.

A grandes rasgos puede considerarse que durante los dos primeros tercios del S.XVI las intervenciones consistieron fundamentalmente en la reparación y mantenimiento de elementos originales. No obstante ya se hace necesario intervenir estructuralmente en los templetos atirantando los mismos debido a la inestabilidad que presentan. A partir del último tercio del S.XVI las reparaciones conllevan la necesidad de reproducción de elementos ornamentales originales muy deteriorados o desaparecidos. También se incrementa la introducción de elementos ornamentales cristianos (e.g., pinturas platerescas en la Sala de Abencerrajes).

En el S.XVII las intervenciones de tipo estructural se incrementan algo, a partir de la primera mitad, no obstante las necesidades que debieron derivarse de la explosión de 1590. Esto obligó a incrementar las intervenciones estructurales en columnas, muros y cubiertas en la segunda mitad, aunque al final del siglo el estado seguía siendo casi ruinoso.

El S.XVIII ya ha sido comentado como época de desidia y escasa actividad, sobre todo en su primera mitad, lo que contribuye al hundimiento de cubiertas (Sala de Dos Hermanas) y actuaciones de urgencia en columnas y cubiertas.

Tras el breve paréntesis napoleónico, la entronización en 1828 de José Contreras como encargado de las obras en el Monumento supone una revitalización en las actuaciones para la conservación del mismo. Junto a las intervenciones de reparación y adecentamiento de elementos decorativos, a partir de la segunda mitad del siglo se abordan intervenciones estructurales de gran importancia, que afectan principalmente a columnas, cubiertas y armaduras. El interés por la conservación y recuperación de lo antiguo de este nuevo siglo son aportados por los Contreras y en ellos, los criterios conservacionistas propios de la época son evidentes y explícitos, marcando toda su política de intervenciones.

Las fechas inmediatas anteriores y posteriores al cambio de siglo parecen suponer un estancamiento al menos en relación a intervenciones sobre el Palacio de los Leones.

El periodo de Modesto Cendoya supone una intensa actividad en términos de restauración, mantenimiento, limpieza y saneamiento. Se inicia igualmente una etapa de aprovechamiento de obras para restitución de fisonomías y estructuras originales así como de una tímida investigación arqueológica.

De 1923 a 1936, con Torres Balbás, transcurre un periodo emblemático para la conservación del Monumento en todos sus órdenes. Sus intervenciones,

continuadas y muy detalladas aparte de su variado carácter (restauraciones, acondicionamientos, actuaciones estructurales, saneamientos, etc.), son aprovechadas para facilitar el inagotable afán investigador de este arquitecto, y le permiten abordar un amplio programa de recuperación de configuraciones originales.

Tras la inexplicable (o más bien injustificable) falta de referencias entre 1936 y 1966, los arquitectos Francisco Prieto Moreno (1966-1978) y después Joaquín Prieto Moreno (1979-1984) abordan actuaciones estructurales importantes e intervenciones en elementos como carpintería, jardinería, fuente, pinturas, solería, etc., junto con una cierta labor de investigación. Las referencias escritas accesibles son fundamentalmente las que se recogen en Los Cuadernos de la Alhambra, cuyo último número corresponde al 37. De estos Cuadernos y de las notas de prensa en relación con el Patio destacar las diversas y numerosas intervenciones restauradoras sobre yeserías, alicatados, maderas y otros elementos en la última década del recién finalizado S.XX, realizadas por el Departamento de Restauración, y dirigidos por la restauradora C. Navarrete Aguilera. Este Departamento se constituyó en 1990 por la integración de diversos Talleres (Alicatados, Cantería, Escayola y Madera policromada), encargados hasta la fecha de reparar elementos decorativos del Monumento bajo la tutela del Departamento de Obras. Bajo la jefatura de la citada restauradora, el Departamento de Restauración se mantuvo como tal hasta 1999. La existencia del mismo propició la adecuación de las intervenciones sobre elementos decorativos a los criterios y pautas vigentes sobre Restauración tales como la Carta del Restauo de Atenas (estudios y análisis previos, documentación escrita, gráfica y fotográfica de las intervenciones, etc.).

Ya en el siglo XXI destacar la reciente retirada de uno de los leones originales para realizar en el estudios de limpieza.

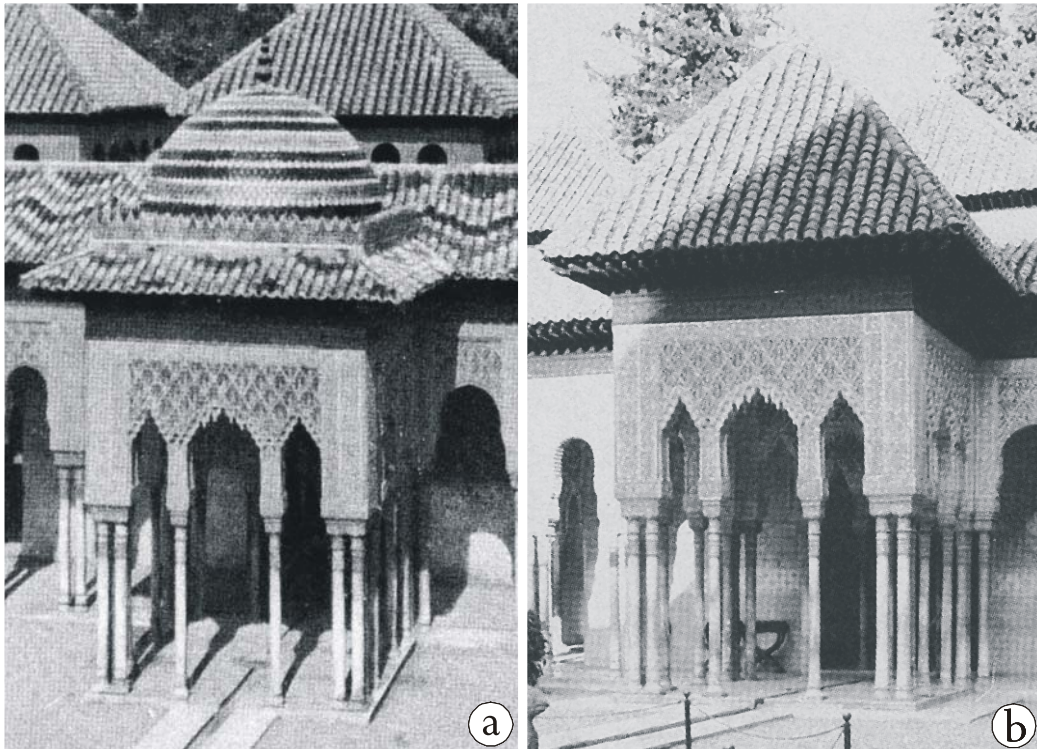
Un elemento que supone una constante a lo largo del tiempo, ya sea en términos de intervenciones o en términos de informes, es el que se refiere al estado de desplome de las columnas del Patio, tanto de galerías como de templetes. La referencia explícita más antigua al respecto de la que hemos dispuesto, data de 1687, y las referencias se prolongan hasta la reparación en 1966 de las del templete de Poniente.

Igualmente son tempranas y constantes las menciones al estado e intervenciones en los templetes. Así desde 1541 en que se instalan tirantes, hasta la restauración efectuada en el templete oeste en 1966, son unas 16 las referencias a intervenciones y al estado de precariedad de estos.

Resulta imprescindible hacer un, al menos breve, análisis o seguimiento de los cambios estéticos o de “fisonomía” sufridos por el Patio a través de las vicisitudes de

algunos de sus elementos más figurativos: Fuente, templetes y superficie ajardinada; su evolución es indicativa de los criterios conservacionistas y estéticos de cada época.

Así vemos como en 1859 se dota al templete de Levante de una cubierta cupular semiesférica, “innovación estética” que se culmina con la adición de almenitas en 1866. Esta situación se mantiene hasta que Torres Balbás le devuelve su primitiva fisonomía en 1934 (Figura 1.7).



*Figura 1.7. Intervención realizada en el S.XIX en la cubierta del templete Oriental del Patio de los Leones(a) y estado actual después de las obras realizadas por el Arquitecto Conservador Leopoldo Torres Balbás en el año 1934 (b) .*

Por lo que respecta a la Fuente, ya tempranamente se ve alterada por gustos y actitudes poco respetuosas con su concepción original. Así, alrededor de 1600 se añade la taza circular agallonada, y en 1835 se añaden la pequeña pirámide y el surtidor, que son eliminados en 1966. En ese mismo año se elimina la taza agallonada y los apoyos de la taza primitiva sobre los leones, devolviéndola a su disposición primitiva (Figura 1.8).

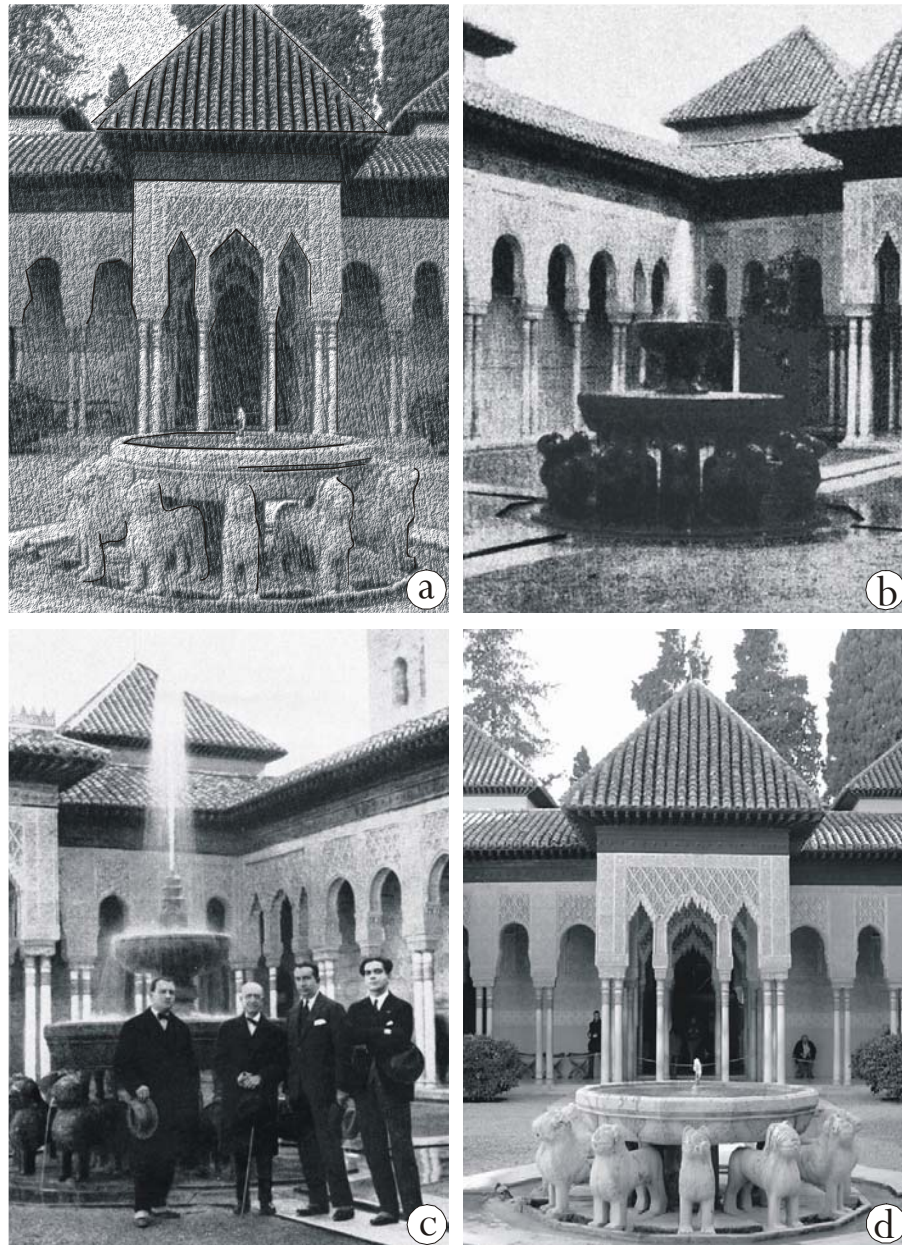
Igualmente mutante ha sido la solución a la superficie ajardinada desde la cita de Lalaing en 1502 sobre la existencia de seis naranjos. Así, aceptando la hipótesis de

Bermúdez López (1987) de la primitiva existencia de cuatro jardines a un nivel inferior, la referencia siguiente se refiere al levantamiento por Sebastiani de un pavimento previamente existente. Finalmente, entre 1974 y 1979, J. Prieto Moreno decide la conformación actual de las zonas ajardinadas y de los pavimentos perimetrales a las galerías con mármol de Macael (Figuras 1.9 y 1.10).

No podemos resistir el comentar algunas curiosidades como el error de J. Münzer, que en su descripción de la Fuente en 1494 dice que son trece los leones que la soportan. Igualmente en el reconocimiento que en 1687 se hace del estado del Patio y sus galerías se alude a sus 144 columnas.

Terminamos señalando como último “evento” a destacar la creación del Patronato de la Alhambra y Generalife cuya conformación actual tuvo lugar tras la transferencia de competencias del Estado a la Comunidad Autónoma el 29 de Febrero de 1984, y la aprobación de los actuales Estatutos el 19 de Marzo de 1986. Las implicaciones de la creación y devenir de este organismo sobre el Monumento no han sido suficientemente analizadas, pero deben haber sido múltiples y de variada índole. Comparemos por ejemplo situaciones anteriores donde la figura emblemática y de referencia eran los Arquitectos-Conservadores, con la de tiempos actuales en la que estos han perdido relevancia frente a la Dirección administrativa del Patronato.





*Figura 1.8. Evolución gráfica de la fuente: a) Estado original de la fuente. b) En el S.XVII ve modificada su configuración con la colocación de la taza circular agallonada. c) De nuevo en el S.XIX se ve alterada con la colocación de un surtidor elevado. d) S.XX, la fuente vuelve a adquirir su configuración original.*

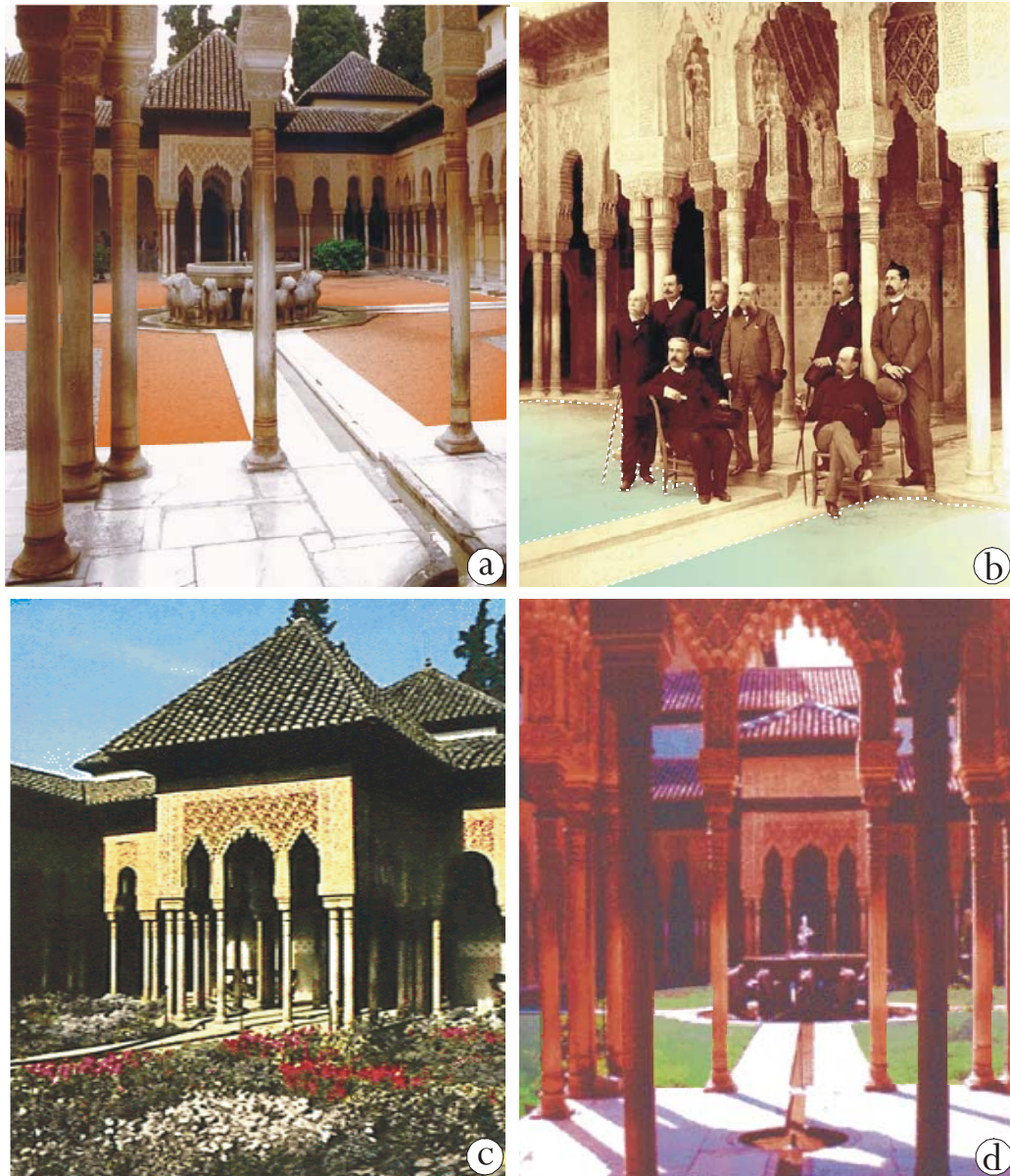


Figura 1.9. Evolución gráfica del Jardín que fundamentalmente en los siglos XIX y XX ve modificado en varias ocasiones su acabado (a, b, c y d), hasta que a finales de los años 70 el Arquitecto Conservador J. Prieto Moreno decide la conformación actual del jardín y galerías perimetrales.



*Figura 1.10. Estado actual del Patio que nos muestra el resultado después de todas las modificaciones acontecidas en las galerías, templetos y fuente.*

La bibliografía consultada (libros, revistas, informes, prensa, ...) que nos ha permitido elaborar este apartado ha sido muy prolija, y como ya se comentó al inicio del mismo, se ha optado por descargar el texto de las innumerables repeticiones que las citas concretas y puntuales requerirían. Se proporciona a continuación una relación con los autores, investigadores y otras fuentes de las que se ha extraído la información expuesta, solicitando previamente excusas por las inevitables e involuntarias omisiones. Remitimos por tanto a las obras y trabajos de: Seco de Lucena (1919), Torres Balbás (1929, 1953, 1965, 1966, 1967, 1968, 1969, 1981), Bermúdez Pareja et al. (1966, 1970), Bermúdez Pareja (1967, 1968), Bermúdez López (1987), Gallego y Burín (1963, 1967), Luplau Janssen (1968), Lundgren (1969), Gómez Moreno (1970), Benavides et al. (1971), Ramos Torres (1972), Grabar (1980), Marinetto Sánchez (1985), Nuere (1986), Ocaña Jiménez (1989), Soria Ortega (1989), Vílchez Vílchez (1990), Rodríguez Domingo et al. (1991), Barbosa García et al. (1992), Velasco Gómez (1992), Cervera Vera et al. (1995-1996), Rallo Gruss (1998), Martín Céspedes (2000).

La sección Crónicas de la Alhambra (crónicas y relación de intervenciones de F. Prieto Moreno, J. Prieto Moreno Ramírez, L. Rodrigo Marhuenda, J. Calancha de Passos y C. Navarrete Aguilera) nos ha permitido conocer las intervenciones acaecidas con posterioridad a 1966.

Queremos terminar con las citas y agradecimientos a las obras de Vílchez Vílchez (1988) y Muñoz Cosme (1991); sus trabajos “La Alhambra de Leopoldo Torres Balbás. Obras de Restauración y Conservación. 1923-1936” y “Cuatro siglos de intervenciones en la Alhambra de Granada” nos han sido de una inestimable ayuda.

**2 ESTUDIO  
CLIMATOLÓGICO Y  
DEL ESTADO DE  
CONSERVACIÓN**









# 2 ESTUDIO CLIMATOLÓGICO Y DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN

Como se comentó en el Capítulo 1. “Introducción y Objetivos”, es necesario en el estudio realizado sobre la columnata del Patio de los Leones, conocer el estado actual de deterioro que esta presenta. De esta forma, y según se expuso en el citado capítulo, se podrá detallar el estado de conservación al día de hoy, así como evaluar el ritmo de deterioro acontecido desde las últimas descripciones de su estado de conservación en los años 80-90 (Galán et al., 1989, 1990).

El trabajo realizado en este capítulo se ha centrado en el estudio de las condiciones climáticas (asoleo y temperatura) a las que la columnata está expuesta y en la descripción pormenorizada del estado de la misma.

## 2.1. ESTUDIO CLIMATOLÓGICO

La situación y el entorno ambiental del Patio indican que, además de los agentes derivados del uso e intervenciones en el mismo, son los agentes climatológicos (variaciones de temperatura, humedad e insolación) los determinantes en el proceso degradativo del material marmóreo de la columnata. Se hace por tanto imprescindible un estudio detallado de estas condiciones o agentes climatológicos, y su relación con el estado de conservación de cada columna.

### CLIMATOLOGÍA DE LA CIUDAD DE GRANADA

Granada se incluye según el Instituto Nacional de Meteorología en la subregión continental extremada; se sitúa geográficamente en las coordenadas 37°8' N de latitud y 3°37' de longitud, con una altitud media de 710 m sobre el nivel del mar.

Las condiciones climáticas más significativas registradas en la ciudad de Granada se recogen en la Tabla 2.1 para el periodo comprendido entre 1989 a 2002 (Datos propios cedidos por el Dr. N. Velilla Sánchez de la Universidad de Granada).

Dado que los datos de gradientes de temperatura deducidos de la Tabla 2.1 se obtienen de valores medios mensuales, es lógico que a escala diaria tengan lugar mayores variaciones de temperatura por lo que en ocasiones, en periodos de 24 h, la temperatura oscila más de 20°C.

Las temperaturas mínimas favorecen la presencia de nevadas en algunas ocasiones, aunque son más frecuentes las escarchas (28 días al año) durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, y el rocío (80 días al año) durante los meses de primavera y otoño.

Las precipitaciones en forma de lluvia se concentran principalmente en dos periodos: octubre, noviembre y diciembre, y los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo. En la Tabla 2.2 se recogen los valores pluviométricos entre los años 1989 a 2002.

La humedad media anual viene a ser del 56%, correspondiendo la máxima humedad (69%) a los meses de diciembre y la mínima (42%) al mes de julio.

Tabla 2.1. Promedios mensuales de datos climáticos. (Datos cedidos por el Dr. N. Velilla Sánchez).

1989-02	Tm	Tm-max	Tm-min	Tmx-ab.	Tmi-ab.	P	HR	Plv.	D.lluv.
Enero	8,3	14,1	2,5	25,0	-5,9	653	66	50	7
Febrero	10,8	18,0	4,1	26,2	-4,8	654	60	30	6
Marzo	13,9	20,8	7,0	30,8	-5,3	652	58	40	7
Abril	14,5	20,4	8,6	29,2	0,3	650	57	48	8
Mayo	18,3	23,9	12,6	36,0	3,6	652	53	41	7
Junio	23,1	29,5	16,6	37,5	9,4	654	47	16	3
Julio	26,9	33,4	20,5	41,3	11,8	655	42	2	1
Agosto	26,8	33,2	20,4	39,9	11,7	656	44	4	2
Septiembre	22,2	28,1	16,4	35,6	7,9	654	53	37	5
Octubre	17,1	22,5	11,7	33,0	4,8	653	61	54	7
Noviembre	11,9	17,0	6,8	26,6	-2,1	652	65	60	9
Diciembre	9,2	14,3	4,0	21,9	-7,8	652	69	75	12
Media	16,9	22,9	10,9	41,3	-7,8	653	56	457*	74*

Nota: Tm: Temperatura media. Tm-max: Temperatura máxima media. Tm-min: Temperatura mínima media. Tmx-ab: Temperatura máxima absoluta. Tmi-ab: Temperatura mínima absoluta. P: Presión atmosférica (mbar). HR: Humedad relativa (%). Plv: Pluviometría ( $\text{mm}^3/\text{m}^2$ ). D.lluv: número mensual de días de lluvia.

\* = Datos anuales.

Tabla 2.2. Datos de pluviometría (mm) para los años 1989 a 2002. (Datos cedidos por el Dr. N. Velilla Sánchez).

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Enero	27	50	5	20	0	55	15	194	160	13	37	11	99	20
Febrero	37	0	61	35	10	56	12	80	0	60	31	0	31	2
Marzo	36	38	70	23	27	6	29	52	1	17	50	27	79	98
Abril	37	95	18	37	50	37	14	17	119	37	7	96	21	89
Mayo	28	34	4	4	60	24	1	109	66	57	10	96	35	41
Junio	26	0	8	66	2	1	24	17	39	26	4	0	0	10
Julio	0	2	1	14	0	1	0	7	0	0	0	0	0	0
Agosto	1	2	0	2	1	1	10	1	25	0	0	0	1	9
Septiembre	77	30	61	18	4	40	4	57	57	56	13	25	55	15
Octubre	34	71	57	107	65	59	5	36	35	1	149	51	71	19
Noviembre	85	53	23	16	37	44	53	105	139	12	42	72	30	135
Diciembre	109	32	31	25	4	6	167	200	151	31	42	128	65	65
Total	497	407	339	367	260	330	334	875	792	310	385	506	487	503

Además de las características climatológicas comentadas, es de significativa importancia en el estudio medioambiental el conocimiento de los días despejados y

horas de exposición solar al año. En Granada el número medio de días despejados al año es de 125 y el número de horas de exposición solar de 2.935.

La situación del Palacio de los Leones, con una altura aproximada de 725 m sobre el nivel del mar, acoge un comportamiento climatológico análogo al descrito para la ciudad de Granada. Sin embargo, y debido a las diferencias observadas en el deterioro de la columnata, se vio la necesidad de controlar los parámetros que afectaban con distinta intensidad a las fachadas del Patio. Por ello el estudio realizado en esta primera parte del presente Capítulo ha consistido en el control de la temperatura y asoleo que se produce en la columnata a lo largo del año.

Por otra parte la disposición de la columnata en el Patio exige realizar un tratamiento distinto por fachadas dado que en función de la localización y asoleo recibido se ha originado un determinado deterioro para cada una de ellas.

Las cuatro fachadas del Patio de los Leones se corresponden con los cuatro puntos cardinales, norte para la Sala de Dos Hermanas, sur para la Sala de Abencerrajes, este para la Sala de los Reyes y oeste para la Sala de Mocárabes. En consecuencia los frentes columnados que dan acceso a cada una de ellas tienen la orientación de asoleo opuesta a la comentada.

Los efectos negativos que sobre los materiales de construcción la radiación solar produce es notable; en nuestro caso también, de hecho coinciden las fachadas mayormente asoladas con un mayor deterioro, lo que lógicamente pone de manifiesto la importancia que este factor tiene en el estado de alteración de las columnas.

La observación del asoleo en la columnata del Patio de los Leones permitió comprobar las distintas situaciones que con carácter general se presentaban, y que originaban condiciones distintas para el asoleo en cuanto a zonas de exposición localización en las columnas, duración de la exposición, variabilidad a lo largo de la misma jornada, etc. Aunque en el trabajo de Galán et al. (1990) se recogen variaciones de asoleo en la planta del Patio para distintas estaciones, este tratamiento no es suficientemente indicativo de las zonas realmente asoladas de las distintas columnas, y su variación a lo largo del día y las estaciones.

Se ha optado por tanto por una observación directa de las zonas asoladas de cada columna los días coincidentes con los cuatro cambios de estación y a las horas comprendidas entre las 8:00 y las 20 h. Considerando el fuste de cada columna dividido en tres partes, en las Figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10, se representan las distintas zonas de asoleo para las columnas de cada una de las cuatro fachadas, en los cuatro cambios estacionales.

El efecto que la exposición solar prolongada ejerce sobre los materiales estará motivado por las propias radiaciones presentes (ultravioleta entre otras), y por el incremento de temperatura que esta exposición conlleva. El control de estas temperaturas permitirá, por así decirlo, una “cuantificación” de la diferencia de condiciones entre distintas columnas como consecuencia de su diferente asoleo. Para ello se han controlado las temperaturas en 12 puntos de cada columna, 4 por cada tercio en que dividimos el fuste, y en cada tercio, caras interna, externa, derecha e izquierda según su posición respecto al Patio (Figura 2.1).

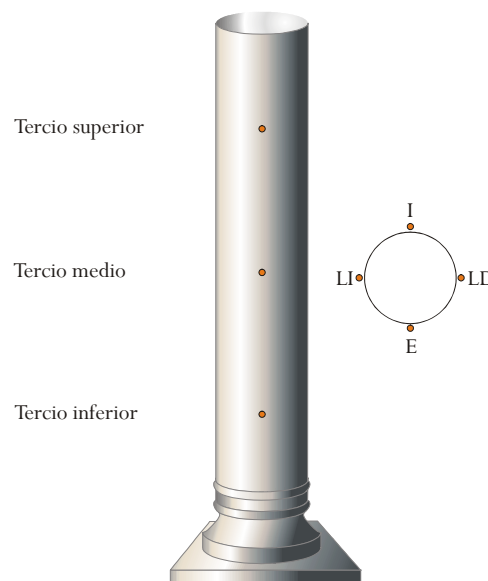


Figura 2.1. Esquema de los puntos de medida de temperatura en las columnas. Situación respecto al Patio I: fachada interior; LD: lateral derecho; E: fachada exterior; LI: lateral izquierdo.

En las Tablas 1 y 2 del Anexo 1 se incluyen los datos de temperatura recogidos para las 124 columnas en las fechas en las que para Granada capital se producen las mínimas promedio (enero) y máximas promedio (julio) del año, estableciendo las tomas cada 4 horas en función de la exposición solar estacional, siendo tres las realizadas en invierno (8:00 h, 12:00 h y 16:00 h), y cuatro para verano (8:00 h, 12:00 h, 16:00 h y 20:00 h).

Dado el gran número de datos (asoleo y temperaturas), la exposición siguiente se basa en los correspondientes a los periodos de máximo y mínimo asoleo (verano e invierno). Se hace para las distintas fachadas, considerando sus situaciones de asoleo, así como las diferentes zonas de las columnas correspondientes, según la subdivisión

que de las mismas hemos hecho (tercios superior, medio e inferior, y en caras interna, externa, lateral derecho o izquierdo).

En las Tablas 2.3.A y 2.3.B se recogen las temperaturas medias de la columnata de cada fachada en los dos periodos extremos considerados, en las horas y zonas que se indican.

No obstante las descripciones pormenorizadas para cada fachada que a continuación se recogen, concretan aquí que estas Tablas ponen de manifiesto la influencia de la insolación sobre el nivel térmico alcanzado por las columnas, y su diferente evolución. Comparemos los 42,8°C alcanzados en la zona externa de la columnata de Dos Hermanas a las 16:00 horas del verano frente a los 31,8°C de Abencerrajes, mientras que a las 8:00 horas las diferencias no alcanzan 1°C.

Es palpable como una mayor insolación determina mayores diferencias entre cada fachada, así como mayores gradientes dentro de una misma fachada, e incluso, y como es lógico, dentro de cada zona de una misma columna.

*Tabla 2.3.A. Valores medios de temperatura (°C) en las distintas fachadas en verano.*

VERANO	SITUACIÓN	DOS HERMANAS	REYES	ABENCERRAJES	MOCÁRABES
8:00 horas	Exterior	26,8	27,2	26,0	27,9
	Izquierda	27,1	27,4	26,4	28,1
	Interior	27,3	27,4	26,7	28,1
	Derecha	27,1	27,3	26,4	28,1
12:00 horas	Exterior	35,8	28,0	28,3	34,7
	Izquierda	35,7	27,9	28,0	33,9
	Interior	32,6	27,9	28,1	31,8
	Derecha	35,6	28,1	28,2	32,5
16:00 horas	Exterior	42,8	37,7	31,8	33,8
	Izquierda	42,7	35,1	31,8	33,6
	Interior	39,5	37,3	31,8	33,6
	Derecha	40,4	36,2	31,7	33,6
20:00 horas	Exterior	36,3	34,9	31,2	31,4
	Izquierda	36,6	34,9	31,5	31,5
	Interior	36,7	34,8	31,6	31,6
	Derecha	36,7	34,9	31,5	31,6

Tabla 2.3.B. Valores medios de temperatura (°C) en las distintas fachadas en invierno.

INVIERNO	SITUACIÓN	DOS HERMANAS	REYES	ABENCERRAJES	MOCÁRABES
8:00 horas	Exterior	-1,6	-0,8	-1,6	-0,8
	Izquierda	-1,4	-0,6	-1,3	-0,7
	Interior	-1,0	-0,4	-1,1	-0,5
	Derecha	-1,3	-0,5	-1,3	-0,5
12:00 horas	Exterior	5,4	1,2	0,6	1,9
	Izquierda	2,5	1,2	0,3	1,8
	Interior	3,5	1,1	0,6	1,8
	Derecha	4,2	1,2	0,4	2,3
16:00 horas	Exterior	9,1	3,9	2,6	3,1
	Izquierda	9,8	4,1	2,8	3,3
	Interior	9,4	3,9	3,0	3,4
	Derecha	9,0	3,9	2,8	3,4

El análisis de estos datos en **verano** ofrece los siguientes resultados:

#### **Fachada Sala de Dos Hermanas (orientación norte, Columnas 1 a 31)**

En esta fachada el asoleo que reciben las columnas hace necesario realizar un tratamiento distinto para las columnas incluidas entre la 1 y la 4 (con menor asoleo) y el resto. A su vez han de tenerse en cuenta las diferencias entre cara exterior y cara interior, puesto que, a excepción de las temperaturas recogidas a las 8:00 h, las oscilaciones observadas son considerables.

##### Columnas 1 a 4

Caras no asoladas (cara interna y lateral izquierdo):

A lo largo del día las temperaturas medias oscilan entre los 27,1 y los 35,8°C. Sin embargo las mínimas se recogen para esta fachada en el lateral izquierdo, alcanzando valores por debajo de los 25°C (a las 8:00 h) y las máximas alcanzan valores en la cara interior de 36,7°C.

Caras asoladas (cara externa y lateral derecho):

En este caso siendo las temperaturas iniciales iguales que para las de la cara interna, no ocurre lo mismo con las temperaturas recogidas durante todo el día, llegando a alcanzar 36,7°C en un número mayor de columnas y durante un periodo horario mayor. Al igual que se comentaba para el caso anterior es de destacar lo que ocurre con el lateral derecho que para esta fachada es el más asolado, y las

temperaturas oscilan entre los valores 26,6 a 37,2°C. Todo ello provoca gradientes superiores a los 10°C en un periodo de 8 horas.

Resto de columnas 5 a 31

Lógicamente su disposición en el Patio favorece un asoleo mayor y por tanto el que las temperaturas sean las más altas recogidas en toda la columnata. Esta zona de la columnata supera en gradiente a la comentada anteriormente, obteniéndose para algunas columnas diferencias superiores a los 20°C en una franja horaria que no supera las 8 horas; esto implica una variación de temperatura en el material que casi alcanza los 4°C por hora.

Caras no asoladas (cara interna):

Como temperaturas de partida nos encontramos que a las 8:00 h en estas columnas se tienen valores comprendidos entre los 27°C y 28°C.

Por otra parte las temperaturas recogidas a las 16:00 h superan en el lateral interior los 43 °C. Esto supone unos gradientes medios superiores a los 15°C.

Caras asoladas (cara externa, lateral derecho y lateral izquierdo):

En estas zonas este grupo de columnas alcanza sus valores máximos en la columna 25 con 50,6 °C (cara izquierda tercio inferior). En general los datos ofrecen gradientes superiores a los 20°C (26-46°C), en 8 horas.

### **Fachada Sala de Los Reyes (orientación este, Columnas 32 a 63)**

Son extensivas las consideraciones realizadas en la fachada de Dos Hermanas para las columnas asoladas (columnas perimetrales de fachada) en esta fachada, en cuanto a gradientes de temperatura y localización de máximos (lateral interior-izquierdo frente a lateral externo-derecho) observándose en este caso como temperatura máxima los 45,5°C alcanzados por la columna 51 y la mínima de 26,2°C (columna 46), así como gradientes medios de 10°C, sin embargo es destacable el hecho de que en la fachada de Dos Hermanas las horas de insolación están próximas en muchos casos a las 8 horas y por tanto las altas temperaturas se alcanzan antes, y por el contrario en la fachada de la Sala de los Reyes la exposición solar es más corta (3-4 horas) y ese periodo de máximas temperaturas se reduce a la mitad.

### **Fachada Sala de Abencerrajes (orientación sur, Columnas 64 a 93)**

Esta fachada a diferencia de las otras tres, es asolada durante muy pocos días del año (verano) y en horario reducido (9:00 a 10:00 h por la mañana y 19:00 h por la tarde). En consecuencia no son destacables las diferencias de temperatura entre las columnas de esta fachada, no existiendo tampoco en este caso diferencias apreciables



entre los distintos laterales de una misma columna. Por su parte, el tercio superior suele presentar temperaturas algo más altas que el medio e inferior (1-2°C).

Los gradientes, como era de esperar, son mucho menores a lo largo de una misma jornada, manteniendo temperaturas que oscilan entre los 25-26,5°C a las 8:00 h y unas máximas de 34°C en la toma realizada a las 16:00 h.

#### **Fachada Sala de Mocárabes (orientación oeste, Columnas 94 a 124)**

Este alzado se puede describir como una situación intermedia entre la zona asolada y no asolada del Patio. Su situación como se muestra en las Figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 está más cercana a la de la zona no asolada pues sólo algunas columnas se ven asoladas parcialmente en lo que se refiere al alzado, pero por el contrario según muestran los planos de asoleo en planta (Galán et al., 1990) se ve afectada varias horas al día en los meses de primavera-verano por la radiación solar, lo que supone la elevación de la temperatura en la columnata en su conjunto por “radiación indirecta”.

Como situaciones particulares de la fachada que se comenta, destacar el hecho de que las máximas temperaturas en este caso se obtengan a las 12:00 h coincidiendo con el horario de asoleo máximo de esta fachada.

Las temperaturas a las 8:00 h superan los 27-28°C (en los distintos laterales), alcanzándose como temperaturas máximas los 41,7°C a las 12:00 h, disminuyendo en mayor o menor medida a partir de esa hora en las distintas columnas. El gradiente máximo por tanto para esta fachada a lo largo de una jornada diaria es de 6,8°C.

En esta fachada, y en la de la Sala de los Abencerrajes las temperaturas tomadas en el lateral externo a las 8:00 h son menores que en el lateral interior, aunque en este caso las diferencias no superen 1°C, es decir se plantea una situación contraria al resto de las fachadas asoladas, pero que vuelve a presentar la misma tendencia que en el resto conforme se eleva la temperatura ambiente (temperatura cara exterior > temperatura cara interior).

Comentamos a continuación los aspectos más relevantes proporcionados por los datos de **invierno**.

Es de destacar que las oscilaciones para esta estación son de orden menor a las recogidas en verano, situándose en varias ocasiones la temperatura registrada por debajo de los cero grados. El tratamiento que se hace de los datos de temperaturas para esta estación son los mismos que los comentados para los datos de verano, por ello se van a comentar igualmente de forma independiente las cuatro fachadas.

#### **Fachada Sala de Dos Hermanas**

El asoleo que recibe esta fachada según se muestra en las Figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 de nuevo hace necesario un comentario para las columnas 1 a 4 y otro algo diferente para el resto de las que componen dicha fachada.

De las primeras decir que sus valores son muy similares a las 8:00 h, oscilando entre  $-1,5$  y  $-2^{\circ}\text{C}$ , con temperaturas algo más altas en la cara interna de los fustes. La temperatura en la toma de las 12:00 h es superior a la primera ( $2-4^{\circ}\text{C}$ ), siendo esta diferencia algo mayor en la toma de las 16:00 h, alcanzando una máxima de  $4,1^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $1,8^{\circ}\text{C}$ .

Las temperaturas más bajas se localizan en la parte baja de las columnas (tercio inferior) y las más altas en el tercio superior.

Las columnas 5 a 31 presentan una mayor variabilidad, pues el asoleo permite que con el paso de las horas aumente la temperatura de las columnas de esta fachada, alcanzándose unas temperaturas mínimas de  $-2^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $21^{\circ}\text{C}$ . Se mantiene también en todas ellas la bajada de temperaturas conforme descendemos en altura. En la toma de las 16:00 h los gradientes de temperaturas, que oscilan entre los  $10$  y  $11^{\circ}\text{C}$ , ponen de manifiesto el efecto del asoleo sobre las caras externa y derecha (asoladas) frente a las caras interna e izquierda (no asoladas). La incidencia del asoleo no es igual para las caras afectadas, y en invierno es la fachada exterior la representativa de las temperaturas máximas.

#### **Fachada Sala de los Reyes**

Las temperaturas mínimas recogidas en la toma de las 8:00 h no son inferiores a  $-1^{\circ}\text{C}$ . El asoleo tardío determina variaciones de temperaturas pequeñas a lo largo de la jornada diurna, estando las máximas recogidas próximas a los  $5^{\circ}\text{C}$ , produciéndose por tanto unos gradientes de entre  $4$  y  $5^{\circ}\text{C}$ . En esta fachada, a diferencia con la toma de verano, ocurre lo mismo que se comenta en la fachada de la Sala de Abencerrajes y Mocárabes, en el sentido de que en las primeras tomas las temperaturas más altas se dan en el tercio superior de la columna, y a lo largo del día estas temperaturas máximas se van localizando en las zonas más bajas.

#### **Fachada Sala de Abencerrajes**

Las pequeñas variaciones acaecidas en esta fachada durante el periodo diurno son debidas fundamentalmente a la falta de asoleo y al escaso incremento de la temperatura ambiente del horario diurno. Las temperaturas mínimas a las 8:00 h son de  $-2^{\circ}\text{C}$  y la máxima a las 16:00 h es de  $3,5^{\circ}\text{C}$ .

A lo largo del día las temperaturas que presentan las caras interiores son superiores a las de las restantes caras.

### **Fachada Sala de Mocárabes**

La ausencia de exposición solar de esta fachada durante la estación invernal hace extensivos los comentarios realizados para la fachada anterior. Las temperaturas recogidas en esta fachada son algo más elevadas que en Abencerrajes, como ocurría en la estación estival (posiblemente debido a la comentada radiación indirecta).

## **2.2. ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA COLUMNATA**

Los datos obtenidos mediante una minuciosa y continuada inspección ocular nos permiten conocer el estado de actual de cada una de las columnas, así como la tipificación en tipos y grados de alteración que presentan, su localización en desarrollo vertical y su ubicación y orientación en el Patio.

La observación y descripción correspondiente se ha centrado en las características y patología de la columnata tales como: foliación, tamaño de grano, presencia de bandeado, color, textura, así como el estado de alteración superficial, fisuraciones, pérdida de material en sus distintas presentaciones (escamas, abultamientos, desprendimientos), restos de material de acabado (pintura, aplicaciones agua-barro, pátinas), presencia de raspados, golpes, etc.

La consideración y exposición del estado de deterioro de la columnata nos ha hecho distinguir entre:

- A) Deterioros que originan pérdidas de cohesión y materia
- B) Deterioros que no originan pérdidas de cohesión ni materia

En los primeros (A) se incluyen fenómenos tales como fracturación, hinchamiento, fisuración, pérdida de materia en sus distintas posibilidades (descamación, rotura, golpeo, rayado, huellas de impactos, picado o pitting, fisuración,...), favorecidos algunos de ellos por la propia naturaleza del material.

En orden siguiente de importancia, por su menor presencia y efecto en el deterioro, están los que no originan pérdida de cohesión ni materia (B) (al menos de forma visible), así nos encontramos con pátinas de envejecimiento, tratamientos y acabados, eflorescencias y alteraciones cromáticas.

Se ha considerado conveniente seguir el esquema clasificatorio de los estadios de alteración de las columnas propuesto por Galán et al. (1990) en su informe, consistente en establecer siete estadios de desarrollo de descamación así como otros para los distintos estados de deterioro. Esto permitirá una mejor correlación entre los

datos sobre el estado actual, y los obtenidos por los citados investigadores. Estos estadios difieren entre sí por la forma, tamaño y distribución de los efectos observados, entendiendo para la descamación el nivel 1 como estado inalterado y el nivel 7 como exponente de la máxima alteración.

En nuestra descripción se pormenorizan y distingue entre distintos deterioros como son grietas y fisuras en los fustes; se incluyen además nuevos efectos como es “picado” específico o huellas de impacto (parece de origen mecánico) en zonas concretas (tercio medio) de más de la mitad de las columnas, así como el rayado existente en las columnas, consecuencia del raspado a que se sometieron en 1839. Se indican además, y de manera concreta la zona de columna en la que cada tipo de alteración aparece.

Por otra parte se han relacionado el desarrollo de diversas fracturaciones y/o fragmentaciones con la foliación o “veteado” de las columnas correspondientes.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema de los estadios de alteración propuestos por Galán et al. (1990) así como los restantes incluidos en los grupos A y B definidos anteriormente.

Se describen a continuación cada uno de los deterioros representados gráficamente con especificación de tamaño, forma y localización más generalizada en las columnas.

- T1 Estado inalterado (exento de descamaciones).
- T2 Estado inicial de alteración, descamaciones más o menos circulares de aproximadamente 0,5 a 5 cm de diámetro.
- T3 Descamaciones en principio circulares, pero sobre todo alargadas en estadios avanzados. Normalmente de 5 a 10 cm de ancho.
- T4 Descamaciones de 10 a 15 cm de ancho y de 1,0 a 1,5 m de largo. Pueden presentarse en una o dos filas.
- T5 Descamación de 15 a 20 cm de ancho y de 1,0 a 2,0 m de largo.
- T6 Descamaciones superiores a 20 cm de anchura que se presentan sin continuidad entre la zona de exposición interna y externa.
- T7 Representa el máximo desarrollo de alteración, con unión de la erosión interior y exterior de la columna.
- T8 Picados (pitting) difundidos y generalizados en gran parte de la superficie.
- E Alteración (descamación) coincidente con la foliación.
- G Grietas abiertas visibles  
(A) en parte alta del fuste  
(B) en basa o parte baja del fuste  
(M) en zona media del fuste
- P Pátinas oscuras marrón rojizas (en su mayoría restos de pintura).
- R Rayado y pátina de envejecimiento amarillo-grisácea.
- M Pátina biológica color negruzco localizada en partes bajas de fustes y basas.
- F Fragmentaciones y pérdida de material localizada en partes altas y bajas de los fustes.

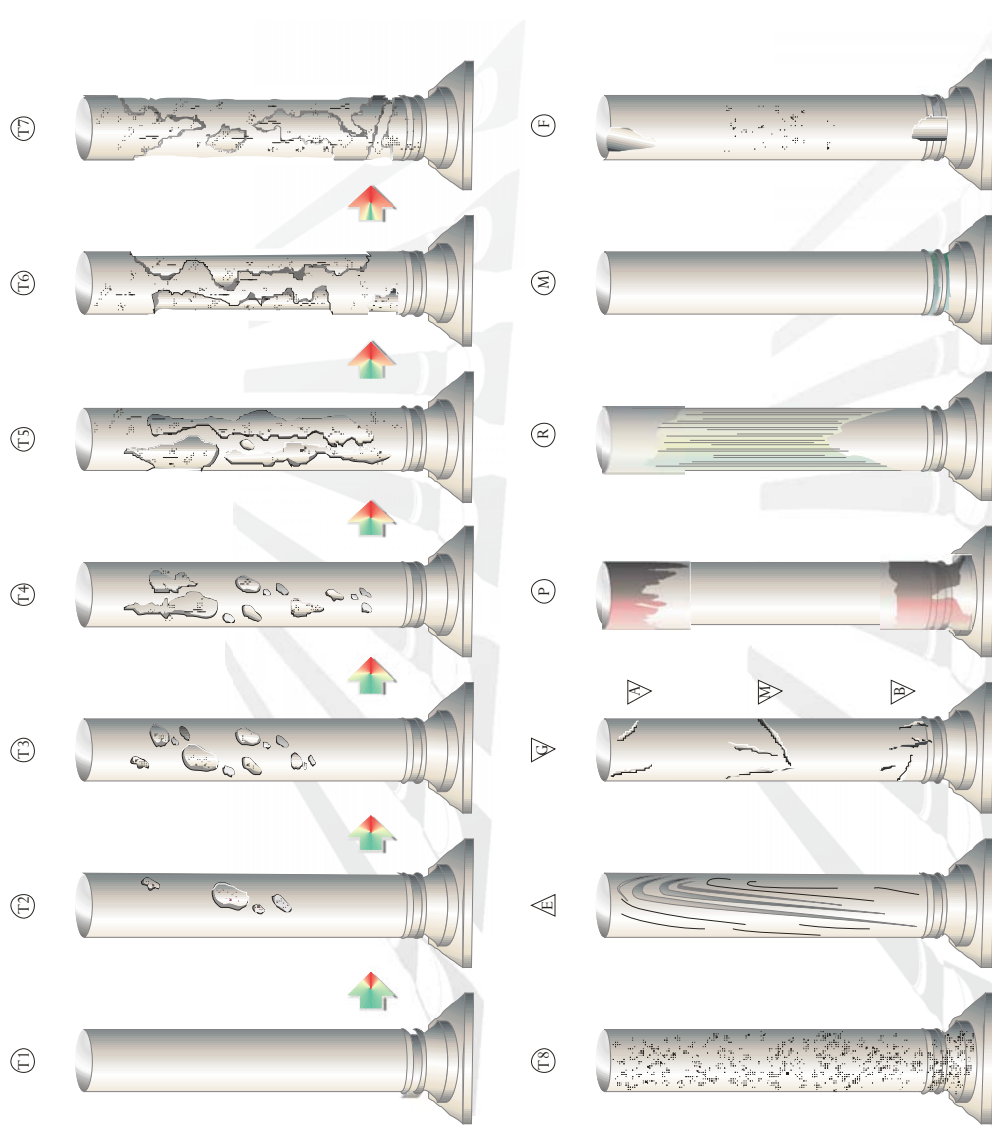


Figura 2.2. Tipología de alteración. Indicadores T1 a T8, E y G, tomados de Galán et al. (1990). Indicadores de nueva descripción P, R, M y F.

### ***A. Deterioros que originan pérdidas de cohesión y materia***

Se destaca en primer lugar, por extensión y deterioro producido, el fenómeno de la descamación, que sin duda origina los mayores efectos negativos sobre la columnata, no sólo desde el punto de vista estético, sino también desde el punto de vista de la estabilidad y mantenimiento de las propiedades físicas de esta.

La descamación observada se concentra principalmente en las zonas expuestas directamente a la radiación solar y solamente de forma excepcional lo hace en caras no expuestas. En su formación y desarrollo el proceso de descamación sigue como muestra la Figura 2.3 las siguientes fases:

Microfisuración

Abultamiento-hinchazón

Pérdida de cohesión

Desprendimiento

Esta pérdida de material en escamas o placas de hasta varios milímetros de espesor, afecta al desarrollo del fuste y a la zona moldurada (anillos), principalmente en partes altas y bajas de las columnas (Figura 2.4). Este desplazado no sigue habitualmente la estructura del material y por el contrario se adapta al trazado de la pieza (desplacados concéntricos a la columna y anillos).

En las zonas de material desprendido puede observarse como la textura granular del mármol aparece en relieve y es fácilmente deleznable con los dedos.

El contraste de color y la profundidad del material desprendido permite cuantificar el proceso degradativo por descamación.



*Figura 2.3. Desarrollo del proceso de descamación producido en las columnas a) microfisuración; b) abultamiento-hinchazón; c) pérdida de cohesión y d) desprendimiento.*



*Figura 2.4. Detalle de localización principal de descamación en zona de anillos y fuste de columnas.*

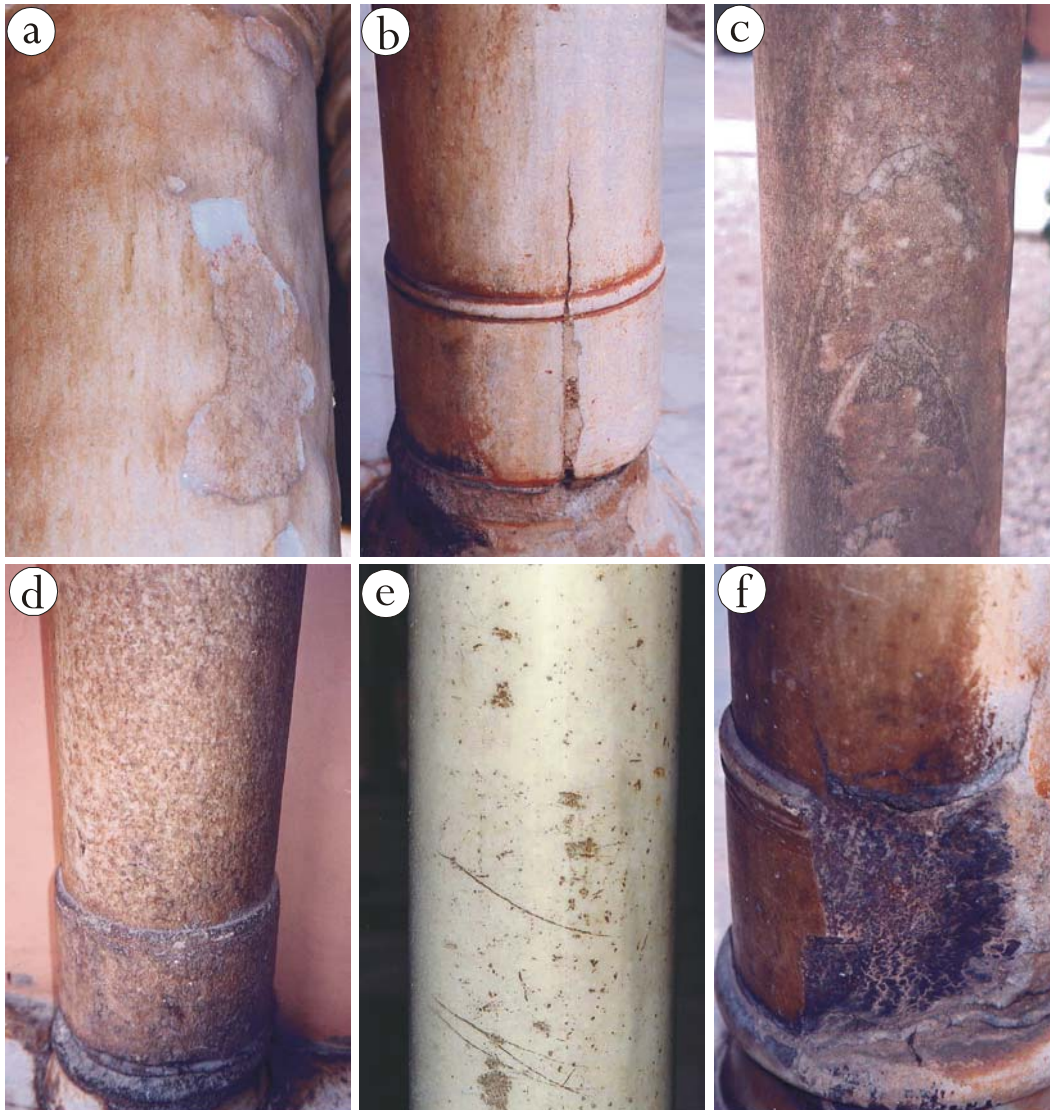


Las fisuraciones y agrietamientos se localizan en las partes extremas (altas y bajas) de las columnas, estando también presentes en aquellas zonas en las que la foliación “visible” se dispone en zonas centrales; suele ser de tipo lineal y desarrollo vertical preferentemente.

Lógicamente para las fisuraciones localizadas en las partes altas y bajas de los fustes (localización, formas, desarrollo, ...) hay que buscar causas mecánicas (esfuerzos mecánicos e inestabilidad estructural provocada por terremotos, ...).

Además de lo descrito, dentro de este primer grupo A, debemos mencionar el deterioro provocado por el uso del Patio, así como por las distintas intervenciones llevadas a cabo en él, lo que ha supuesto pérdida de fragmentos o trozos de columnas por el golpeo provocado al colocar centradas las columnas en alguna de las intervenciones de desmontado de estas (en zonas próximas a basa y capitel, que dejan ver la chapa de plomo).

En la Figura 2.5 se muestran algunos de los deterioros descritos para el grupo A.



*Figura 2.5. Deterioros tipo A. a) descamación en columna 12; b) fracturación vertical en columna 19; c) fracturación-fisuración coincidente con la foliación en columna 8; d) picado o pitting en columna 106; e) huellas por impacto en columna 62; f) fracturación con pérdida de materia en columna 77.*

***B. Deterioros que no originan pérdida de cohesión ni materia***

En este segundo grupo conviene diferenciar entre:

Pátina de envejecimiento (color amarilleo-grisáceo)

Tratamientos de uniformidad de color en zonas con proceso de descamación (agua-barro)

Pátina marrón-rojiza (restos de pintura)

Oscurecimientos localizados

La pátina de envejecimiento es propia del paso del tiempo y en muchas ocasiones no es posible identificarla por separado puesto que se une a otros efectos y aditivos (pintura, agua-barro,...). Es apreciable fundamentalmente en columnas no asoladas.

Los tratamientos para uniformar el color (aplicación de agua-barro) se localizan en las columnas que presentan descamación, con objeto de minorar el fuerte contraste que ocasiona el blanco del mármol que queda visto en las zonas descamadas, frente al resto de la superficie de las columnas; tiene color marrón y supone una fina película que enmascara el color original.

En algunas columnas, sobre todo en zonas altas y bajas, protegidas de la lluvia y el roce diario, se observan restos de pintura marrón-rojiza, que pueden suponerse restos de un acabado antiguo, que ha quedado reducido a las zonas aludidas. Su localización en el Patio es dispersa.

En columnas ubicadas en zonas no expuestas al sol, y por tanto con mayor humedad (fundamentalmente en la zona de la Sala de Abencerrajes), se concentran oscurecimientos provocados por el desarrollo de microorganismos, generalmente en la parte baja de estas columnas.

En la Figura 2.6 se muestran algunos de los deterioros descritos para el grupo B.

En la Tabla 1 del Anexo 2 se describe la patología observada en cada columna y zona de la misma.

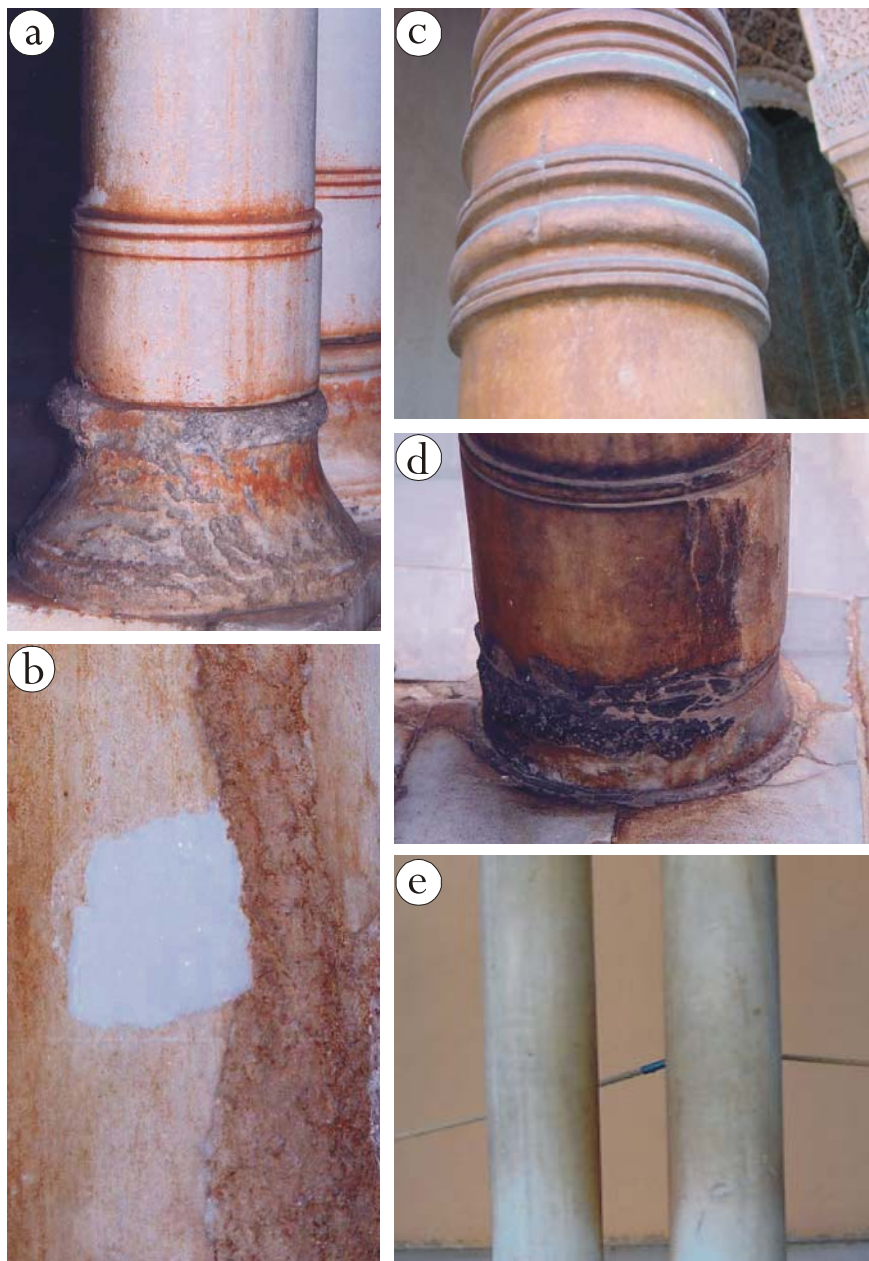


Figura 2.6. Deterioros tipo B. a) y d) pátina marrón rojiza (restos de pintura) localizada en partes altas y bajas de las columnas columna 121 y 23 respectivamente; b) tratamientos de uniformidad de color en zonas con proceso de descamación en columna 12; c) oscurecimientos localizados en zonas de alteración tipo A en columna 14; e) pátina de envejecimiento (color amarillo-grisáceo) en columnas 87 y 88.

Esta descripción del estado actual de las columnas, contrastado con el descrito para el año 90 nos ha permitido conocer la evolución que ha sufrido la columnata en estos últimos años. En nuestro caso además de los distintos estados de descamación, se han considerado los restantes deterioros descritos y sus localizaciones según el desarrollo de cada columna y orientación (exterior, interior, derecha e izquierda) respecto al Patio.

### **Evolución de la patología tipo A**

Podemos decir que la descamación evoluciona en la mayoría de los casos en pequeña proporción excepto en las columnas 13, 18, 24, 26 y 108 en las que se ha considerado necesario avanzar del estadio T5 a T6 para las tres primeras, del estadio T1 a T3 para la columna nº 26 y del T6 a T7 para la columna nº 108 puesto que se observa un incremento considerable de la zona afectada. En los casos más graves puede observarse como la descamación además de en extensión superficial se extiende en profundidad, produciéndose entonces la descamación en frentes sucesivos hacia el interior de la columna. Los tratamientos de agua-barro en ocasiones dificultan la observación de esta evolución y no es posible en ocasiones determinarla de forma muy precisa.

Por otra parte aquellas columnas que no presentaban descamación a finales de los 80 siguen sin presentarla, aunque en algunas (pocas) ya son visibles microfisuraciones.

Es necesario hacer mención también al efecto que produce la manipulación de las zonas afectadas por los visitantes, lo que incrementa de forma rápida los daños observados y favorece un desarrollo y evolución superior.

Fisuración: de la observación realizada se desprenden distintos tipos de fisuración, en primer lugar la denominada microfisuración que aunque se incluye dentro del proceso de descamación presenta un comportamiento distinto del citado proceso en cuanto a su evolución se refiere, de hecho esta microfisuración se incrementa en las columnas existentes y aparece en otras pero de forma más ralentizada, siendo en todo caso las zonas del Patio afectadas coincidentes con las ya mencionadas para el proceso de descamación en estado avanzado.

En segundo lugar nos encontramos con la fisuración coincidente con la foliación. En este caso la evolución se hace latente en zonas donde se superponen distintos deterioros, como es el caso de la descamación puesto que se ve favorecida por la pérdida de cohesión y permite que la fisuración profundice. Por el contrario, en aquellas columnas en las que la fisuración no se combina con pérdidas de materia no se observa evolución, e incluso podría decirse que el proceso está paralizado.

El tercer grupo lo componen las fisuraciones verticales o subverticales, que al igual que en el caso anterior cuando esta no aparece combinada no es posible deducir su evolución pues no hay parámetros que permitan hacerlo (pérdidas, aristas vivas...).

Para las columnas que presentan fragmentación con pérdida de materia decir que al no existir la causa que lo produjo (golpeo) no han evolucionado en cuanto a tamaño y forma, aunque si se han visto afectadas por pátinas o crecimientos biológicos.

### **Evolución de la patología tipo B**

Las pátinas que en distinta proporción afectan mayormente de manera más visible a las columnas libres del proceso de descamación no han sufrido un incremento destacable, presentando actualmente un aspecto similar al observado en los años de inicio de esta investigación.

Destacar que en general no existen diferencias destacables en la evolución del deterioro de la columnata excepto en aquellas en las que el proceso de descamación permanece activo, y por tanto su evolución es posible.

Como ilustración de todo lo expuesto en el plano de planta (Figura 2.11) se indican las patologías existentes en cada una de las columnas.

Hay que destacar, como excepción el estado de conservación que presentan algunas columnas y que en la actualidad resultan totalmente incongruentes con su disposición en el Patio, que estimamos se explica por el traslado a que pueden haber estado sometidas en las distintas intervenciones sufridas por la columnata.

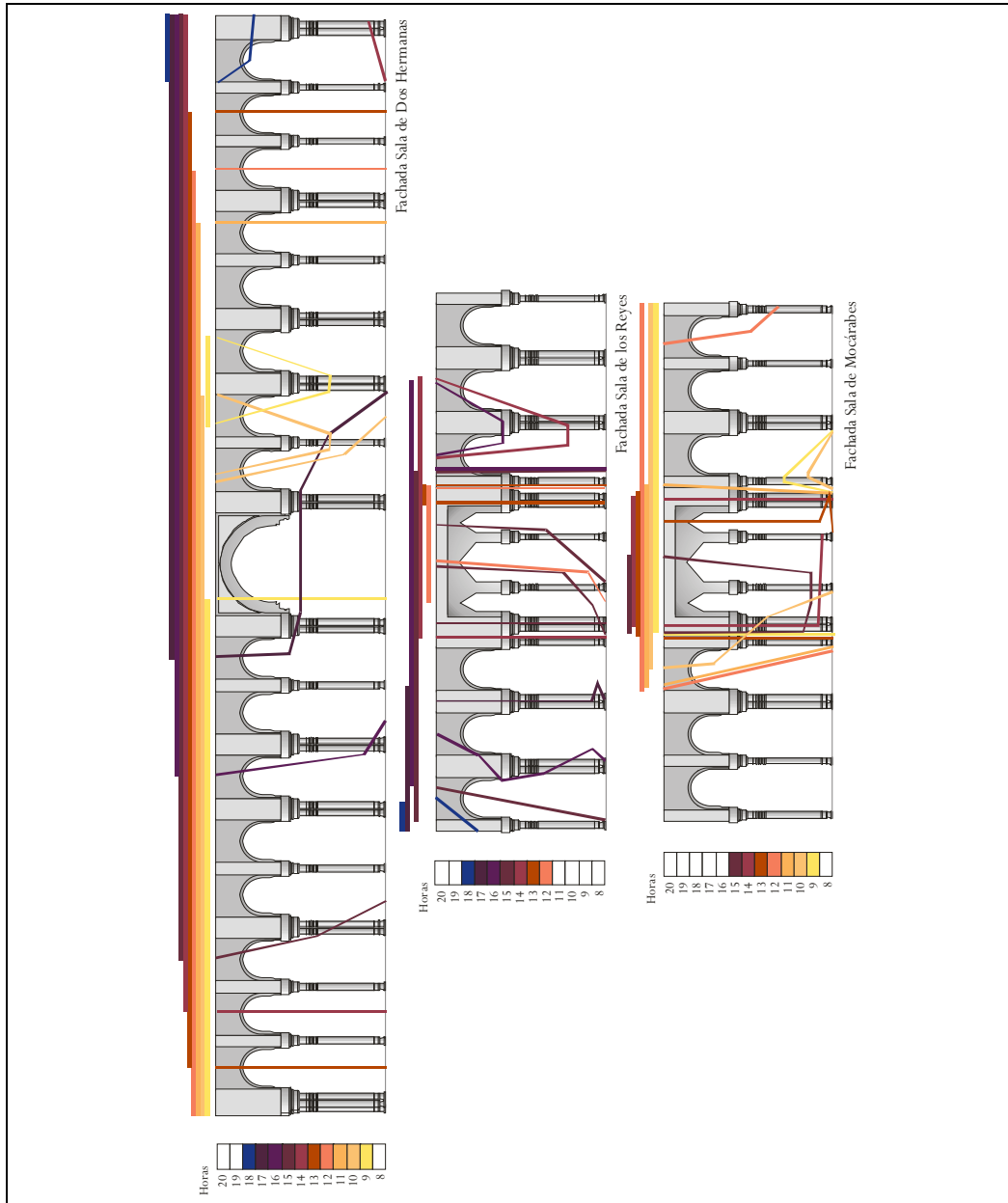


Figura 17. Alzado de Asoleo en Primavera. Orden de fachadas (de arriba a abajo): Sala de Dos Hermanas, Sala de los Reyes y Sala de Mocárabes. Escala de color vertical: horario de asoleo (en color horas de insolación, en blanco horas de no insolación). Escala horizontal: localización de asoleo en fachada correspondiente al horario definido en la escala de color vertical. Sobre fachada: localización de zonas asoladas mediante líneas indicativas representadas según escala de color vertical y complementadas en su desarrollo por la escala horizontal.

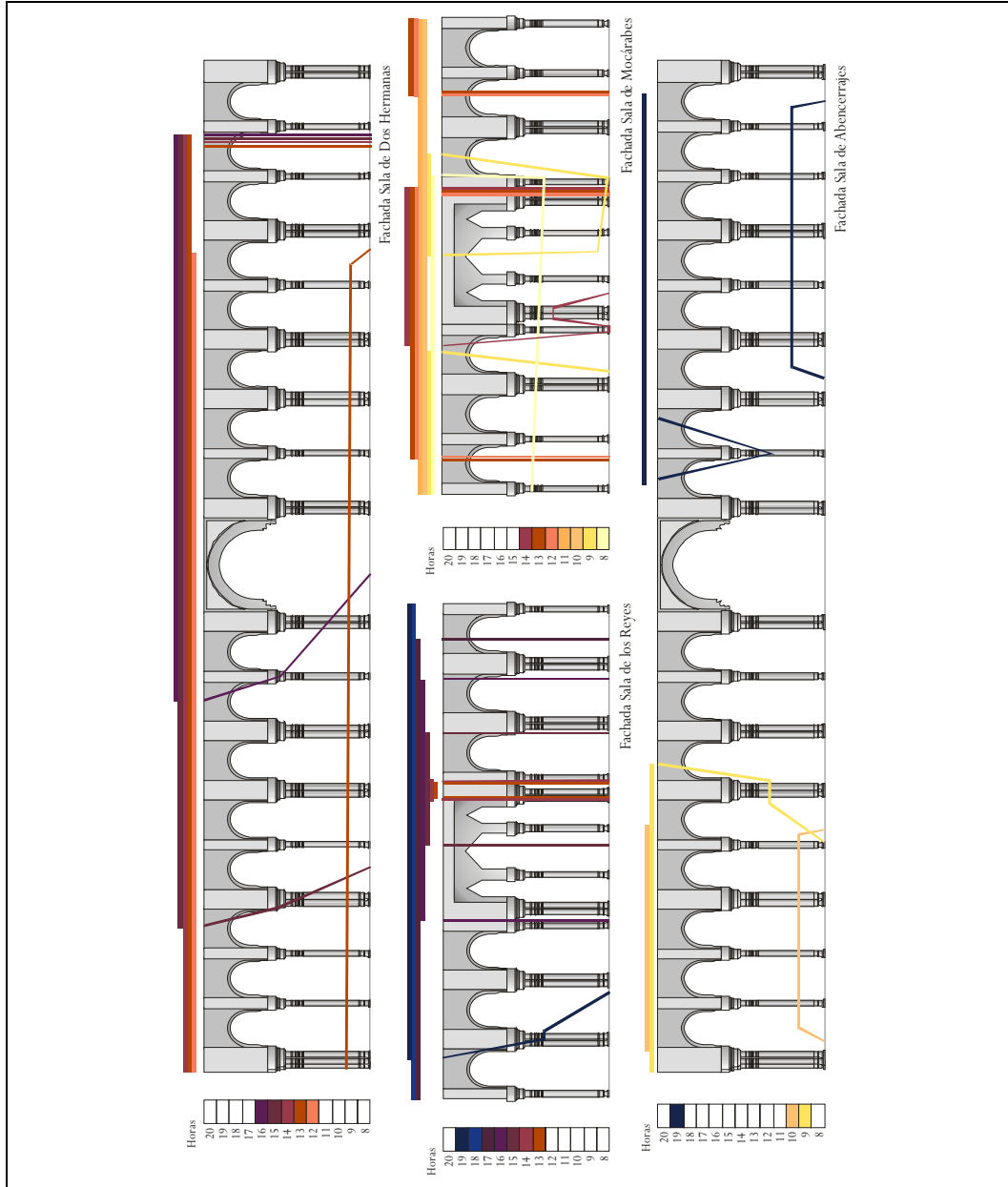


Figura 18. Alzado de Asoleo en Verano. Orden de fachadas (de arriba a abajo): Sala de Dos Hermanas, Sala de los Reyes, Sala de Mocárabes y Sala de Abencerrajes. Escala de color vertical: horario de asoleo (en color horas de insolación, en blanco horas de no insolación). Escala horizontal: localización de asoleo en fachada correspondiente al horario definido en la escala de color vertical. Sobre fachada: localización de zonas asoladas mediante líneas indicativas representadas según escala de color vertical y complementadas en su desarrollo por la escala horizontal.



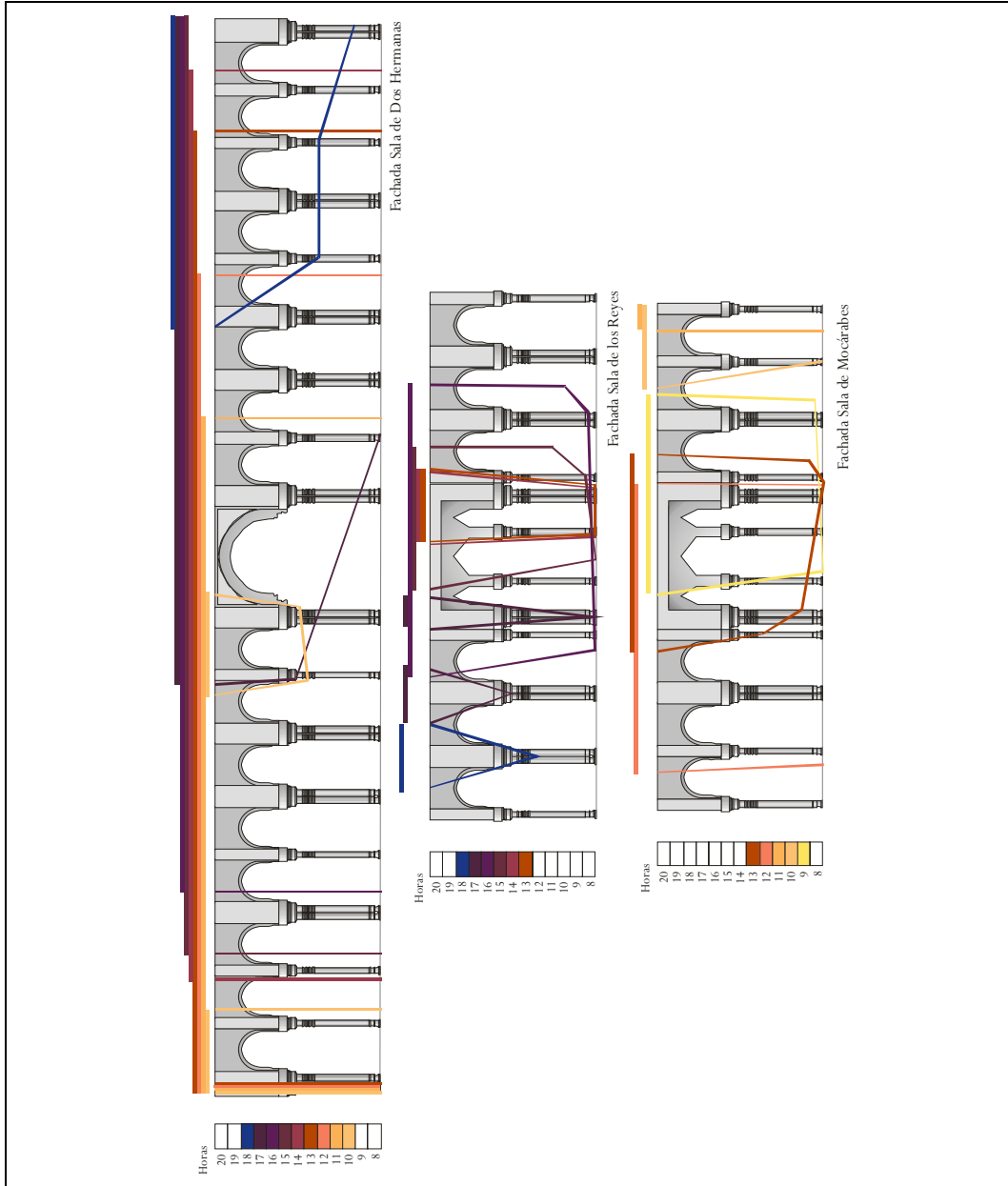


Figura 19. Alzado de Asoleo en Otoño. Orden de fachadas (de arriba a abajo): Sala de Dos Hermanas, Sala de los Reyes y Sala de Mocárabes. Escala de color vertical: horario de asoleo (en color horas de insolación, en blanco horas de no insolación). Escala horizontal: localización de asoleo en fachada correspondiente al horario definido en la escala de color vertical. Sobre fachada: localización de zonas asoladas mediante líneas indicativas representadas según escala de color vertical y complementadas en su desarrollo por la escala horizontal.

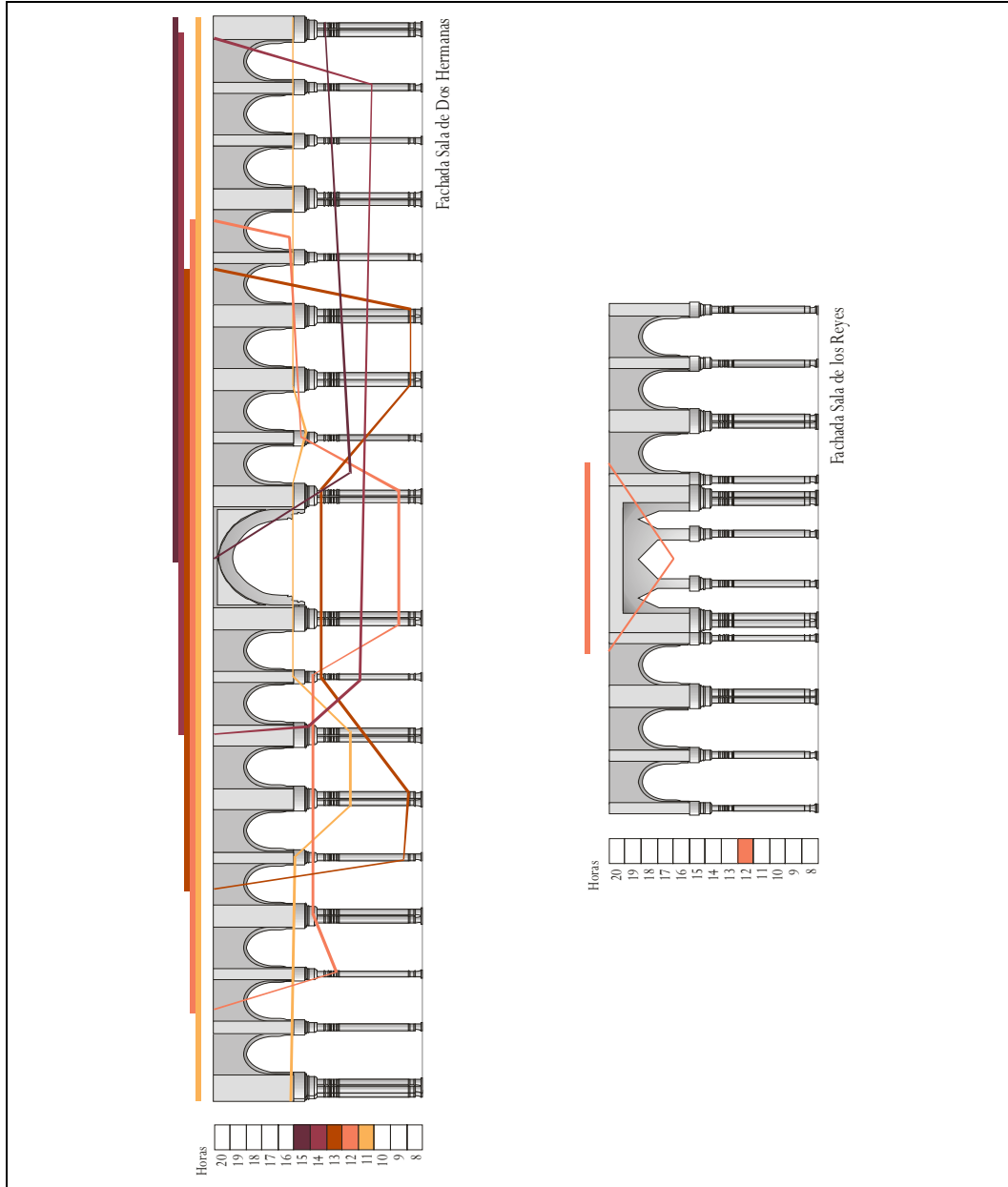


Figura 20. Alzado de Asoleo en Invierno. Orden de fachadas (de arriba a abajo): Sala de Dos Hermanas y Sala de los Reyes. Escala de color vertical: horario de asoleo (en color horas de insolación, en blanco horas de no insolación). Escala horizontal: localización de asoleo en fachada correspondiente al horario definido en la escala de color vertical. Sobre fachada: localización de zonas asoladas mediante líneas indicativas representadas según escala de color vertical y complementadas en su desarrollo por la escala horizontal.



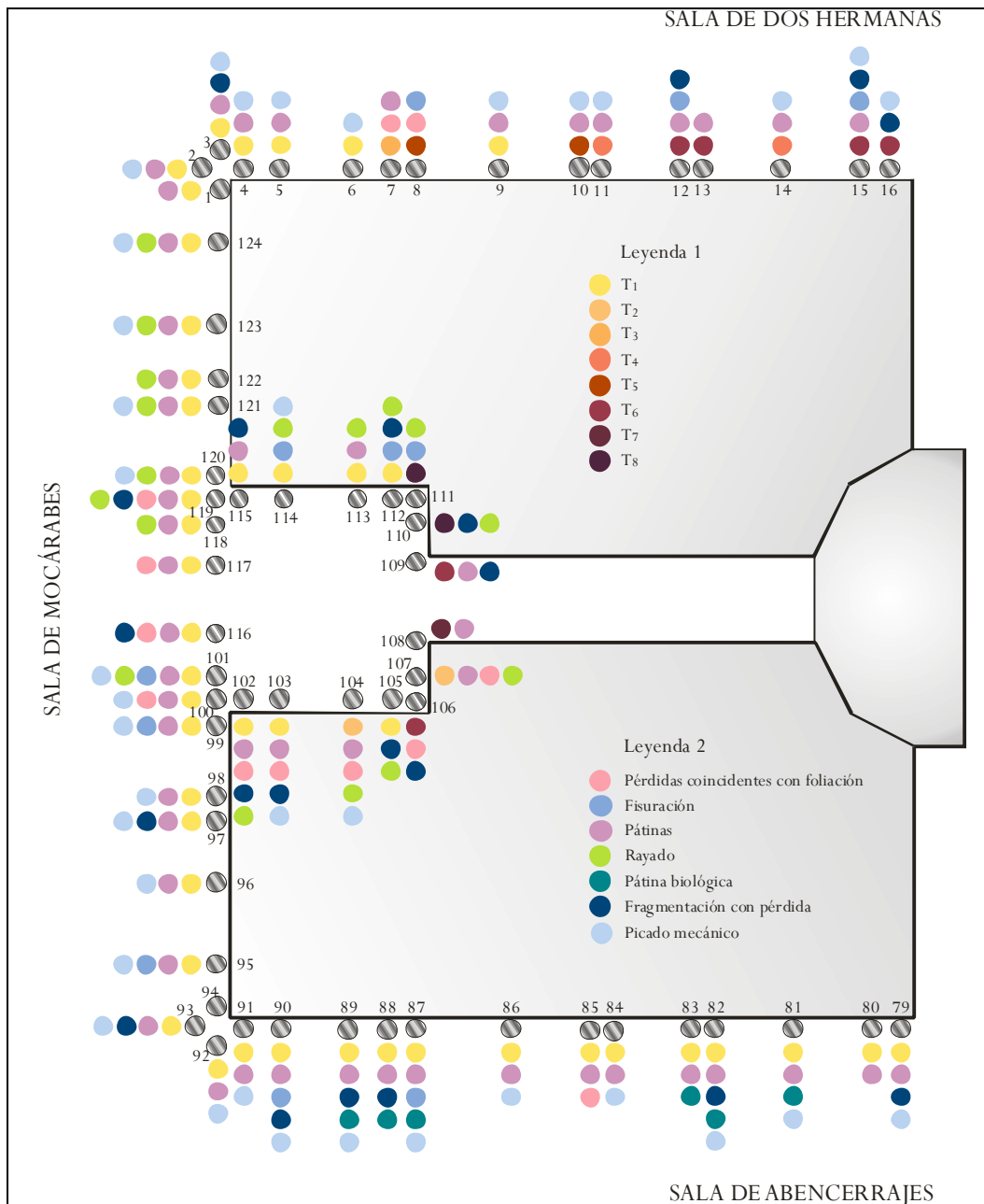
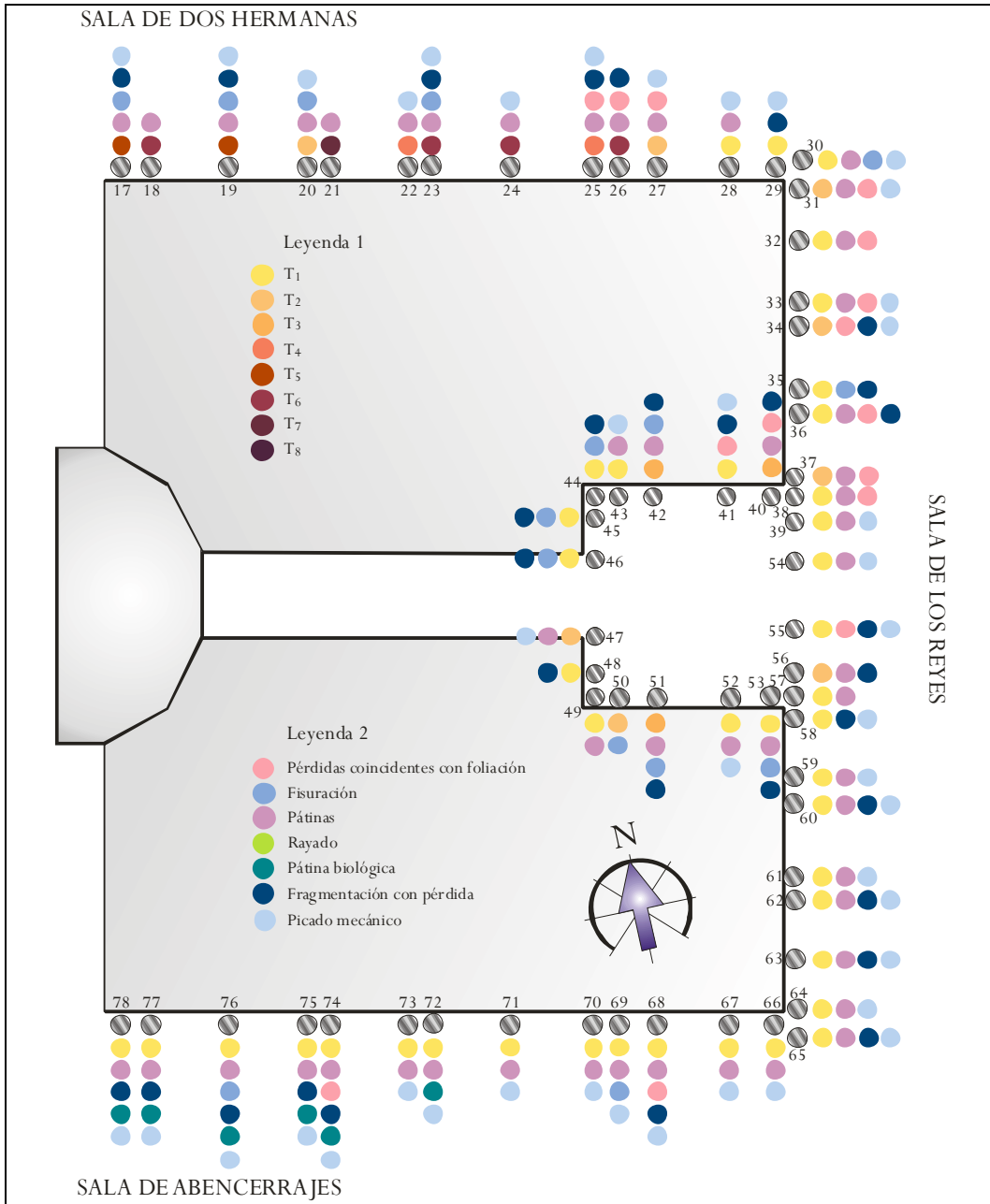


Figura 21.A y 21.B. Plano de planta con especificación de los deterioros presentes en las columnas del Patio de los Leones. Leyenda 1: Estadios de descamación colocados junto a las columnas (según descripción de Figura 12). Leyenda 2: Otros deterioros observados colocados a continuación del estado de descamación.



**ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS LEONES.  
INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE DETERIORO**

---

# **3 ESTUDIO ESTRUCTURAL**









# 3 ESTUDIO ESTRUCTURAL

Como se comenta en la presentación de esta Memoria, uno de los objetivos principales de esta Tesis es el estudio de la columnata desde el punto de vista estructural y en qué medida el comportamiento y posibilidades futuras del material de las columnas puede verse afectado por estos factores en combinación con los ambientales.

Por tanto, es necesario conocer el Patio de los Leones desde esa perspectiva, analizando su conformación estructural y constructiva, lo que nos permitirá realizar las comprobaciones y cálculos respecto a su comportamiento mecánico.

Se ha realizado el estudio y dimensionado de los distintos elementos que componen constructivamente el Palacio de los Leones con el fin de determinar cotas, luces de vanos, direcciones de forjado, tipos de vigas y pilastras, dimensiones, distancias interejos, etc., que nos permita complementar así la información gráfica con la que se ha trabajado. De las distintas referencias bibliográficas accesibles (Cuadernos de la Alhambra, Diario de Obras de Torres Balbás, Planimetría del Archivo Central del Patronato de la Alhambra y Generalife, etc.) se ha deducido la composición que, desde el punto de vista constructivo y estructural, conforma el edificio para aquellas zonas no accesibles. Dadas las numerosas intervenciones acaecidas, y la falta de referencias gráficas o descripción de las mismas, no podemos

descartar algunas diferencias entre situaciones actuales de algunos elementos y nuestras deducciones.

### 3.1. DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA DEL PATIO DE LOS LEONES

Para la descripción estructural del Patio nos hemos basado por una parte en la documentación existente, y por otra en las inspecciones que hemos realizado. La documentación procedente de distintas fuentes (ya referenciadas en el Capítulo 1), y sobre todo, en la documentación gráfica facilitada por la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra y Generalife nos han permitido un conocimiento bastante completo de las diversas actuaciones acaecidas en el recinto, detalladas en el Capítulo 1, y de esta forma poder deducir a través de las intervenciones las posibles modificaciones estructurales y arquitectónicas que muestran el estado actual del Patio.

De entre las distintas intervenciones mencionadas en el citado Capítulo cabe destacar aquellas que afectaban a las condiciones de estabilidad y mantenimiento estructural de las columnas y que datan de 1541 con la colocación de tirantes, actuación que se ve ampliada y repetida en los siglos XVII, XVIII, XIX y XX; otras intervenciones de mayor entidad han supuesto el desmontado de las columnas, recalce de la cimentación incluso sustitución de apoyos, sin que de ello se conozca con exactitud, el alcance de las obras y las columnas que se vieron afectadas.

Los planos, de igual forma, han facilitado datos relativos al dimensionado y composición material de partes de la estructura (templetes, Salas, ...), así como un conocimiento más exhaustivo de soluciones antiguas, y modificadas en proyectos posteriores como es el caso de las cubiertas de los templetes.

La utilización de materiales básicos, el paso del tiempo y en ocasiones los distintos “incidentes” acontecidos en el Monumento han hecho necesaria la actuación en muros y forjados, realizando en ellos trabajos de reparación, sustitución de piezas, recrecidos, apuntalado y atirantado en numerosas ocasiones.

En cuanto a nuestra labor de inspección, la condición del Monumento hace difícil, por no decir imposible, la realización de catas o la aplicación de técnicas de reconocimiento alternativas que permitan conocer en detalle la composición y disposición estructural del Conjunto. Por ello la metodología seguida en nuestro caso, como ya se ha comentado anteriormente, ha consistido en una inspección visual y

toma de datos (dimensionado) de los distintos elementos que intervienen en la estructura definida en el Patio.

A falta de algunas medidas no representadas en la documentación gráfica, lo que ha exigido, dentro de las posibilidades, su dimensionado, la mayoría de los elementos comprobados coinciden con lo expresado en la citada documentación; esto ha permitido la utilización directa de esta información en la comprobación de cálculo posterior.

El diámetro de las columnas oscila entre 15,11 cm para las menores y 18,62 cm para las mayores, estando la altura comprendida entre los 2,07 y los 2,11 m. El dimensionado (grosor) de las basas de apoyo es variable, no siguiendo en ningún caso una secuencia comprensible, dado las intervenciones que al respecto se han llevado a cabo en varias ocasiones. Puede intuirse no obstante la necesidad de recrecer o recortar estas piezas según se hayan ido produciendo a lo largo del tiempo movimientos en la estructura, ocasionados posiblemente por asientos diferenciales o movimientos sísmicos de relativa importancia, muy frecuentes por otra parte en la zona (Figura 3.1).



*Figura 3.1. Detalles de las distintas dimensiones de las basas de las columnas.*

Las dimensiones de los capiteles son menos variables (variaciones de orden milimétrico), destacando en este caso la unión de varios de ellos en función de la agrupación de columnas que se tenga en cada zona del Patio. Estas uniones se realizan mediante una pieza continua que garantiza el buen reparto de cargas (Figura 3.2).



*Figura 3.2. Detalle de la disposición de los capiteles en las distintas agrupaciones de 1, 2 y 3-4 columnas.*

Las planchas de plomo no siempre son visibles exteriormente, aunque pueden considerarse existentes en todos los casos, justificando sin duda alguna la necesidad que de este elemento se tiene para garantizar el buen comportamiento a los movimientos horizontales que pudieran producirse en la estructura como se ha comentado anteriormente (Figura 3.3).



*Figura 3.3. Detalle de chapa de plomo colocada entre la columna y el capitel.*

Sobre los capiteles de mármol se disponen las pilastras de ladrillo macizo de dimensiones aproximadas 0,25 x 0,25 m, y de una altura estimada de 2,0 m; esta altura de las pilastras consideramos que es además variable, dada también la variabilidad de alturas comentada para los elementos inferiores (columnas), y la

necesidad de igualdad que todas ellas deben conseguir en cabeza para garantizar el asiento de la viga y la transmisión de cargas correctamente.

Como primer elemento de trazado horizontal dispuesto sobre la columnata nos encontramos con las vigas, de dimensiones estimadas 0,40 m para la inferior y 0,30 m para la superior, que recogen en su doble altura la viguería del forjado de la galería y por encima la correspondiente al alero de cubierta, resuelto de forma independiente (Figura 3.4).

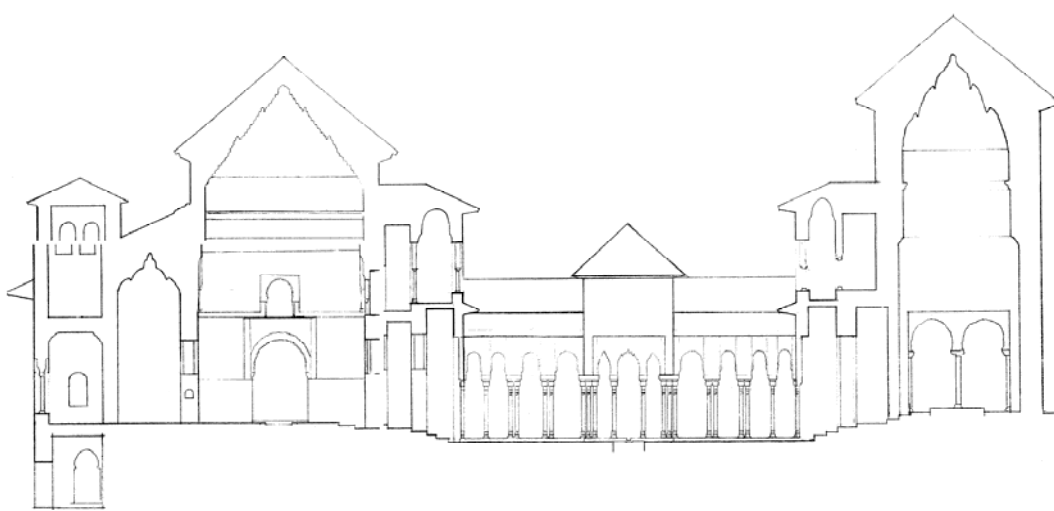
Por último, en función de las alturas debe considerarse la existencia del forjado de cubierta, muros de plantas superiores o cúpulas y cubiertas en el caso de los templetos, cuya disposición y composición se muestra en las distintas figuras recogidas en el presente capítulo.



*Figura 3.4. Detalle de la composición del forjado de madera del alero de las galerías perimetrales al Patio.*

A partir de los estudios precedentes, documentales y de observación directa, podemos establecer que la conformación estructural del edificio está constituida por dos anillos o límites horizontales. Un primer anillo como una estructura portante vertical, con una combinación de materiales entre los que destaca la fábrica de ladrillo, mampostería y tapial (Figura 3.5, 3.7 y 3.8), realizada con muros de carga y

arriostramiento, longitudinales (paralelos a fachada) y transversales (perpendiculares a fachada), en las distintas plantas del inmueble, que delimitan las distintas salas y espacios; existen además otros muros de menor entidad que delimitan espacios menores, y cuya función es hacer de divisoria entre dichas estancias (Figura 3.6). El segundo anillo concéntrico interior, constituido por la columnata de mármol, delimita el propio Patio.



*Figura 3.5. Sección transversal del Palacio de los Leones, (N-S)(Mirador de Lindaraja-Sala de Abencerrajes donde se muestra la composición estructural básica. Tomado del Plano n° nuevo 2.225 de la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra.*



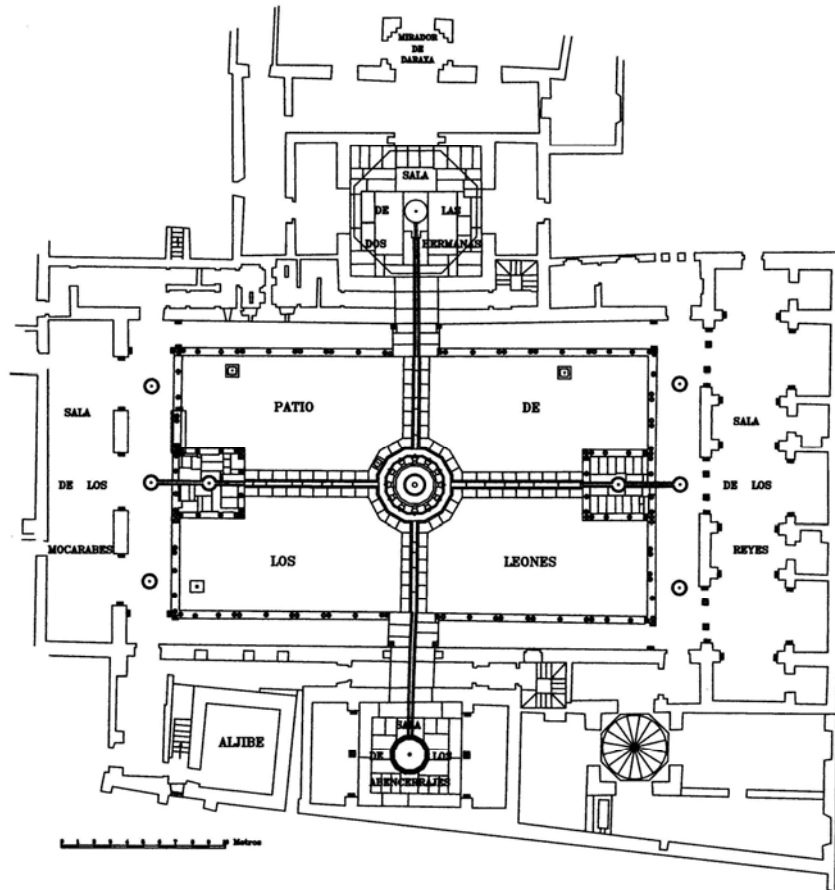


Figura 3.6. Plano de planta del Palacio de los Leones, donde se muestra la composición estructural básica. Adaptado del Plano n° nuevo 158 de la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra.

En síntesis, el conjunto edificatorio del Palacio de los Leones se organiza alrededor de un Patio central todo ello construido a base de muros de carga ortogonales entre sí, a excepción del muro exterior en fachada sur, (Sala de Abencerrajes), y con forjados de madera (Figura 3.4). Se desarrolla en una, dos o tres alturas según las fachadas, y el sistema constructivo es similar en todas ellas, si bien el dimensionado es variable de acuerdo con las alturas y luces existentes en cada caso.



*Figura 3.7. Detalle de la composición de los muros del Palacio en planta baja (ladrillo y tapial).*



*Figura 3.8. Detalle de la composición de los muros del Palacio en la planta sótano bajo la Sala de Dos Hermanas (ladrillo y mampostería).*

Si dividimos la estructura del anillo perimetral exterior en cuatro cuadrantes en función del acceso a cada zona (Figura 3.9) y tomando como referencia para su descripción las orientaciones norte, sur, este y oeste, vemos como la fachada norte (primer cuadrante) está formada por cuatro crujiás paralelas a la fachada y otras cinco perpendiculares a las anteriores que delimitan y soportan las salas laterales y superiores y la cúpula de mocárabes de la Sala de Dos Hermanas.

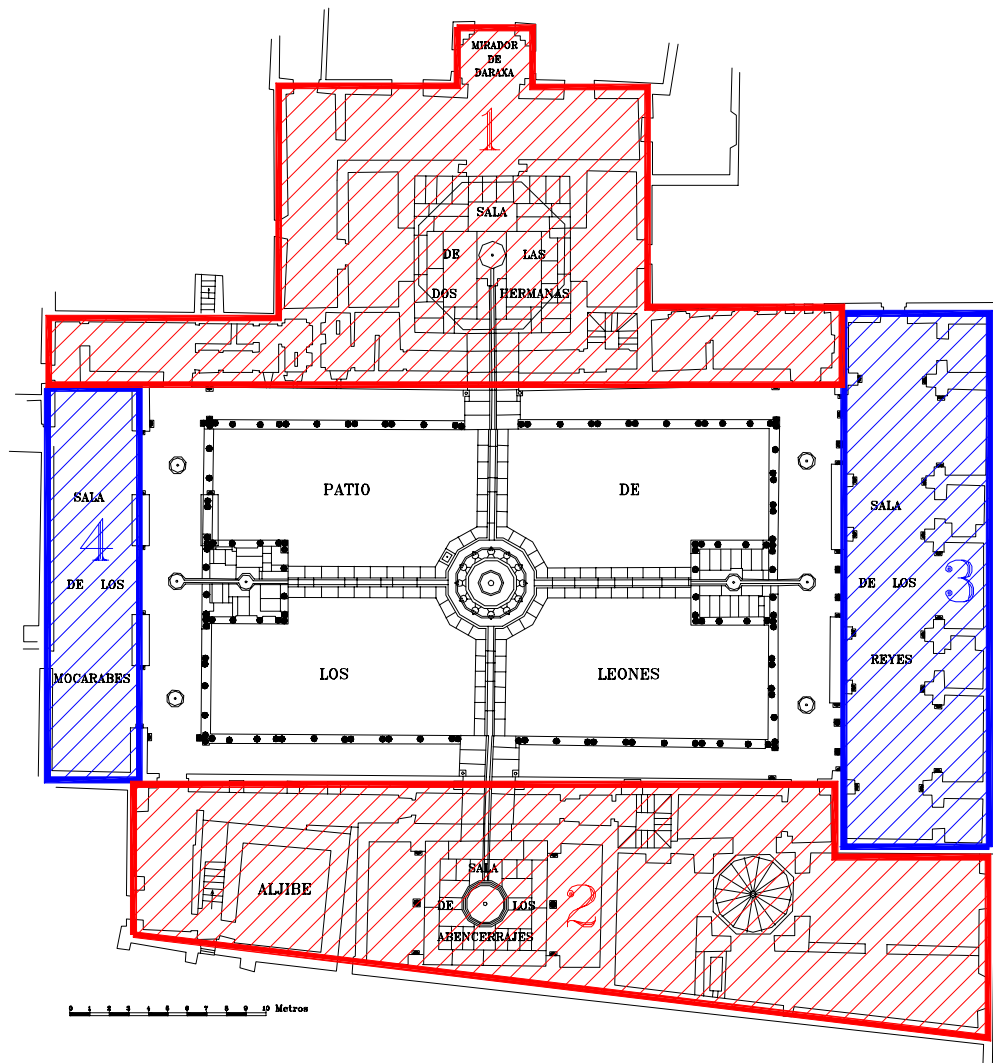


Figura 3.9. Muestra de los anillos concéntricos y de los muros de carga y divisorios de las distintas estancias. Descomposición de la planta en cuadrantes.

Una disposición similar a la comentada se mantiene en la fachada sur (Sala de Abencerrajes, segundo cuadrante), donde el número de crujías paralelas es de tres y la consideración de las perpendiculares varía respecto de la fachada anterior, siendo un total de 4, pues en este caso se aprovecha la prolongación de una de las crujías incluidas en la fachada oeste.

Las fachadas este y oeste algo más simples en su distribución espacial, se componen para la primera (Sala de los Reyes, tercer cuadrante) de tres crujías paralelas a la fachada y otras ocho perpendiculares en función de la disposición de las distintas salas existentes. De hecho es de destacar para esa disposición de huecos en la primera de las crujías (accediendo desde el Patio) la existencia de 6 columnas de mármol. El último de los cuadrantes comentados (Sala de Mocárabes) incluye dos crujías paralelas a la fachada, sin que se considere ninguna perpendicular según la designación de cuadrantes expuesta anteriormente.

La disposición del segundo anillo perimetral es más simple y lo forman un total de 124 elementos sustentantes verticales (columnas) con basa y capitel de mármol independizadas ambas del fuste mediante chapa de plomo. Sobre el capitel se encuentran las pilastras de ladrillo que reciben las cargas de la viga de madera que a su vez recogen las cargas transmitidas por las viguetas dispuestas en el forjado de la galería perimetral del Patio, templetes y alero. La documentación fotográfica sobre distintas intervenciones en las arcadas sobre las columnas, así como la observación exhaustiva sobre esta zona y otras de análoga resolución (habitaciones altas de la Sala de Abencerrajes y El Partal, Figura 3.10) nos ha permitido concretar la disposición comentada.



*Figura 3.10. Detalle y vista general de la solución constructiva adoptada en el Partal, que coincide con la adoptada en la columnata del Patio de los Leones.*

Centrándonos ahora en las plantas altas, solamente existen las denominadas “habitaciones altas” en las fachadas norte y sur, coincidiendo así con la Sala de Dos Hermanas y Sala de Abencerrajes respectivamente. En ellas se mantiene la misma disposición de muros de carga perpendiculares entre sí, destacando para la primera la menor superficie ocupada a nivel de planta primera sobre la Sala de Dos Hermanas y la existencia de un nivel intermedio, conocido como “la cocinilla”, que se dispone sobre el extremo lateral derecho de esta sala y el lateral izquierdo de la Sala de los Reyes. Las denominadas habitaciones altas de la Sala de Abencerrajes, zona conocida como El Harén, se extienden sobre toda la planta baja que corresponde con esta orientación, incluyendo el aljibe y la antigua entrada del Palacio.

De forma exclusiva para el edificio en la fachada norte destaca la existencia de una planta sótano, (Figura 3.11) y de cuya inspección hemos podido conocer en parte los materiales y espesores que constituyen las soluciones estructurales y constructivas representativas del edificio.



*Figura 3.11. Sección constructiva de la Sala de Dos Hermanas. Tomado del Plano n° nuevo 827 de la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra.*

Para el completo conocimiento detallado del funcionamiento estructural del Patio es necesario definir los límites verticales arquitectónicos del mismo, determinando en planos (planta y alzado) los elementos que se comportan como una única unidad. Para ello se han comprobado todos los elementos de conexión existentes entre la columnata del Patio (anillo perimetral interior) y el resto del edificio; de dichas observaciones se deduce como las columnas del perímetro interior del Patio (incluidos templete) forman una unidad individual e independiente del resto de la estructura del Monumento (Figura 3.12), teniendo que destacar sin embargo diversas localizaciones de atado-zunchado e incluso anclaje-atirantado con los muros que delimitan el resto de las dependencias o salas que conforman el primer

anillo, necesarios los primeros en la ejecución de la propia estructura del Monumento y siendo los segundos colocados a posteriori con objeto de mantener la estabilidad de la columnata.

De igual forma, los límites que definen en alzado la zona de estudio vienen determinados por la superposición de alturas según zonas (varias plantas en Salas de Dos Hermanas y Abencerrajes) y templetos salientes en Salas de Los Reyes y Mocárabes con una única altura en ambos laterales (Figura 3.13), lo que distingue, al igual que para los límites horizontales, zonas estructuralmente diferentes, que exige en las comprobaciones de cálculo realizadas un tratamiento distinto.

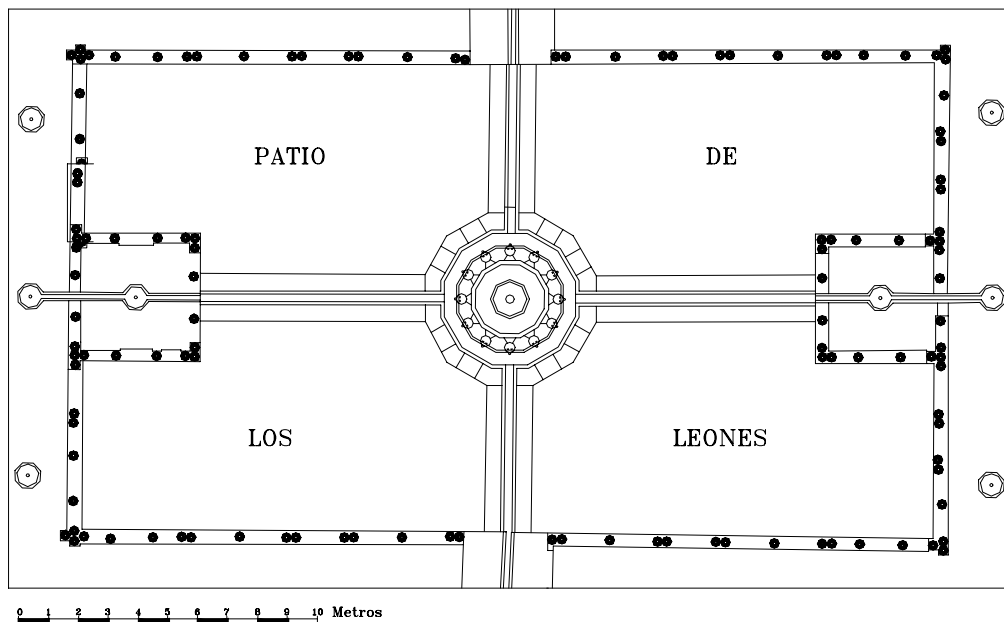


Figura 3.12. Plano de planta del Patio, columnata y templetos que definen los límites del anillo perimetral interior.



Figura 3.13. Vista general de los elementos que componen el anillo perimetral interior: columnata perimetral y templete.

## 3.2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PATIO

Centrándonos en el estudio del área comprendida en el segundo anillo perimetral determinado como independiente del resto, según los límites estructurales definidos y vista la composición y distribución geométrica para cada uno de los elementos que lo componen, en este apartado se ha tratado de conseguir un modelo físico que pueda ser analizado; para ello se procede a la modelización de todos los elementos que conforman el área de estudio así como los vínculos existentes entre ellos, lo que nos permitirá conocer el comportamiento estructural del Patio.

Pese a la unidad en el tratamiento arquitectónico que se percibe en esta parte de los Palacios Nazaríes, estructuralmente deben establecerse dos partes bien diferenciadas: la columnata perimetral y los templete.

### *COLUMNATA PERIMETRAL*

Una detenida observación de la disposición de las columnas de la galería perimetral permite constatar los hechos siguientes:

1º) Existen cuatro tipos de disposiciones: columnas aisladas, y agrupaciones de dos, tres y cuatro elementos (columnas).

2º) Los elementos aislados o agrupados en dos se disponen en las dos alineaciones con mayor longitud, según un determinado ritmo de repetición de cada tipo de agrupación.



3º) Las agrupaciones de tres elementos se disponen, exclusivamente, en las dos esquinas de la alineación correspondiente a la Sala de Mocárabes.

4º) Las agrupaciones de cuatro elementos se disponen, exclusivamente, en las dos esquinas de la alineación correspondiente a la Sala de los Reyes.

Ante la constatación de los hechos anteriores, surge la necesidad de buscar respuestas lógicas a los interrogantes que aquellos suscitan. Al optar por seguir una vía especulativa en el intento de comprender las razones de semejante orden estructural, resulta inevitable detenerse en el análisis del sistema constructivo adoptado en el conjunto arquitectónico en el que se enmarca el Patio.

Consultando la documentación gráfica a la que se ha tenido acceso, y tras observaciones efectuadas “in situ”, se llega a presumir que el techo de cada galería se sustenta en una serie de viguetas de madera transversales a cada uno de los lados del perímetro del Patio. Tales viguetas, invariablemente, deberán apoyar uno de sus extremos en un muro de carga fabricado con ladrillo macizo, en tanto que el otro lo hace en una viga de madera. Esta última, apoyará sus dos extremos en sendas pilastras de ladrillo macizo que arrancan de los capiteles de las columnas. Tal organización estructural es idéntica a la que inequívocamente se adivina para la construcción del edificio que se encuentra en los jardines de El Partal, y que se revela tras una observación somera de su fachada principal.

Las vigas de madera que se tienden sobre el plomo de las columnas perimetrales no deben poseer dimensiones arbitrarias. En la elección de sus dimensiones debieron influir, entre otros aspectos, las posibilidades del material disponible, la facilidad de su manejo, y su potencial resistente.

Aceptando la hipótesis de estandarización en las dimensiones que pudieron adoptarse para las vigas de madera que iban a ser utilizadas en esta parte de la obra, se procede a observar con detenimiento, la distribución de las columnas en todo el perímetro del Patio y otros de sus diversos aspectos dimensionales.

**Columnas aisladas:** se disponen en los cuatro laterales del Patio y actúan como apoyo intermedio en las vigas continuas.

**Agrupaciones de dos columnas:** surgen necesariamente en todas las zonas de discontinuidad de las vigas y permiten un apoyo correcto.

Se constata por otra parte, que la distancia entre cada dos agrupaciones consecutivas de dos columnas es prácticamente constante en toda la columnata.

Considerando por tanto que cada una de estas vigas puede contar con más de dos apoyos y, que donde coincidan los dos apoyos de dos vigas contiguas, la pilastra

de ladrillo macizo deberá presentar unas dimensiones que permitan un buen apoyo de los dos extremos de las vigas que en ella descansan, se llega a intuir la existencia de un módulo de longitud para las vigas principales, siendo este módulo la longitud entre dos agrupaciones consecutivas de dos columnas, tal como se describe en la Figura 3.14.

La longitud que se estima para éste módulo, según medidas tomadas “in situ”, es  $m = 3,45$  m.

La longitud del módulo “m” y las dimensiones del Patio obligan a la disposición de un segundo módulo (o submódulo) “n” de longitud 1,70 m que se dispone en las cuatro fachadas del Patio, de tal manera que el reparto de columnas mantenga la simetría según los ejes principales.

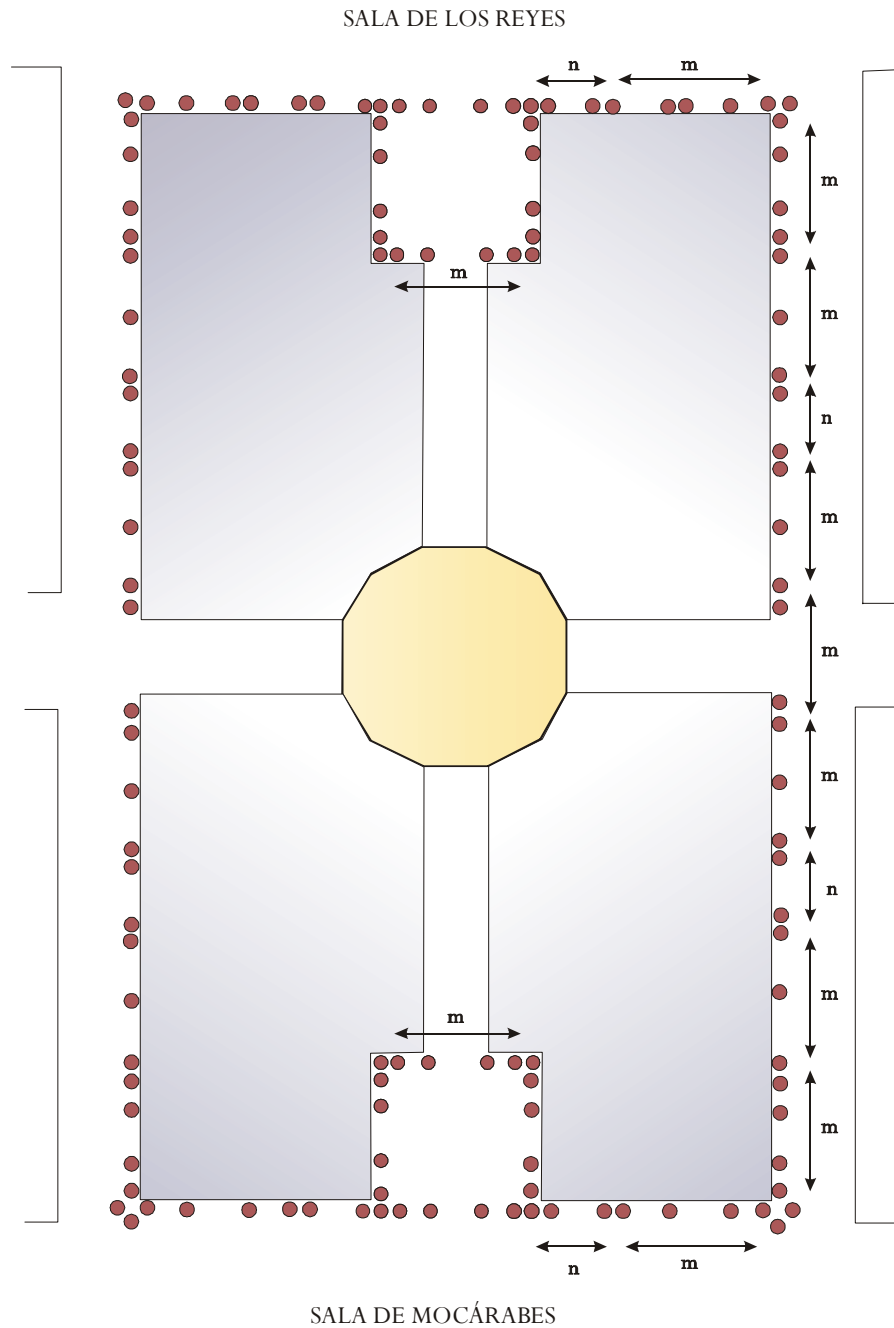


Figura. 3.14. Distribución de columnas y módulos básicos establecidos en el Patio de los Leones ( $m$  y  $n$ ).

Admitiendo la existencia de la modulación que se acaba de presentar, se procede a explicar la razón de la presencia de las otras agrupaciones de columnas.

**Agrupaciones de cuatro columnas:** se encuentran en las dos esquinas de la alineación corta situada por delante de la Sala de los Mocárabes y responden a las necesidades de apoyo del cruce de cuatro vigas de madera que debieron disponerse para conferir mayor estabilidad a las dos esquinas de la galería a la vez que resolvían el apoyo de las viguetas en los dos recuadros.

**Agrupación de tres columnas:** la anterior agrupación, que en principio debiera repetirse en las otras dos esquinas de la galería, en la zona de la Sala de los Reyes, no aparece allí. En cada una de estas dos esquinas aparecen sendas agrupaciones de tres columnas. La diferencia de criterio en el tratamiento de un mismo problema se justifica por las sustanciales diferencias arquitectónicas entre los espacios que se encuentran en una y otra zona. Las dos estancias que, lindando con la galería en la parte de la Sala de los Reyes, se encuentran en las dos esquinas, presentan una fachada abierta y porticada, lo que impide la prolongación de los dinteles que discurren apoyados en la fila de columnas del lado mayor del rectángulo en el que se enmarca el Patio. El techo de los dos rincones de esta zona de la galería perimetral deberá forjarse apoyando las viguetas en dos vigas de madera que, en prolongación de los dinteles del lado corto del rectángulo perimetral del Patio, se apoyan en cada uno de los dos machones alzados sobre las tres columnas de la esquina y en cada uno de los dos muros de carga paralelos al lado mayor del Patio. Al proceder del modo que se acaba de describir, quedará liberada de todo condicionante estructural la fachada más noble de cada una de aquellas estancias, permitiendo así la máxima libertad para su decoración.

#### ***ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS FORJADOS DEL TECHO DE LAS GALERIAS***

Al interpretar la distribución de las columnas según la descripción que se acaba de exponer, resulta una distribución de dinteles de madera tal como la que a continuación se propone (Figura 3.15):

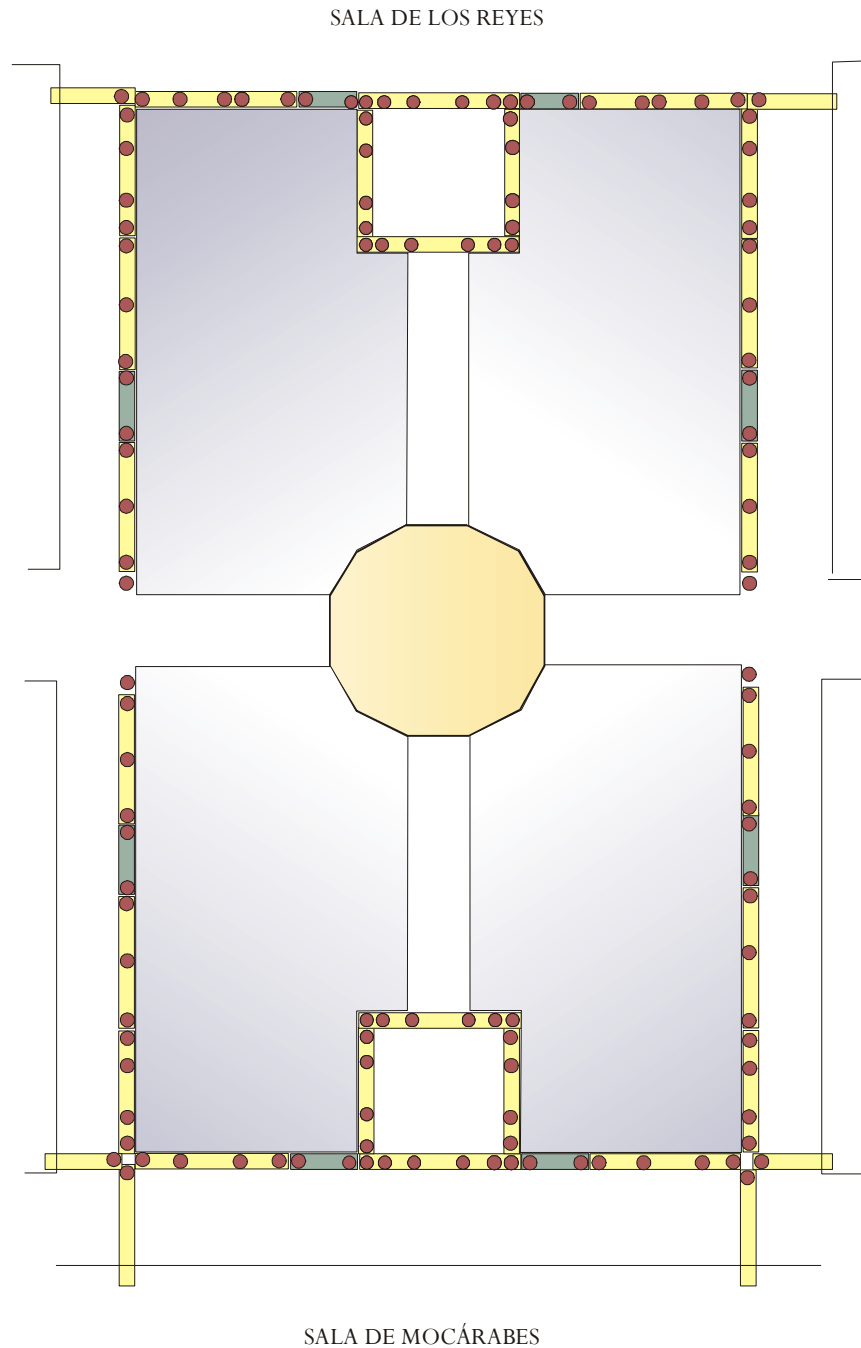


Figura. 3.15. Distribución de dinteles de madera en la columnata perimetral del Patio de los Leones. En amarillo dinteles “m” de longitud 3,45 m; en verde dinteles “n” de longitud 1,70 m.

La distribución de dinteles que se acaba de proponer muestra una absoluta congruencia y conformidad con la que resultaría si se diseñara con los criterios emanados de la aplicación de la Teoría de la Resistencia de Materiales a los dinteles de la columnata perimetral.

Habiendo adoptado un módulo fundamental de longitud “L” tal que la longitud del lado mayor del perímetro del Patio resulta ser un múltiplo entero de dicho módulo (ocho), las reglas de la simetría inicialmente impuesta para la distribución de las columnas perimetrales impone el desdoblamiento de uno de estos módulos en otros dos, apareciendo tales elementos en la zona media de la longitud libre entre los templete y los pasillos transversales al lado mayor del perímetro del Patio, tal como se señalan con un cambio de color en la tramas de la Figura 3.15. El dintel de longitud “L” presenta siempre un apoyo intermedio, con lo que estructuralmente funciona como viga continua de dos vanos sometida a la acción de una carga uniformemente distribuida “q”, tal como se indica en la Figura 3.16:

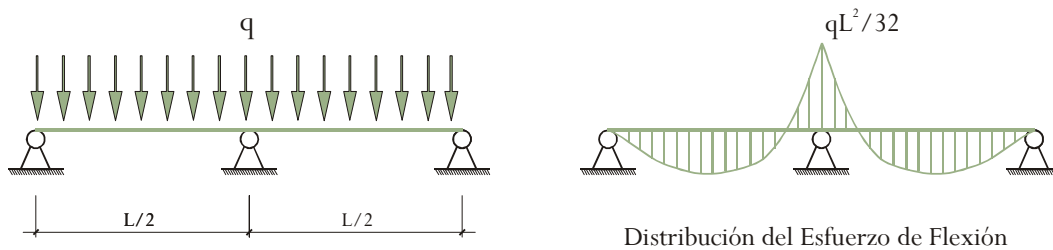


Figura 3.16. Representación gráfica de la distribución de cargas y distribución del esfuerzo a flexión en viga continua de dos vanos.

Para el dintel de un sólo vano, el modelo de viga biapoyada sometida a la acción de una carga uniformemente distribuida es el que se muestra a continuación (Figura 3.17):

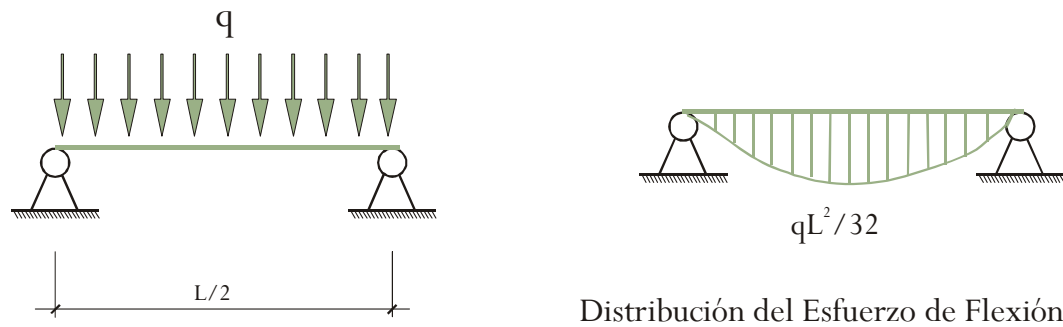


Figura 3.17. Representación gráfica de la distribución de cargas y distribución del esfuerzo a flexión en viga continua de un vano.

A la vista de las dos últimas figuras resulta evidente que la capacidad resistente a flexión de ambos dinteles es la misma.

De esta última observación cabe deducir que para el responsable de la construcción del adintelado de las columnatas perimetrales era conocido, de algún modo, el límite de capacidad resistente a flexión de los dinteles dispuestos para esta construcción. Tras esta deducción, no resulta difícil adivinar que para el forjado del techo de las galerías longitudinales que cubre la zona correspondiente al pasillo transversal, el que conecta la Sala de Abencerrajes con la Sala de Dos Hermanas, con una distancia entre columnas igual a “L”, no puede estar resuelto del mismo modo que para las restantes galerías.

Admitiendo la hipótesis de que las escuadrías de toda la vigería de madera de los forjados de los techos de las galerías sean iguales, hipótesis que se inspira en la observación del revestimiento en madera dispuesto en la fachada como tratamiento constructivo para simular la continuidad en el material de la fábrica vertical (Figura 3.18), se procede a evaluar la separación máxima que resulta admisible para las viguetas que, con una luz igual a “L”, se apoyaran en sendas vigas transversales al lado mayor del perímetro del Patio (Figura 3.19). A su vez, se comprobará si disponiendo dos vigas de madera en cada uno de los apoyos extremos de las viguetas de luz “L”, la seguridad del sistema de doble viga no resulta inferior a la de la viga única con apoyo intermedio y longitud “L”. En caso de resultar positivas ambas comprobaciones, se aceptará sin reservas el cambio de disposición del forjado del techo de las galerías en sus encuentros con el pasillo transversal.

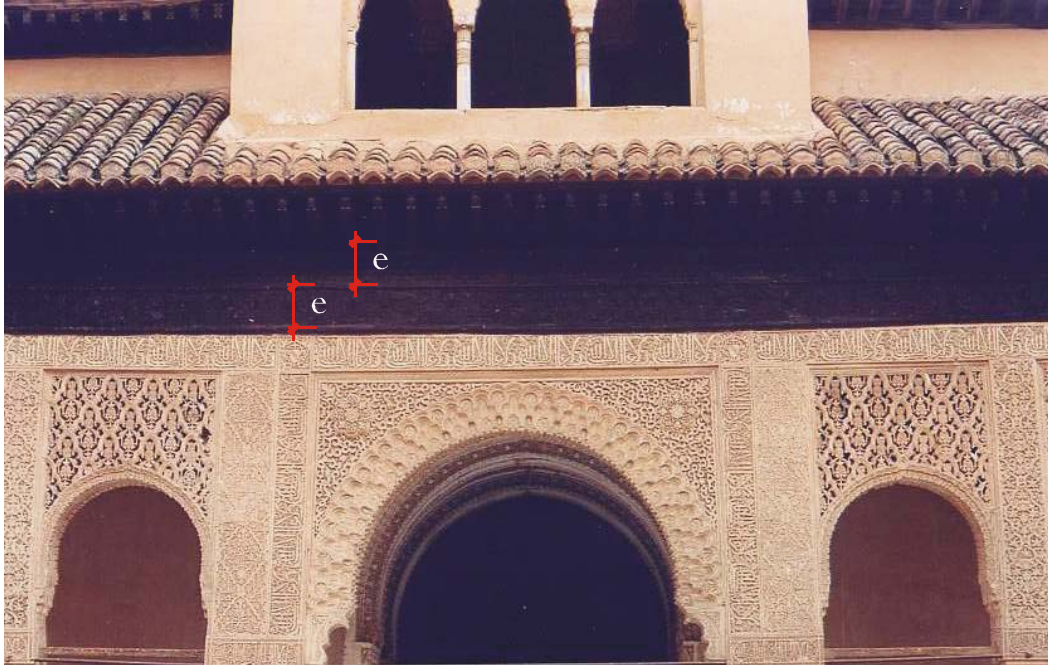


Figura 3.18. Revestimiento en madera dispuesto en el adintelado de fachada como tratamiento constructivo para ocultar la discontinuidad que provocan los forjados de galería y alero.

De las deducciones anteriores procedemos a la comprobación del funcionamiento estructural de los elementos descritos:

Evaluación del momento flector máximo que soporta el dintel continuo de longitud  $L = 3,45$  m.

Representando por “q” la carga total por metro cuadrado de forjado que se transmite al dintel a través de las viguetas, el momento flector máximo que soporta el dintel por este concepto es:

$$M_{\max} = q \left( \frac{2,20}{2} \right) \frac{1}{8} \left( \frac{3,45}{2} \right)^2 = 0,409 q \quad (3.1)$$



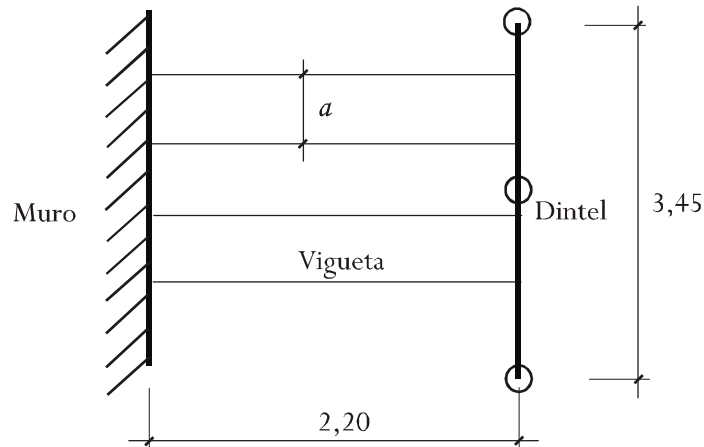


Figura 3.19. Representación gráfica del esquema de forjado existente en las galerías del Patio de los Leones.

Separación máxima entre viguetas de longitud  $L=3,45$  m.

Momento flector máximo que solicita a una vigueta siendo “q” la carga total por metro cuadrado de forjado:

$$M_{V_{\max}} = q \times a \frac{1}{8} (2,20)^2 = 0,605 q \cdot a \quad (3.2)$$

Igualando los dos valores de máximo momento flector, se tiene:

$$0,409q = 0,605q \times a \rightarrow a = 0,409/0,605 = 0,68 \text{ metros} \quad (3.3)$$

La hipótesis de igual esquadría resistente del dintel y de la vigueta implica que la separación entre viguetas debe resultar inferior a 68 centímetros.

Siendo tal separación bastante habitual en tipos de construcciones semejantes a la que nos ocupa, se procede a comprobar si la capacidad resistente de dos dinteles, dispuestos en paralelo y transversalmente a las galerías perimetrales de mayor longitud, resulta igual o superior al dintel continuo de dos vanos.

El momento flector máximo que solicita a la doble viga es:

$$M_{\max} = 1,72q \frac{1}{8} (2,20)^2 = 1,04q \quad (3.4)$$

El momento flector que soporta una sección del dintel es:

$$M_{D \text{ int}} = 0,409q + M_{\text{Cornisa}} \quad (3.5)$$

Como mínimo, el Momento flector que puede soportar la doble viga:

$$M_{\text{Doble}} = 2 \times (0,409q + M_{\text{Cornisa}}) = 0,818q + 2M_{\text{Cornisa}} \quad (3.6)$$

Para que  $M_{\text{Doble}}$  resulte igual o superior a  $1,04q$ , deberá verificarse:

$$0,818q + 2M_{\text{Cornisa}} \geq 1,04q \quad (3.7)$$

o lo que es lo mismo,

$$2M_{\text{Cornisa}} \geq 0,222q \quad (3.8)$$

Considerando que la carga total que transmite la cornisa del Patio puede resultar igual o superior al 80% de la carga total del forjado, si se denomina “v” al vuelo de la cornisa, se deberá verificar:

$$2 \times 0,8q \times v \times (1,72)^2 / 8 \geq 0,222q \quad (3.9)$$

y tal condición viene a establecer que

$$v \geq 0,30m \quad (3.10)$$

Tal condición se cumple por la cornisa existente y, en consecuencia, resulta absolutamente compatible con el contexto hipotético el sistema estructural que para las dos galerías de mayor longitud se describe en la Figura 3.20:

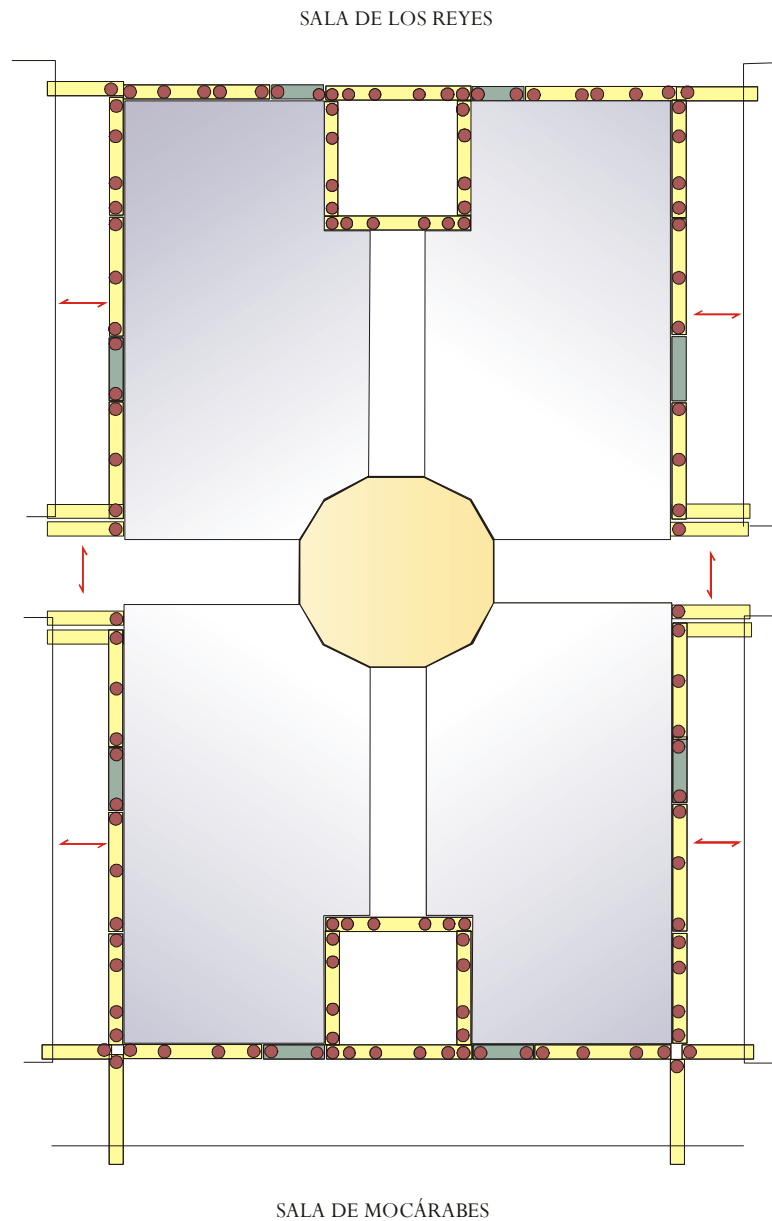


Figura 3.20. Organización estructural del forjado del techo de las galerías paralelas al lado mayor del perímetro del Patio de Los Leones.

En cuanto a las dos galerías paralelas al lado menor del perímetro del Patio, para que las hipótesis admitidas en el análisis estructural de las otras dos galerías puedan seguir siendo admitidas, dado que el ancho de aquellas es notablemente superior al de las que se acaban de analizar (3,45 m frente a 2,20 m), habrán de manifestarse algunas variaciones en los módulos establecidos en éstas: si el módulo longitudinal del dintel se conserva, el número de vanos sobre los que se tiende deberá aumentar. Si la distancia entre dos columnas consecutivas se conserva, el dintel no podrá encontrarse sobre éstas columnas, sino que deberá estar dispuesto en la dirección transversal.

En la galería que se desarrolla por delante de la Sala de los Reyes, el módulo del dintel conserva los dos vanos, pero, en efecto, su longitud es sensiblemente menor que el de las galerías de mayor longitud.

En la galería que se desarrolla por delante de la Sala de Mocárabes, el módulo longitudinal del dintel se conserva, lo que debe conllevar notables diferencias en relación con las características de las galerías más largas.

Así es, en un caso, para el dintel de 3,45 m se han dispuesto dos apoyos intermedios, es decir se ha pasado de dos a tres vanos. En cuanto al dintel de 1,70 m de longitud se supone que se habrá modificado la dirección de las viguetas del forjado, disponiendo dobles vigas perpendiculares al lado corto del perímetro del Patio. Este último supuesto queda recogido en la Figura 3.21.

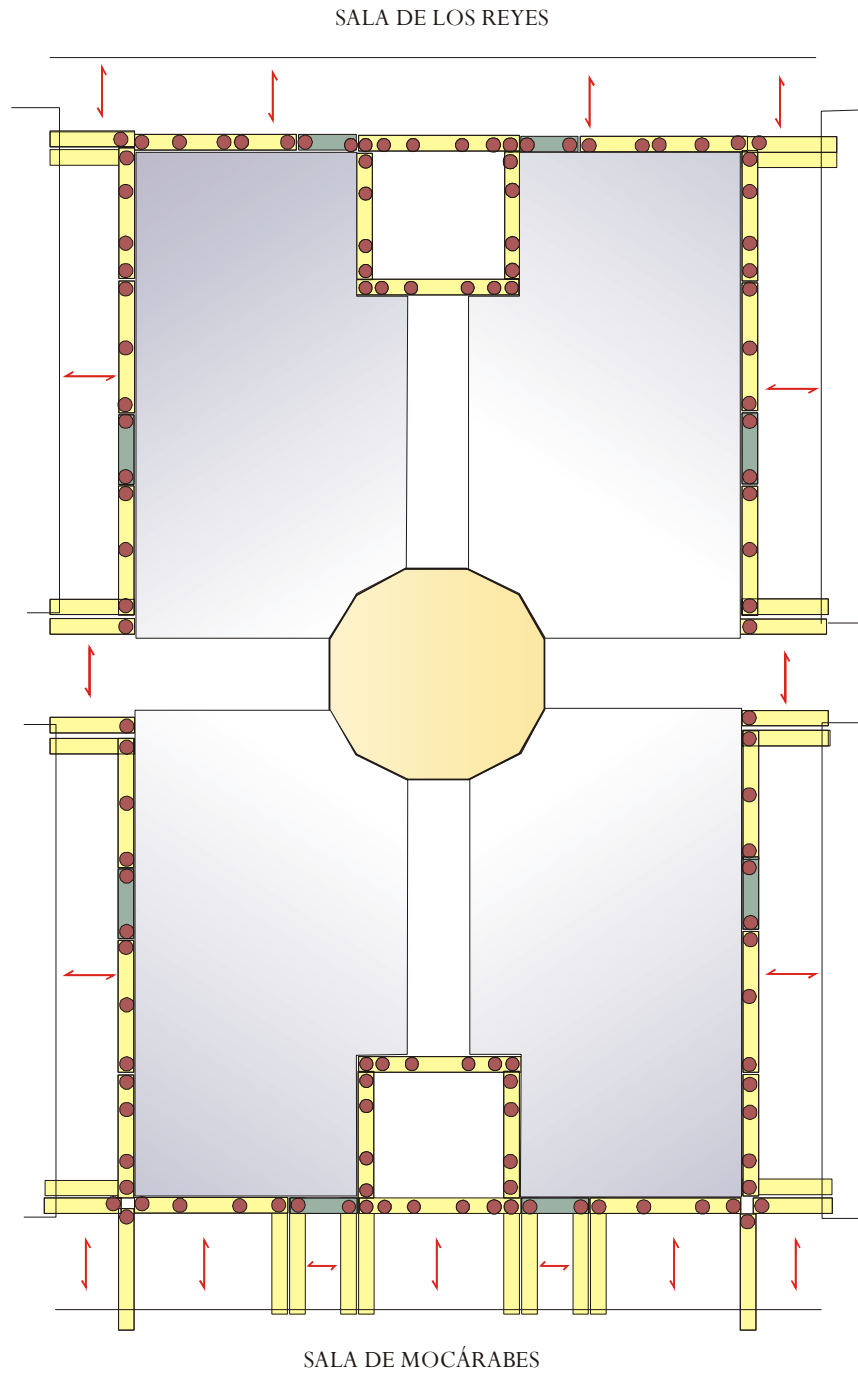


Figura 3.21. Disposición de vigas dobles en la galería que discurre por delante de la Sala de Mocárabes.

En una inspección efectuada a tal efecto, se comprueba que en los lugares en los que se ha supuesto la existencia de vigas dobles, se encuentran dispuestas unas fábricas que, a modo de dinteles revestidos del mismo decorado de yeso que se encuentra en los demás paños, enlazan transversalmente la fachada perimetral del Patio con el muro paralelo que se alza en la parte interior de la galería.

En cuanto al ritmo de las series de columnas que se encuentran en estas dos galerías, se observa que obedece a la distribución de los huecos en los muros a los que se enfrentan, tal como se muestra en la Figura 3.22:

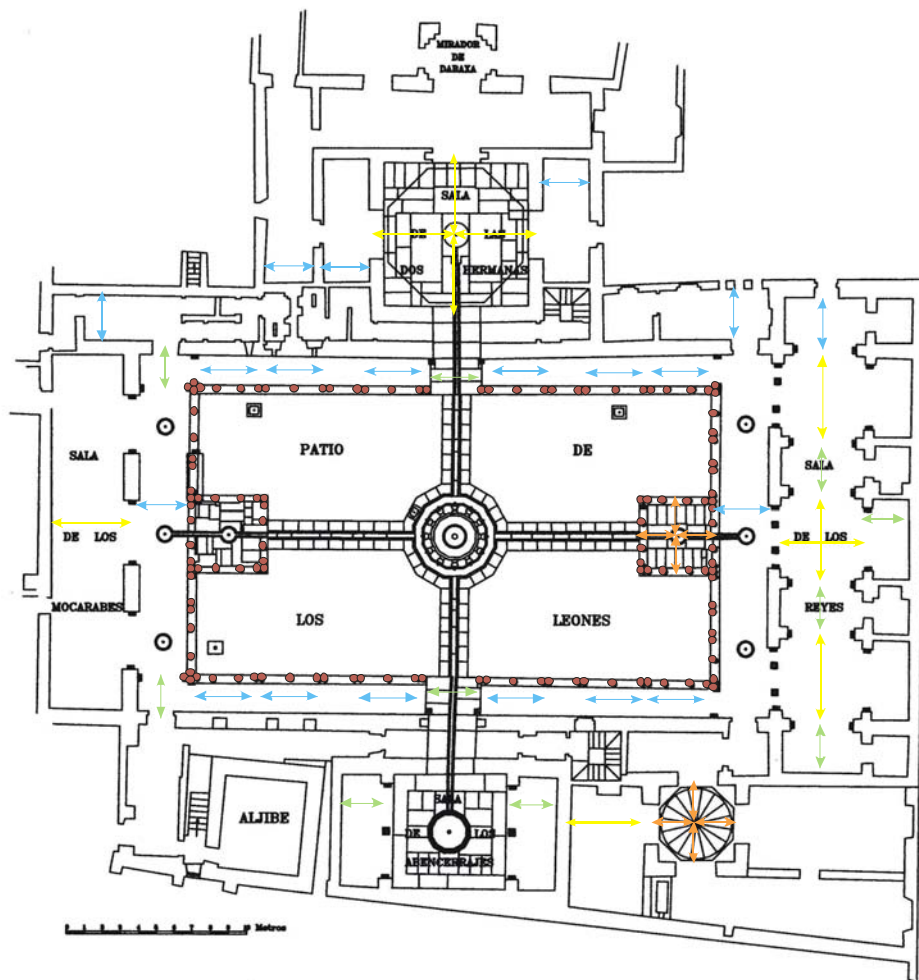


Figura 3.22. Correspondencia de dimensionado para los distintos elementos que componen la estructura del Patio de los Leones (columnas, muros, templetos, etc.).

### TEMPLETES

El sistema constructivo adoptado es idéntico al del resto de la galería perimetral del Patio. La diferencia se encuentra en la concepción estructural de estos elementos arquitectónicos. Conociendo sus diseñadores el efecto mecánico de las cúpulas sobre las fábricas en las que se apoyan, deciden contrarrestarlo en la cubierta de los dos templetes disponiendo un marco horizontal de madera para que funcione como anillo perimetral de tracción que, soportando la componente horizontal de los empujes de la cubierta, transmita a las pilastras de ladrillo, y estas a las columnas, la componente vertical de dichos empujes.

En las Figuras 3.23 y 3.24 se representa la disposición de las columnas y la planta y sección del templete oeste respectivamente.

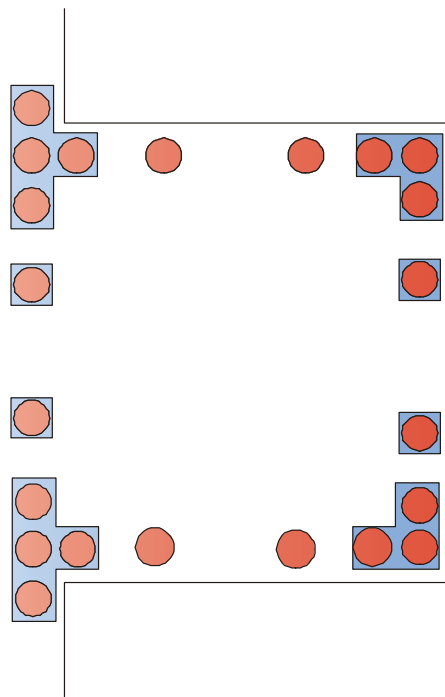


Figura 3.23. Disposición de columnas en el templete oeste donde se muestran los agrupamientos existentes en esta zona de 1, 3 y 4 elementos.

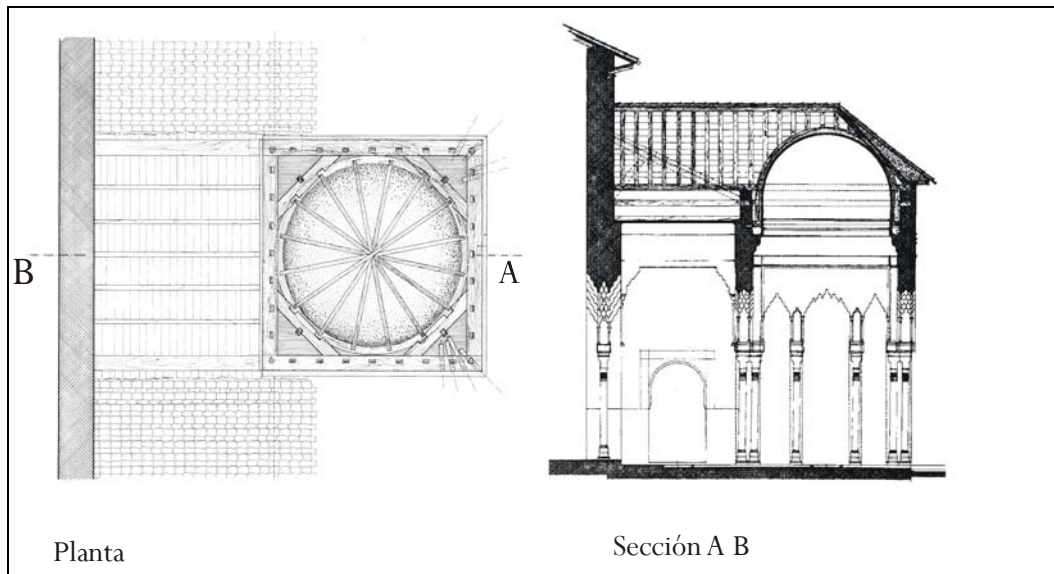


Figura 3.24. Planta y sección del templete oeste (Sala de Mocárabes). Tomados de los Planos n° nuevo 2.557 y 2.558 respectivamente de la Sección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo Central del Patronato de la Alhambra.

A continuación se propone un esquema gráfico con el que se pretende describir el sistema mecánico completo de la estructura de los templetos que se acaba de comentar (Figura 3.25).

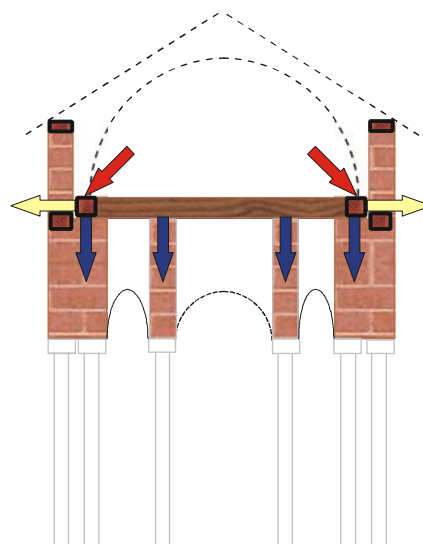


Figura 3.25. Modelo de circulación de las cargas en los templetos.



**ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DE LAS COLUMNAS FRENTE A LA SOLICITACIÓN POR COMPRESIÓN***Solicitud por compresión*

Valor mínimo de la carga de rotura: 129 kN (valor mínimo obtenido en los ensayos de determinación de módulo elástico para el material no sometido a ciclos).

Superficie de la sección transversal de la probeta:  $25 \text{ cm}^2 = 2.500 \text{ mm}^2$ .

Valor mínimo de la tensión de rotura:

$$\sigma_{\min} = \frac{129.000}{2.500} = 51,6 \text{ N/mm}^2 \quad (3.11)$$

Suponiendo características mecánicas análogas de ambos tipos de mármoles (probetas y columnas), la capacidad mínima a la compresión simple de una columna:

$$N_{\max} = 8.100 \times \pi \times 51,6 = 1.313,06 \text{ kN} = 131,3 \text{ T} \quad (3.12)$$

Este resultado viene a indicar que la seguridad estructural de las columnas, frente al esfuerzo de compresión simple, es extraordinariamente elevada pese a su aparente endeblez.

*Evaluación de la carga soportada por las columnas*

Adoptando los pesos que para distintas fábricas propone la Norma Básica de la Edificación AE-88 “Acciones en la Edificación”, se obtiene la carga general y la que soporta cada columna (Tablas 3.1 y 3.2).

*Tabla 3.1. Determinación del peso de los elementos que cargan sobre las columnas*

Peso del m <sup>2</sup> de cubrición a base de teja curva pesada	60 Kp/m <sup>2</sup>
Peso del m <sup>2</sup> de entablado para apoyo de la teja	40 Kp/m <sup>2</sup>
Peso del m <sup>2</sup> de forjado a base de viguetas de madera incluyendo enlistonado y tabla	90 Kp/m <sup>2</sup>
Sobrecarga de nieve	80 Kp/m <sup>2</sup>
<b>PESO TOTAL</b>	<b>270 Kp/m<sup>2</sup></b>

Estimando en 4,00 m<sup>2</sup> el ámbito de carga de una columna, la carga soportada por los conceptos que se acaban de describir es:

*Tabla 3.2. Determinación de la carga que soportan las columnas*

Pesos de Cubierta ; 4,00 m <sup>2</sup> 270 Kp/m <sup>2</sup>	1.080 Kp
Peso de la fábrica de ladrillo macizo en pilastra	105 Kp
Peso de revestimientos en techos y pilastras	300 Kp
<b>CARGA TOTAL POR COLUMNA</b>	<b>1.485 Kp</b>

Esto supone para  $N_{\max} = 1,485T$  una carga de 0,58 MPa para cada columna.

La comprobación exacta de los posibles desplomes o excentricidades es difícil dado que los elementos que cargan sobre las columnas están ocultos por yeserías y otros elementos decorativos. No obstante son perceptibles algunos desplomes (las yeserías aparecen deformadas o forzada su posición por una pérdida de verticalidad). Esto hace necesario el cálculo o comprobación de la incidencia de la excentricidad en el comportamiento del material de las columnas (Figura 3.26).

#### *Solicitud por compresión excéntrica*

Núcleo central de inercia de la sección circular:

Radio de giro de la sección circular:

$$i^2 = I/\Omega = \pi \times r^4 / 4 / \pi \times r^2 = r^2 / 4 \quad (3.13)$$

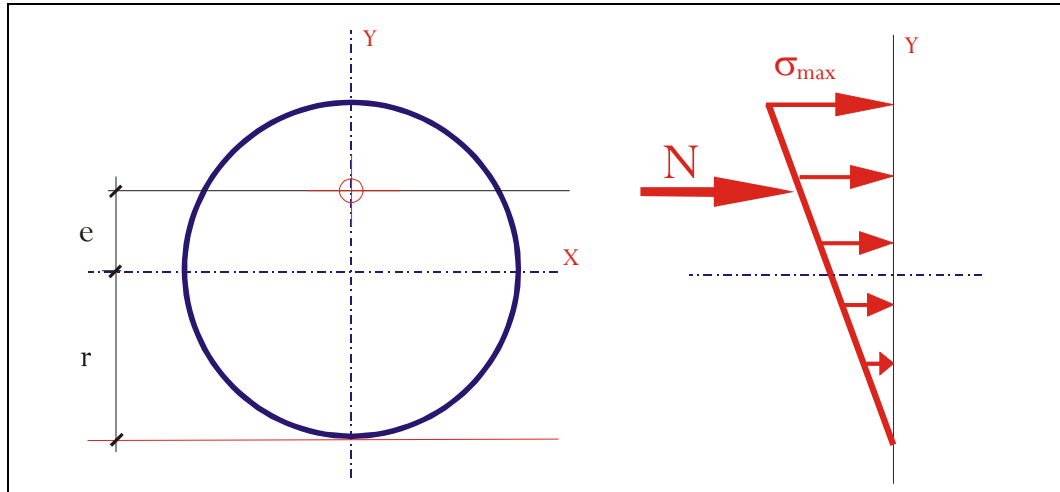


Figura 3.26. Esquema de distribución de tensiones normales en la sección, cuando la carga se sitúa en el perímetro del núcleo central de inercia.

$$i^2 = e \times r \quad (3.14)$$

Luego  $r^2/4 = e \times r$ , lo que implica  $e = r/4$

El núcleo central de inercia de una sección circular de radio “r” es un círculo de radio “r/4”.

Para la columnata del Patio de los Leones, adoptando un valor medio del radio de las secciones de las columnas igual a 9 cm, el núcleo central de inercia que les corresponde es un círculo de 2,25 cm de radio.

La resultante de las tensiones de compresión en el caso de que la carga actúe en el contorno del núcleo central de inercia debe ser:

$$V = \frac{1}{2} \times \pi \times r^2 \times \sigma_{\max} \quad (3.15)$$

De donde se obtiene el valor máximo de la carga axil que puede soportar cada una de las columnas con una excentricidad de 2,25 cm:

$$N_{\max} = \frac{1}{2} \times \pi \times r^2 \times \sigma_{\max} = \frac{1}{2} \times \pi \times (90^2) \times 51,6 = 656.530N = 656,5kN = 65,6T \quad (3.16)$$

Esto equivale a decir que, siempre que la carga actúe sobre el núcleo central de la columna y su magnitud resulte igual o menor que 65,6 toneladas, el mármol que las constituye no experimentará tensiones internas de tracción y, por consiguiente, no podrá encontrarse fisurado por sollicitaciones externas puramente mecánicas.

Veamos a continuación los valores máximos de la carga que puede soportar la columna de mármol de 18 cm de diámetro para excentricidades superiores a 2,25 cm y bajo la hipótesis de resistencia nula a tracción para el mármol que la constituye (Figura 3.27):

$$e \geq r/4 :$$

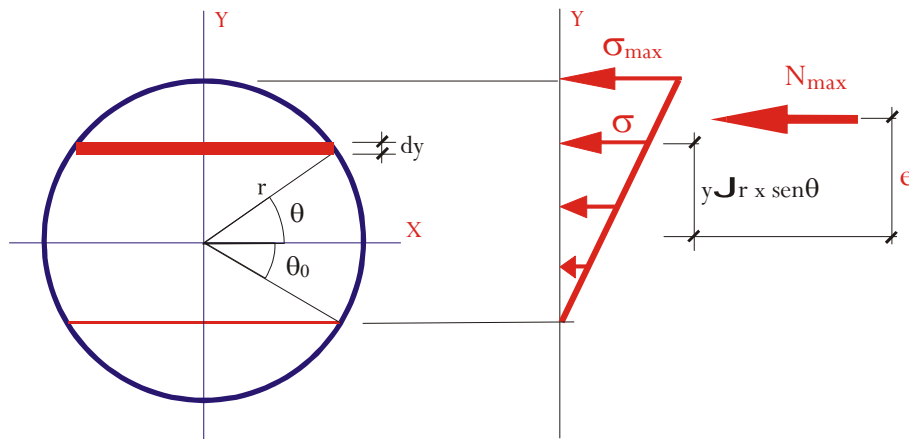


Figura 3.27. Esquema de distribución de tensiones normales en la sección, cuando la carga se sitúa fuera del perímetro del núcleo central de inercia.

$$\frac{\sigma}{y - r \times \text{sen} \theta_0} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{r - r \times \text{sen} \theta_0} \Rightarrow \sigma = \frac{\sigma_{\text{max}}}{r - r \times \text{sen} \theta_0} \times (y - r \times \text{sen} \theta_0) \quad (3.17)$$

Siendo  $y = r \times \text{sen} \theta$ , se tendrá :

$$\begin{aligned}
 N_{\max} &= \frac{\sigma}{r \times (1 - \operatorname{sen} \theta_0)} \int_{\theta_0}^{\pi/2} 2 \times r \times \cos \theta \times r (\operatorname{sen} \theta - \operatorname{sen} \theta_0) \times r \times \cos \theta \times d\theta = \\
 &= \frac{2 \times r^2}{1 - \operatorname{sen} \theta_0} \times \sigma_{\max} \left[ \frac{\cos^3 \theta_0}{3} - \frac{1}{2} \times \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \times \operatorname{sen} \theta_0 + \frac{1}{4} \operatorname{sen} \theta_0 \times \operatorname{sen} 2\theta_0 \right] \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

Representación gráfica de la función (Figura 3.28 y 3.29):

$$n = \frac{1}{1 - \operatorname{sen} \theta_0} \times \left[ \frac{\cos^3 \theta_0}{3} - \frac{1}{2} \times \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \times \operatorname{sen} \theta_0 + \frac{1}{4} \operatorname{sen} \theta_0 \times \operatorname{sen} 2\theta_0 \right] \quad (3.19)$$

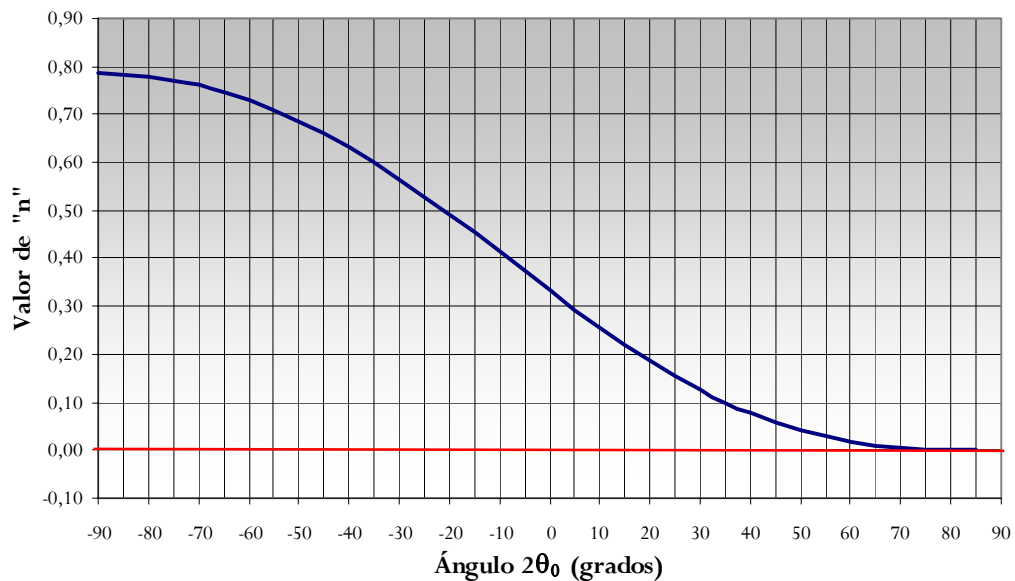


Figura 3.28. Representación gráfica de la variación del esfuerzo máximo con la excentricidad del mismo ( $\theta_0$ ).

Según lo anterior:

$$N_{\max} = (2 \times 8.100 \times 51,6) \times n = (835.920 \times n) \times N = (83,59 \times n) \text{Toneladas} \quad (3.20)$$

Análogamente, el momento de estas tensiones, respecto al eje “X”, será:

$$M_x = \frac{\sigma_{\max}}{r \times (1 - \text{sen} \theta_0)} \int_{\theta_0}^{\pi/2} 2 \times r \times \cos \theta \times r (\text{sen} \theta - \text{sen} \theta_0) \times r \times \text{sen} \theta \times r \times \cos \theta \times d\theta =$$

$$= \frac{2 \times r^3}{1 - \text{sen} \theta_0} \times \sigma_{\max} \left[ \frac{1}{8} \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 + \frac{\text{sen} 4\theta_0}{4} \right) - \frac{\text{sen} \theta_0}{3} \times \cos^3 \theta_0 \right] \quad (3.21)$$

Representación gráfica de la función (Figura 3.30)

$$m = \frac{1}{1 - \text{sen} \theta_0} \times \left[ \frac{1}{8} \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 + \frac{\text{sen} 4\theta_0}{4} \right) - \frac{\text{sen} \theta_0}{3} \times \cos^3 \theta_0 \right] \quad (3.22)$$

$$M_{\max} = (2 \times 729.000 \times 51,6) \times m = (75.232.800 \times m) \times N \cdot mm = (7,52 \times m) \text{Toneladas} \quad (3.23)$$

Excentricidad de carga:

$$e = M_{\max} / N_{\max} = (7,52 \times m) / (83,59 \times n) = 9 \times (m/n) \text{ cm} \quad (3.24)$$

En cuanto al esfuerzo axil estimado en las columnas  $N_{\max} = 1,485T$ , según se ha visto antes, se tiene  $n = 1,485/83,59 = 0,0178$ .

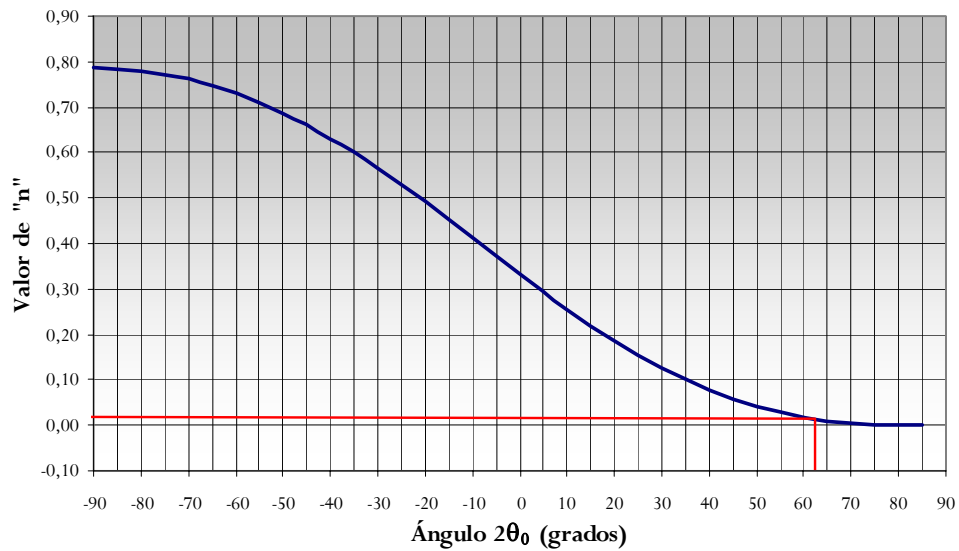


Figura 3.29. Representación gráfica de la variación del esfuerzo máximo con la excentricidad del mismo ( $\theta_0$ ) para el cálculo realizado.

A este valor de "n" le corresponde otro de  $\theta_0 = 62,5^\circ$  y, a este, le corresponde otro de "m":

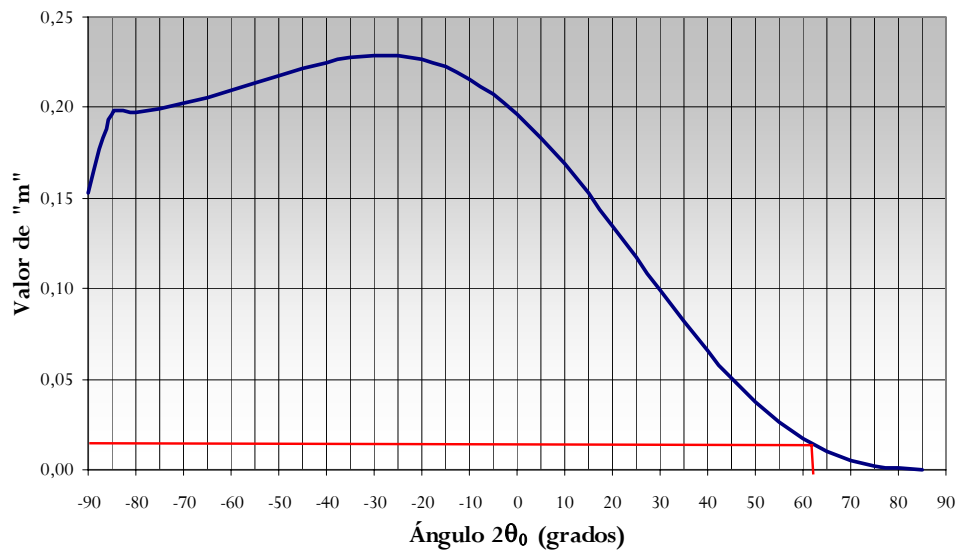


Figura 3.30. Representación gráfica de la variación del momento máximo con la excentricidad del mismo ( $\theta_0$ ) para el cálculo realizado.

$$m = 0,015 \quad (3.25)$$

Para éstos valores de “m” y “n”, según se ha expuesto antes, se tiene el siguiente valor de la excentricidad de carga:

$$e = 9 \times (0,015/0,0178) = 7,58 \text{ cm} \quad (3.26)$$

Este valor representa el de la máxima excentricidad de la carga para la que es posible el equilibrio de la columna cargada con 1,485 T.

Adoptando un coeficiente de seguridad “ $\gamma_s$ ” igual a 3, la máxima tensión admisible a compresión resulta ser  $51,6/3 = 17,20 \text{ N/mm}^2$ . En estas condiciones, resulta:

$$n = 14.850/(2 \times 8.100 \times 17,20) = 0,053 \Rightarrow \theta_0 = 49^\circ \Rightarrow m = 0,044 \quad (3.27)$$

$$e = 9 \times (0,044/0,053) = 7,47 \text{ cm} \quad (3.28)$$

Este último valor es el de la máxima excentricidad de la carga compatible con el equilibrio estable de la columna cargada con 1,485 T y con coeficiente de seguridad igual a 3.

De los cálculos y resultados expuestos puede concluirse que:

Dada la escasa resistencia a tracción del mármol que constituye las columnas, cuando la excentricidad de la carga sea superior al radio del núcleo central de inercia de la sección ( $r/4$ ) aparecerán fisuras en el material, que se desarrollarán progresando desde la superficie de la columna más alejada de la línea de acción de la carga hacia el interior de la columna. Esto implica que para excentricidades de la carga (desplomes) superiores a 2,25 cm, se puede producir fisuración en el mármol de las columnas.

Así mismo adoptando un coeficiente de seguridad igual a 3, la máxima excentricidad (desplome) admisible por razones de equilibrio estable es 7,47 cm.



---

**4 EL MÁRMOL DE  
MACAEL.  
ASPECTOS  
GEOLOGICOS**

**ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS LEONES.  
INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE DETERIORO**

---

# 4 EL MÁRMOL DE MACAEL. ASPECTOS GEOLÓGICOS

## 4.1. INTRODUCCIÓN

Partiendo de una perspectiva histórica, los primeros estudios arqueológicos donde aparece este tipo de material, indican que la extracción y uso del mármol de Macael se remonta al menos hasta el siglo V a.C.; así lo indica el sarcófago fenicio elaborado en mármol de Macael y hallado en la provincia de Cádiz. Hallazgos posteriores fundamentalmente de época romana en forma de esculturas, monumentos y obras de carácter funerario, militar o público, y su difusión espacial (Sagunto, Itálica, etc.) indican el prestigio, fuerte demanda y expansión geográfica de este apreciado mármol.

No obstante, es en la época musulmana española cuando puede hablarse de una explotación planificada y continua, además de la consolidación y divulgación de las excelentes cualidades técnicas y estéticas de este material. En efecto, a partir de esta época el mármol de Macael es comercializado con la denominación de “Al-

maluki” (El Real), y es empleado en obras monumentales como Medina-Azahara (Córdoba), los Palacios de la Alhambra en Granada, e incluso exportado a lugares tan remotos como Nigeria.

Aún siendo varias las referencias que confirman el uso del mármol de Macael en los Palacios Árabes de la Alhambra (Pastor Medina, 1990; Carretero Gómez, 1991, 1995; Castillo Fernández, 1998), el nivel de explotación que tuvieron las famosas canteras antes de la conquista del reino nazarí es verdaderamente desconocido. Sin embargo, sí se sabe de la continua actividad que los árabes impulsaron en la explotación de las canteras, incluso de la “creación de una incipiente industria que abarca desde el siglo X al XV” (Carretero Gómez, 1991). Tras la reconquista del Reino de Granada se vio potenciada su producción, de hecho “según la tradición, durante las reformas realizadas en la Alhambra en el año 1505 se colocaron las dos enormes losas de mármol de Macael que dan nombre a la *Sala de las Dos Hermanas* o de las *Losas* como se la conocía en el siglo XVI” (Castillo Fernández, 1998).

La reciente condición de reino cristiano y castellano, así como los cambios religiosos, económicos y políticos de las poblaciones del Reino de Granada obligan a una remodelación arquitectónica, por otra parte necesaria, que provoca gran demanda de mármol de Macael. Éste será utilizado en infinidad de iglesias, monasterios, palacios y todo tipo de obras públicas que se realizaron a lo largo del siglo XVI. Sin duda, en esta nueva etapa, se mantiene como destino principal del mármol de Macael la antigua capital nazarí, y será en gran parte del siglo XVI cuando las reformas realizadas en la Alhambra utilicen de nuevo este material como elemento constructivo y decorativo.

Otras grandes construcciones de la época e incluso posteriores, realizadas por los monarcas cristianos como el Palacio de Carlos V, la Capilla Real, el Hospital Real, San Jerónimo, etc., destacan también por el uso de mármol de Macael fundamentalmente en solados y zócalos.

Otros edificios singulares en los cuales se utilizó este tipo de mármol son la Mezquita de Córdoba, la Catedral de Jaén, el Monasterio de San Lorenzo el Real y el Palacio Real de Madrid entre otros.

## 4.2. MARCO GEOGRÁFICO

Bajo la denominación genérica de Comarca de Macael se incluyen una serie de localidades cuyo núcleo central se sitúa en la Villa de Macael, que debe su fama a que en ella se ubican históricamente las canteras del mármol que llevan su nombre. La comarca se sitúa en la zona norte de la provincia de Almería, en la vertiente nororiental de la sierra de Filabres y limitada al norte por el cauce del río Almanzora.

Si nos centramos en la ubicación de las canteras, durante la época musulmana se situaban aproximadamente entre los parajes hoy conocidos como “La Puntilla” y el “Barranco de la Currita” en el sitio de “los Horcajos”. Eran conocidas antiguamente como “canteras de Filabres” y estaban situadas junto al pago de Alcudia (en árabe “el cerro”). El pago de Alcudia se encontraba cercano al Río del Gar (hoy Rambla de la Orica) y colindante con varios secanos, un pinar y con los caminos que iban a Chercos y ascendían a la Sierra de Filabres. La distancia de las canteras al pueblo, que era de aproximadamente media legua (casi tres kms.) avala esta hipótesis (Castillo Fernández, 1998).

En cuanto a la ubicación de la cantera de la que se extrajo el material utilizado para el presente estudio, hay que comentar que se encuentra escasamente a 1500 m al sur de la población de Macael, en el paraje conocido como Umbría de las Canteras, al este del Barranco del Marchal (Figura 4.1). Se trata de una de las canteras más antiguas de la comarca, conocida como Cantera La Umbría y explotada por Mármoles José Fernández, en la que durante años se ha extraído mármol de varios afloramientos o bancadas actualmente desaparecidas o colgadas en pequeños retazos de escaso espesor, visibles en cortes antiguos (Figura 4.2). Las tres bancadas por orden de antigüedad son: La Puntilla, La Reina y La Umbría de la Pila, aunque tan sólo de esta última se continúe extrayendo material.

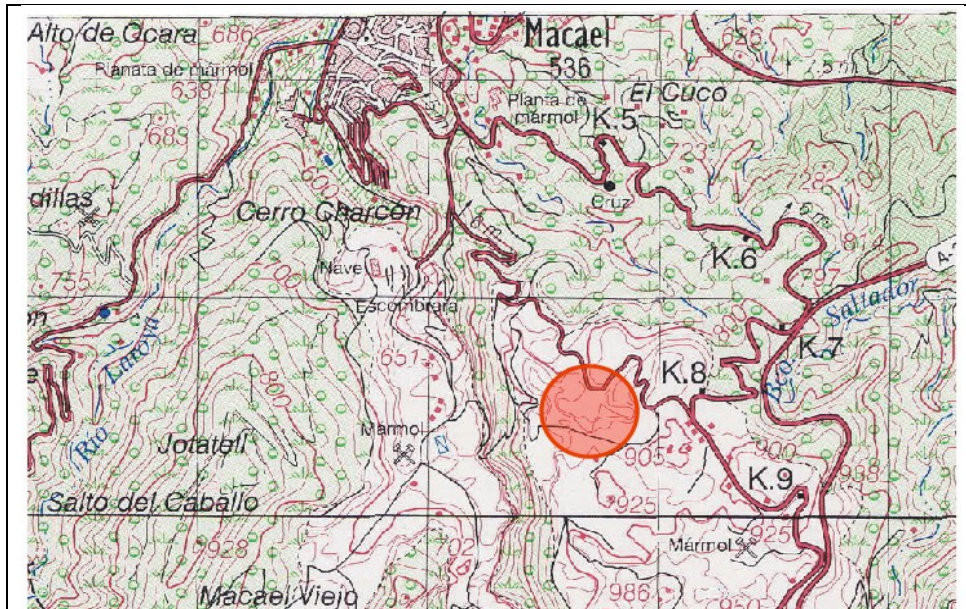
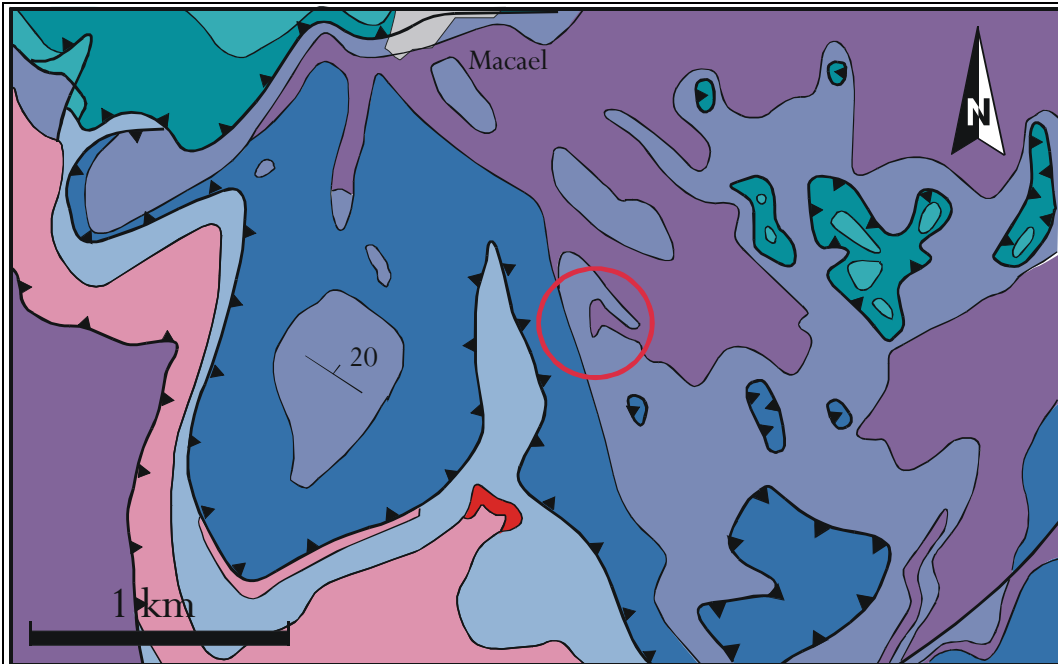


Figura 4.1. Plano topográfico zona de Macael (escala inicial 1:25.000), con ubicación de la cantera de la que se extrajo el material.



Figura 4.2. Vista de la cantera “La Umbria” de la que se extrajo el material utilizado en el presente trabajo.

### 4.3. MARCO GEOLÓGICO



#### COMPLEJO NEVADO-FILÁBRIDE

Trias	sup.	3	
	medio		
	inf.	2	
Pérmico			
Precámbrico		1	

#### COMPLEJO ALPUJÁRRIDE

Trias	5
Pérmico	4

1. Micaesquistos grafitosos con granate, cuarcitas, rocas carbonatadas y esquistos calcáreos.
2. Micaesquistos con albita, gneises albiticos, cuarcitas y rocas carbonatadas en la parte superior.
3. Rocas carbonatadas.
  - a. Rocas carbonatadas.
  - b. Micaesquistos con granates, cuarcitas y micaesquistos calcáreos.
4. Filitas y cuarcitas, en la parte superior intercalaciones de rocas carbonatadas y yesos.
5. Rocas carbonatadas y brechas tectónicas.

Figura 4.3. Mapa geológico tomado del original a escala 1:50.000. MAGNA. Hoja nº 1013 de Macael. IGME (1975).

Desde el punto de vista geológico, la Comarca de Macael se encuentra ubicada en la Sierra de Filabres, en la parte centro-oriental de las cordilleras Béticas, más concretamente en la denominada Zona Interna Bética (Figura 4.3). La estructura de esta zona es el resultado de diversos cabalgamientos que han dado lugar a tres complejos tectónicos, los cuales en orden ascendente son: el Nevado-Filábride, el Alpujarride y el Maláguide. En la Sierra de los Filabres también existe un cuarto complejo, el complejo Ballabona-Cucharón, que se encuentra intercalado entre los complejos Nevado-Filábride y superiores. Los mármoles de Macael se localizan dentro del primer complejo: el Nevado-Filábride. Dentro de este, a su vez, se desarrollan diferentes unidades que han sufrido en general procesos de metamorfismo de bajo gradiente térmico y alta presión, seguido por otros de gradientes térmicos más altos. Tanto el metamorfismo como las deformaciones posteriores que han experimentado son de edad alpina. Las unidades geológicas en las que se encuentran las canteras de mármol son: la Nevado-Lubrín y Bedar-Macael, que engloban a su vez dos tipos diferentes de formaciones: la Formación Huertecica y la Formación Las Casas, siendo esta última a la que pertenecen las canteras de Mármol de Macael (IGME, 1975).

El material característico de esta formación son las rocas carbonatadas de edad Triásico superior, aunque a veces aparecen alternancias de estas rocas carbonatadas con micasquistos, micasquistos calcáreos, micasquistos cuarcíticos con granate y micasquistos cuarcíticos con anfíbol.

Por regla general, en esta formación se distinguen dos secuencias litológicas: una compuesta en su mayoría por rocas carbonatadas y la otra por esquistos cuarcíticos. Desde un punto de vista estratigráfico, las rocas carbonatadas se encuentran predominantemente en la parte más alta y más baja de la formación, siendo frecuentes los niveles pelíticos en la zona central.

Las rocas carbonatadas, entre las cuales se incluyen los afloramientos de mármol descritos, muestran colores blancos, azules, amarillos y marrón oscuro. Podemos encontrarnos desde un mármol muy blanco y de alta cristalización hasta una caliza terrígena amarillenta que se asemeja a una calcarenita, y entre estos dos extremos, toda una variedad de rocas carbonatadas (mármoles con intercalaciones milimétricas de micas, calizas ferruginosas, calizas bien cristalizadas de un color amarillo intenso, etc.).



La mineralogía de estos carbonatos es bastante simple. Las variedades blancas y amarillas constan casi exclusivamente de minerales carbonatados gruesos, con alguna mica blanca, albita, cuarzo y ocasionalmente pirita visible. Las variedades azul y negra contienen además, minerales metálicos finamente dispersos, biotita, zoisita, epidota, titanita, tremolita y anfíboles verde-azulados.

Las rocas de la Formación Las Casas aparecen intensamente replegadas. La esquistosidad en las rocas pelíticas está fuertemente desarrollada y es frecuente el microplegamiento, siendo el espesor máximo visible de aproximadamente 600 metros.

# **5 MATERIALES Y MÉTODOS**





# 5 MATERIALES Y MÉTODOS

## 5.1. EL MATERIAL DE ESTUDIO

Como es obvio, la disponibilidad de material marmóreo procedente de las columnas ha sido escasa por no decir mínima. Se ha dispuesto de un número limitado de pequeñas esquirlas procedentes de la descamación que sufren algunas columnas; esto nos ha permitido su análisis químico y la elaboración de varias láminas delgadas. El grueso o la práctica totalidad de los ensayos se ha efectuado por tanto sobre material marmóreo procedente de las comentadas canteras.

### *MATERIAL DE CANTERA*

Inicialmente se obtuvieron bloques de 50x50x15 cm de los que posteriormente se obtuvieron probetas de 5x5x15 cm (75 probetas en total). Estas dimensiones se establecieron a fin de adecuarnos al mayor número posible de normalizaciones de los ensayos a aplicar. Las probetas se han cortado ajustando la dirección de los bandeados grisáceos del material a la máxima dimensión de las mismas y paralelos a una de las caras laterales. Hemos optado por denominar H a la

dirección según el eje longitudinal, F a la dirección perpendicular a H y paralela a los bandeado grisáceos, y L a la dirección perpendicular a los mismos.

Posteriormente las probetas se han clasificado en tres grupos según la abundancia de dicho bandeo. En el grupo A no es o apenas es perceptible el bandeo grisáceo; el grupo B presenta una densidad o abundancia media de bandeo y en el grupo C se han agrupado las probetas con mayor cantidad de bandeo gris (Figura 5.1).



*Figura 5.1. Detalle de los grupos de probetas establecidos: A (40a, ausencia de bandeo), B (22b, bandeo medio) y C (15c, bandeo abundante).*

## 5.2. CICLOS DE ENVEJECIMIENTO (ESTRÉS TÉRMICO)

Conocer la evolución de un material ante la acción de los agentes ambientales naturales y antrópicos a los que se encuentra expuesto es imprescindible tanto para evaluar su estado y perdurabilidad, como para acometer actuaciones restauradoras y de conservación. La investigación en este campo requiere de un conocimiento lo más exacto posible de estos agentes y factores, de manera que permitan su reproducción en ambientes controlados para evaluar su efecto sobre el material en estudio, antes y después de su tratamiento.

Uno de estos factores, y uno de los más determinantes, es el factor tiempo, que en muchos de los casos presentes supone siglos, e incluso frecuentemente milenios; algo que a escala humana no puede suplirse. En las actuales investigaciones se ha optado por elevar la intensidad o gradiente de los agentes actuantes (temperatura, humedad, concentración de gases contaminantes, concentración de soluciones salinas, ...), en la esperanza de que al menos en términos cualitativos los resultados que puedan obtenerse en un tiempo ciertamente reducido, puedan equipararse a los efectos en estos periodos mucho más prolongados. Es lo que constituye los “ensayos de envejecimiento acelerado”. La investigación en este campo es extensísima y continua dada su utilidad para catalogación de materiales y evaluación de productos y tratamientos. Entre los numerosísimos trabajos sobre la acción intensificada de los agentes comentados citamos a título de ejemplo los de Evans (1970), Cooper et al. (1977), Biscontin et al. (1981), Bertagnini et al. (1984), Franzini et al. (1984), Zezza et al. (1985), Goudie (1986), Arnold et al. (1989), Galán (1991), Galán et al. (1992), Rodríguez Navarro et al. (1993), Winkler (1996), Siegesmund et al. (2000).

Paralelamente, aunque con inicios más recientes, se viene desarrollando una línea de investigación basada en la observación directa y en tiempo real de la acción de los agentes presentes en un determinado microclima sobre un tipo de material (e.g. Tabasso, 1992; Urzi et al., 1994; Durán Suárez et al., 1996). Constituyen los denominados “ensayos o estudios de estación experimental ambiental”, que, lógicamente, requiere de un dilatado espacio de tiempo para que los datos acumulados sean representativos, y que no son planteables en el acotado tiempo de una Tesis Doctoral.

En nuestro caso, y como se desprende de los estudios previos sobre el estado del material de las columnas y los agentes ambientales que sobre ellas gravitan, el principal fenómeno de deterioro reside en una descamación continuada del mármol de las columnas en cuyo origen los gradientes térmicos a que la columnata está sujeta deben jugar un papel determinante.

A fin de poder evaluar el comportamiento del material de cantera en estas circunstancias, así como este efecto en conjunción con otros factores como son la acción de una carga o esfuerzo adicional, se someten probetas de material de cantera a ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Un total de 75 probetas de 15x5x5 cm de los tres tipos de material (A, B y C) han sido sometidas a ciclos de calentamiento (100 °C) y enfriamiento (-25 °C). Las muestras permanecieron 6 horas en horno, posteriormente 2 horas a temperatura ambiente; a continuación son introducidas en el frigorífico en el cual permanecen otras 6 horas, y tras permanecer 10 horas a temperatura ambiente son introducidas nuevamente en el horno.

Se han establecido tandas de 50, 100, 150 y 200 de estos ciclos con 5 muestras de los tres tipos en cada tanda.

Antes de iniciar los ciclos y tras cada tanda de 50, las probetas fueron pesadas y observado su estado físico, anotándose cualquier cambio observado en el mismo.

### 5.3. MICROSCOPIA ÓPTICO-PETROGRÁFICA

Mediante microscopía óptica de luz polarizada se ha abordado el estudio de las fases minerales presentes (mayoritarias y minoritarias), tanto en el material de cantera (probetas), como en el material procedente de las columnas, y su grado de alteración y posibles fases de neoformación. Así mismo se han obtenido datos sobre la orientación de los cristales de calcita en las probetas, y la evolución de este material de cantera una vez sometido a los respectivos ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Para los estudios mineralógicos, se han preparado láminas delgadas, tanto del material procedente de la descamación de las columnas del Patio, como del material de cantera desprovisto de bandeado gris por una parte, y con abundancia de dicho bandeado por otra sometidos en cada caso a los ciclos de calentamiento-enfriamiento establecidos (12 láminas de los grupos A y C).

Por lo que respecta al estudio óptico-petrográfico del material desprendido de las columnas, se han obtenido seis láminas delgadas de dicho material cortado perpendicularmente a la superficie de desprendimiento a fin de obtener una sección estratigráfica. Se trata de las láminas C/8-e, C/8-i, C/13-e, C/13-i, C/24-3 y C/24-4, pertenecientes a las columnas 8, 13 y 24 respectivamente.



Para los estudios de orientación cristalográfica se han preparado láminas del material tipo A con indicación en las mismas de las distintas direcciones de la probeta de procedencia (“orientadas”). Igualmente, y a fin de evaluar la evolución del material, se han obtenido láminas delgado-pulidas “estratigráficas” y “orientadas” de los tres tipos de probetas tras ser sometidas a los respectivos ciclos de calentamiento-enfriamiento. Se ha optado por no cubrir estas láminas delgado-pulidas para su posterior uso en microscopía electrónica.

Se ha utilizado un microscopio óptico de polarización con luz transmitida y reflejada Zeiss modelo Jenalab Pol.

Previamente, láminas y probetas fueron observadas con un microscopio binocular Wild M8 con fuente iluminante de “luz fría”.

#### *DIRECCIÓN DEL EJE C CRISTALOGRAFICO (PLATINA UNIVERSAL)*

La técnica denominada “Análisis Dinámico de Turner” (García Cuevas, 2000) es capaz de deducir las orientaciones de esfuerzos a partir de las medidas de macla y eje óptico del cristal con un microscopio dotado de una platina universal, para posteriormente proyectando las medidas estereográficamente construir diagramas de densidades de esfuerzos orientados responsables del maclado observado.

Los estudios sobre estructuras geológicas (microestructuras) han puesto de manifiesto la estrecha relación entre las orientaciones de estas microestructuras y sus deformaciones y las orientaciones cristalográficas y texturales de los minerales presentes en las mismas (Yuste et al., 1998).

Así, las referencias a los procesos de formación del mármol van directamente ligadas a deformaciones ocurridas en el propio yacimiento en la estructura geológica. El estudio de la petrofábrica nos permite por tanto conocer la tendencia deformacional del material marmóreo, sus orientaciones cristalográficas e incluso su comportamiento posterior para las distintas condiciones ambientales y físico-mecánicas a las que se vea expuesto una vez que es utilizada la roca como material de construcción.

Gran número de estudios de petrofábrica en mineralizaciones de calcita y mármoles con aplicaciones diversas como son el estudio de microestructuras, análisis de condiciones de formación, historia de deformaciones y estudio cinemático han conseguido una mejora, utilidad y fiabilidad en la determinación de la orientación del eje c de los cristales de calcita en la roca mediante microscopio petrográfico dotado de platina universal. Diversos trabajos realizados sobre material marmóreo ejemplifican la utilidad del método; son los realizados por Turner et al. (1976), Rowe

et al. (1990), García Cuevas (2000), Bestmann et al. (2000), Molli et al. (2000), Siegesmund et al. (2000), Pieri et al. (2001 a, b).

Por ello además de los estudios de análisis textural por difracción de rayos X, se ha recurrido al estudio de orientación del eje c mediante el uso de la platina universal, como técnica adicional que nos permita complementar o confirmar resultados.

Para estos estudios de orientación cristalográfica, (obtención de figuras de interferencia y dirección del eje c cristalográfico) se ha utilizado un microscopio petrográfico Leitz Dialux Pol dotado de platina universal Leitz de 4 ejes. El equipamiento citado pertenece al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada.

La platina universal es un complemento que, añadido a un microscopio petrográfico, permite realizar observaciones con cualquier orientación de la lámina. Está proyectada de tal manera que se puede inclinar el plano de una lámina delgada formando diversos ángulos con la platina del microscopio, y contiene una serie de círculos graduados que miden la posición angular de las secciones inclinadas (Figura 5.2). Este artificio ayuda en la determinación de la orientación del eje óptico, direcciones de pleocroismo, dispersión, comparación de los índices de refracción, así como también el estudio de las maclas, puesto que permite medir la orientación (dirección y buzamiento) del plano de macla, técnica que se emplea en el análisis de la orientación de cristales para la determinación de las llamadas petrofábricas.



*Fig. 5.2. Vista de microscopio con platina utilizado en la determinación de la orientación del eje  $c$  cristalográfico.*

La platina universal está sujeta con tornillos a la del microscopio y el portaobjetos descansa sobre una placa circular de cristal situada en el centro. (Figura 5.3). Existen dos hemisferios de cristal preparados para hacer visible la lámina delgada según diversos ángulos de inclinación. Uno de estos hemisferios se coloca por debajo de la lámina delgada y el otro por encima.

Para poder visualizar el interior de la lámina delgada se requiere el uso de unos objetivos especiales, debido a la superficie curva de los hemisferios y la colocación de unas gotas de aceite de cedro o glicerina por encima y por debajo de la lámina delgada.

Una platina universal ordinaria tiene cuatro ejes móviles. Existe un quinto eje, que es el del microscopio, que siempre va a permanecer en la misma posición vertical y al que se le suele conocer como eje Am. Los cuatro ejes móviles permanecen respectivamente perpendiculares a los cuatro círculos graduados sobre los que se efectúan las mediciones. A esos ejes móviles se les suele designar como OV (eje perpendicular al círculo exterior), IV (eje perpendicular al círculo interior), EO (eje

perpendicular al tambor circular) y NS (eje perpendicular a los arcos Wright), (Figura 5.3).

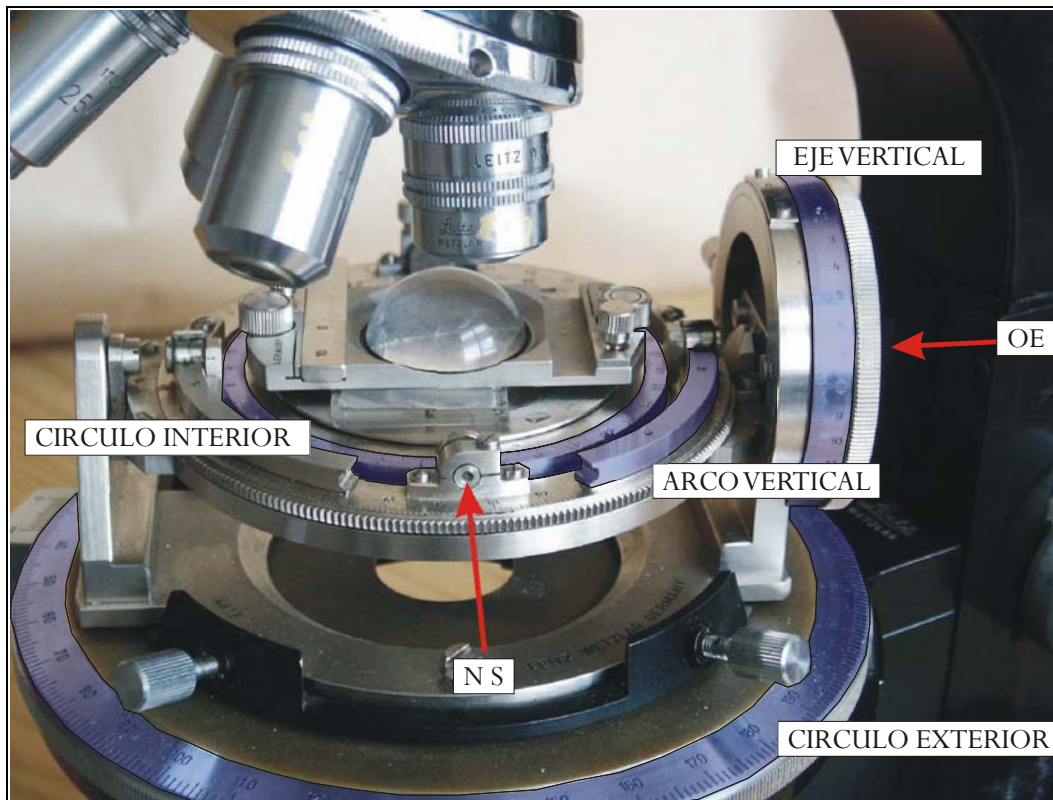


Figura 5.3. Esquema ilustrativo de la platina universal de cuatro ejes.

Cuando se coloca la platina con todos los círculos a cero, OV e IV son verticales, EO es horizontal (este-oeste) y NS es también horizontal (norte-sur).

El círculo exterior de la platina universal gira alrededor del eje OV, y en la posición cero permanece en un plano horizontal. Este círculo exterior no solamente es libre para girar alrededor de OV, sino que puede inclinarse a partir de la horizontal en cualquier dirección con respecto al eje EO. Los ángulos de inclinación se miden en un tambor graduado situado a un lado de la platina.

El círculo interior contiene el portaobjetos y los hemisferios, descansa en un plano horizontal en la posición cero y gira alrededor de IV. El círculo interior mide ángulos alrededor del eje IV; este círculo puede inclinarse girando sobre el eje NS. El ángulo de esta inclinación se mide en los dos arcos graduados de Wright.

Para nuestro caso se han utilizado tres láminas delgadas cortadas según cada una de las caras (100, 010, 001) del paralelepípedo probeta, y en las que se han especificado las diferentes direcciones de la misma.

La precisión y exactitud de la técnica es función del número de medidas o determinaciones por lámina. Estudios como los de Groshong et al., (1984), establecen como número mínimo el de 25 determinaciones para cada una de las dos direcciones perpendiculares de cada lámina delgada; en nuestro caso, para cada una de las láminas se ha efectuado la determinación de la dirección del eje *c* en 60 cristales.

## 5.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

En el campo del Patrimonio Histórico la microscopía electrónica de barrido constituye una poderosa herramienta ampliamente utilizada en a) la caracterización de los materiales constructivos y ornamentales de los monumentos, entre otros Peruzzi et al. (1984), Freestone et al. (1987), Stanley (1989), Bello (1992), Martín Calleja et al. (1992), Peris Martínez et al. (1992), Galán et al. (1999), Burlini et al. (2000), Capedri et al. (2001), Zhang et al. (2001), b) el diagnóstico de los procesos de deterioro de dichos materiales e.g. Rodríguez Navarro et al. (1992), Durán Suarez et al. (1993), Rodríguez Navarro (1994), Durán Suárez (1995), Cardell Fernández (1998), Royer-Carfagni (1999), Chabas et al. (2000), García-Guinea et al. (2000), Zhang et al. (2001), c) identificación de sustancias contaminantes en edificios de interés histórico artístico e.g. Badan et al. (1979), Lazzarini et al. (1979), Alaimo et al. (1986-1987), Moropoulou et al. (1998), d) estudio e identificación de pátinas e.g. García-Vallés et al. (1997), García-Vallés et al. (2000), Maravelaki-Kalaitzaki et al. (2001). Otras aplicaciones son la verificación de la efectividad de tratamientos o de la agresividad de determinados métodos de limpieza sobre materiales pétreos (Maravelaki et al., 1997; Durán Suárez et al., 1998; Aldrovandi et al., 2000; Lanterna et al., 2000; Sabatini et al., 2000; Klein et al., 2001; Esbert et al., 2002).

En esta Memoria la microscopía electrónica de barrido ha permitido el control del material pétreo sin ningún tipo de tratamiento, concretamente el estudio de la morfología y tamaño de los cristales de calcita así como otras cuestiones relacionadas con la porosidad, fisuración, bandeado, etc.; de igual modo y como ocurre en las restantes técnicas aplicadas se pretende además el estudio evolutivo del material una vez éste es sometido a los distintos ciclos de estrés térmico, para poder conocer de forma exhaustiva el comportamiento y la evolución que se produce en aspectos relativos a la descohesión intergranular, cambios o diferencias existentes entre las zonas externas e internas de las probetas, porosidad, fisuras, grietas, así como otras

modificaciones texturales que se pudieran producir durante la aplicación de los ciclos. Así mismo se comparará el estado del material desprendido de las columnas con el de las probetas de cantera.

Para el estudio se han empleado un total de 14 láminas delgado-pulidas (estratigráficas) obtenidas 10 de ellas de probetas (material procedente de cantera) tras diversos ciclos de calentamiento-enfriamiento, y 4 de material procedente de escamas desprendidas de las columnas 8 y 13. También se han estudiado fragmentos (“setas”) de material de probeta del grupo A, tras “0” y “200” ciclos, y de las columnas 13 y 17.

El equipo utilizado para la visualización y toma de fotografías ha sido un Zeiss DSM 950 equipado con un microanalizador Link QK 2000 perteneciente al Centro de Instrumentación Científica (C.I.C.) de la Universidad de Granada.

## 5.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X sobre muestras preparadas adecuadamente ha sido aplicada para:

Análisis de fases minerales presentes tanto en costras marmóreas desprendidas de las columnas del Patio como del material de cantera.

Establecimiento del “grado de cristalinidad” del material de cantera (probetas), y su posible variación tras someter el mismo a distintos ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Estudio y establecimiento de posibles orientaciones preferenciales de las direcciones o ejes cristalográficos de los cristales de calcita en el material de cantera (probetas).

### *ANÁLISIS MINERALÓGICO*

El análisis mineralógico se ha realizado mediante el método del polvo cristalino desorientado. Se han analizado muestras pertenecientes a los grupos A y C (bandeado imperceptible visualmente y bandeado abundante respectivamente) denominadas Blanca y Gris, de forma que pueda conocerse la variación compositiva de ambas zonas del material.

El procedimiento seguido ha consistido en la molienda de las muestras en un mortero de ágata hasta un tamaño menor de 0,053 mm (270 mallas A.S.T.M.). El

polvo obtenido se monta en un portamuestras de aluminio, procurando no ejercer demasiada presión que pueda orientar de forma preferente los cristales.

Se ha empleado un difractómetro Philips PW 1710 equipado con rendija automática, perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. El tratamiento de los datos, registro e interpretación de los diagramas se ha realizado mediante diversos programas informáticos (Nieto et al., 1989; Martín Ramos, 1990), fundamentalmente el denominado PLV Versión 2002. Las condiciones instrumentales son las registradas en la Tabla 5.1.

*Tabla 5.1. Condiciones instrumentales del difractómetro de Rayos X empleado en el análisis mineralógico.*

Radiación:	Cu K $\alpha$
Monocromador:	Grafito
Voltaje:	40 Kv
Registro:	Digital
Tiempo de integración:	0.4 s
Velocidad goniómetro:	1°-6° 2 $\theta$ /min
Zona explorada:	2° a 80° 2 $\theta$
Rendija:	Automática

### ÍNDICE DE CRISTALINIDAD

El estudio o consideración de la anchura de los haces de RX difractados por la materia cristalina puede proporcionar información sobre el grado de desarrollo-cristalinidad de los granos o cristales constituyentes del material cristalino. En un cristal perfecto las reflexiones o haces difractados del difractograma de RX deberían ser líneas de anchura mínima; el ensanchamiento de estas líneas indicaría una disminución de esta perfección cristalina, lo que explica que en el caso de materiales poco cristalinos o amorfos en lugar de “picos” los haces difractados aparezcan como “bandas”.

La expresión o fórmula de Scherrer (Klug & Alexander, 1954) proporciona el parámetro D o índice de cristalinidad, en el que además de la anchura del haz

difractado en cuestión ( $\beta$  en radianes) se tiene en cuenta la longitud de onda ( $\lambda$ ) del RX incidente, y el ángulo  $2\theta$  a que el haz difractado aparece.

$$D = \frac{\lambda \times K}{\beta \times \cos \theta} \quad (5.1)$$

K es una constante cuyo valor en nuestro caso es 1.

A fin de obtener un valor de anchura libre de las oscilaciones ocasionadas por el “fondo” del difractograma, la anchura ( $\beta$ ) que se emplea en la expresión de Scherrer es la anchura que el haz difractado o “pico” presenta a mitad de su altura. Para la modelización de los picos de difracción se ha utilizado el programa PLV-2002.

En nuestro estudio se han realizado difractogramas de RX sobre láminas 001 (perpendiculares a la dirección L de las probetas) de los tres grupos A, B y C del material marmóreo, tras los ciclos de calentamiento-enfriamiento establecidos (0, 50, 100, 150 y 200 ciclos). El número total de difractogramas obtenidos ha sido de 75 (25 por grupo, y 5 por ciclos y grupo), y las condiciones instrumentales de obtención de los mismos fueron:  $\lambda$  1,5405Å, velocidad de goniómetro 0,05°/seg. y zona explorada 20° a 45° ( $2\theta$ ).

#### *ORIENTACIÓN PREFERENCIAL DE EJES CRISTALOGRAFICOS DE LOS CRISTALES DE CALCITA*

Para este estudio se ha recurrido por una parte a la consideración de las intensidades relativas de las reflexiones 102, 104, 113, 110 y 202, y sus desviaciones respecto a sus valores estándar, en los difractogramas obtenidos para el estudio de índice de cristalinidad descrito anteriormente.

Mediante el programa PLV 2002 se seleccionan las reflexiones y se determinan sus intensidades.

Otros dos métodos seguidos se basan ambos en un análisis textural mediante difracción de rayos X.

El primero de estos dos métodos se centra en el estudio de la microestructura y en concreto de la orientación del eje c de los cristales que componen la roca; podríamos decir que es un método “ciego”, en el sentido de que no permite la observación directa de la fábrica analizada aunque presenta en cambio otras ventajas



como son la facilidad y economía en la preparación de las muestras, la rapidez en el análisis y la representación automática de los resultados (Álvarez et al., 1988).

El estudio de la orientación de los ejes *c* de distintos minerales es una de las técnicas más habituales para determinar el sentido de cizallamiento (deformación) en los procesos de formación de las rocas, y más actualmente en muchas otras aplicaciones. Citemos como ejemplo trabajos de índole tan variada como los de Dalchiele et al. (2001), para conseguir mayores rendimientos del material usado en absorción de energía solar, o los de Marakis et al. (2002), Maravelaki et al. (2001, 2002), Zafropoulos et al. (2002) para optimizar el rendimiento de limpieza de material pétreo mediante radiación láser.

La aplicación realizada en nuestro caso determina mediante el análisis textural por difracción de RX la orientación preferente que pueda existir en los cristales de calcita y de esta forma, y como se ha comentado anteriormente conocer el comportamiento del material; para ello se realizaron 3 láminas delgadas orientadas según las distintas direcciones de la probeta de las que se obtuvieron 6 difractogramas (dos para cada probeta, barriendo según cada una de las aristas). A su vez se preparó una muestra denominada estándar obtenida a partir de calcita procedente del mismo material a estudiar, que fue molida y pasada por tamiz de 400 mallas (ASTM), y colocada en un porta sobre el que se realizó el barrido con el fin de obtener la muestra patrón de comparación. Para evitar posibles orientaciones se agrega un dispersante constituido por cuarzo puro.

Posteriormente mediante el programa PLV 2002 se obtuvieron los resultados en términos cuantitativos de las distintas intensidades para las distintas reflexiones características de la calcita tanto de las distintas muestras como de la llamada patrón. A continuación se realizó un estudio comparativo de las intensidades obtenidas para las distintas láminas respecto de las intensidades resultantes en la muestra patrón. Para ello se utilizó el denominado coeficiente de textura “TC” representativo de las intensidades de las distintas reflexiones características del material en los difractogramas.

El coeficiente de textura TC, permite establecer la relación mediante la fórmula (Dalchiele et al., 2001):

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_o(hkl)}}{N^{-1} \times \sum \frac{I(hkl)}{I_o(hkl)}} \quad (5.2)$$

donde  $I$  es la medida de la intensidad de las distintas reflexiones,  $I_0$  es la intensidad medida igualmente para las distintas reflexiones de la muestra patrón y  $N$  el número de reflexiones.

Para un TC (hkl) próximo a la unidad se tiene una distribución al azar de la muestra, mientras que TC (hkl) es mayor que la unidad si el plano (hkl) está orientado preferentemente. De esta forma la evaluación de los coeficientes de textura indica la máxima orientación preferente de la lámina a lo largo del plano de difracción (Dalchiele et al., 2001).

Para el estudio realizado en mármol (calcita) la reflexión más idónea es la 006 ya que proporciona picos de alta intensidad sobre un plano perpendicular al eje  $c$ .

El equipo usado como en los casos anteriormente descritos, ha sido el perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada.

El segundo método realizado en la Unidad de Análisis de los Servicios de Recursos Científicos de la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, ha consistido en hacer medidas de ODF (Orientation Distribution Function). El área analizada es de  $1 \text{ cm}^2$  aproximadamente, lo que requiere que en dicha superficie haya un número suficientemente representativo de cristalitos que difracten. Se obtienen las figuras de polos de las reflexiones (102), (104), (110), (113) y (202). Estas figuras de polos son una proyección estereográfica de densidad de polos. Los ángulos de esta proyección son  $C$  y  $F$ . Las curvas de nivel indican densidad de polos. Para  $F = 0^\circ$  (norte de la figura) y  $F = 180^\circ$  (sur de la figura) se indica el eje de referencia de la muestra estudiada. El formato de la imagen corresponde a Hewlett Packard Graphics Language.

Estos estudios texturales se realizaron sobre tres probetas de  $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}$  de material A, obtenidas de una probeta original de  $15 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ , cortadas según los planos L-S, L-P y P-S de dicha probeta, y con alto grado de pulimentado en la cara a analizar; las condiciones de medida y características del equipo se recogen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Condiciones instrumentales del difractómetro de Rayos X utilizado en la determinación de orientación de ejes cristalográficos.

Aparato	SIEMENS D5000
Detector	Centelleo
Generador	30 mA, 40 kV
Ventana de divergencia	1.0°
Intervalo ángulo C	0-81°
Intervalo ángulo F	0-360°
Tiempo por paso en F	3 segundos
Configuración	$\Theta$ -2 $\Theta$ con círculo de Euler abierto
Radiación ( $\lambda$ )	1.5406 Å
Filtro para $k\beta$	Ni
Paso ángulo C	3°
Paso ángulo F	3°
Oscilación	10 mm en el eje x

## 5.6. ANÁLISIS QUÍMICO

Se ha efectuado el análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios de material de cantera, y de material marmóreo desprendido de las columnas del Patio.

Por lo que se refiere al material de cantera, se ha analizado material desprovisto de mineralización gris (muestra BLANCA), y material con alta proporción de mineralización gris (muestra GRIS).

En cuanto al material procedente de las columnas, se han analizado 6 muestras correspondientes a las columnas 13 (parte central zona externa, muestra 1); 40 (parte central zona externa, muestra 2); 24 (partes inferior y superior zona externa, muestras 3 y 4 respectivamente); 8 (parte central zona externa, muestra 5); 106 (parte central zona interna, muestra 6).

Las técnicas empleadas han sido:

Espectrometría de Plasma-Masas (ICP-MS), los análisis se han efectuado en el Centro de Instrumentación Científica (CIC) de la Universidad de Granada (espectrómetro PERKIN Elmer Sciex-Elan 500) y en los laboratorios X-Ray Assay de Ontario (Canadá).

Espectrometría de Absorción Atómica (AAS), análisis efectuados en el CIC de la Universidad de Granada (espectrómetro PERKIN Elmer modelo 5100 dotado de cámara de grafito).

Para el análisis por ICP y AAS las muestras han de ser disueltas por digestión ácida ( $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  a presión en cápsulas de teflón) y diluidas en  $\text{HNO}_3$  al 4%.

El análisis de azufre se efectuó en los laboratorios X-Ray Assay mediante un analizador elemental (Leco) provisto de detector para trazas de S.

## 5.7. TRANSMISIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS (ULTRASONIDOS)

Uno de los ensayos no destructivos (NDT) más utilizados en estudios sobre el Patrimonio Monumental y Artístico es sin duda la propagación de ondas elásticas, ultrasonidos, y en concreto la determinación de su velocidad de transmisión en el material.

Esta metodología, que ha sido desarrollada profundamente por Thompson y Thompson (1985), permite como se comentó anteriormente la caracterización física de diversos materiales, entre los que se encuentran naturalmente los pétreos.

En un sólido la velocidad de transmisión de ondas elásticas está condicionada por varios factores como son: la densidad del material, la cantidad de huecos o poros, y la cantidad de humedad alojada en el seno poroso de dicho material. La velocidad de propagación de las ondas depende por tanto de la naturaleza del medio donde se transmiten, es decir, de sus características composicionales y texturales. Su interpretación se realiza a partir del análisis de estas variaciones de velocidad durante su tránsito por el seno del medio investigado, aportando datos relacionados con la calidad y durabilidad de las rocas en edificios históricos y de cantera, tales como resistencia mecánica, porosidad, fisuración, y permitiendo además la evaluación del grado de alteración del material, y la mayor o menor efectividad de los tratamientos de restauración.

Descripciones pormenorizadas de esta técnica los podemos encontrar en las Memorias de Tesis Doctoral de Rodríguez Navarro (1994), Durán Suárez (1995), Cardell Fernández (1998), Cultrone (2001), Cazalla Vázquez (2002) y como ejemplos de aplicación se pueden citar a título de ejemplo los trabajos de investigación llevados a cabo por Krtolica et al. (1979), Montoto et al. (1981), Rossi Manaresi et al. (1983), Alonso et al. (1985), Thompson et al. (1985), Zezza et al. (1988), Azzoni et al. (1992), Bello et al. (1992), Durán et al. (1992), Valdeón et al. (1992), Zezza et al. (1992), Raj et al. (1994), Kröning et al. (1997), Durán et al. (1998), Noury et al. (1998), Galán et al. (1999), Burlini et al. (2000), Audoin, (2002), Luxenberger et al., (2002).

En nuestro caso la determinación de la velocidad de propagación de los pulsos ultrasónicos a través del material de las probetas lo hemos aplicado con un doble objetivo: por una parte investigar la incidencia que sobre el material de cantera puedan ejercer discontinuidades composicionales (bandeados grisáceos), orientaciones texturales, fisuras, etc., y por otra, evaluar la incidencia que sobre este material producen los ciclos de calentamiento-enfriamiento a los que las probetas han sido sometidas.

Para ello se ha determinado la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales. El método de medida aplicado (dentro de los tres posibles: directo, transmisión diagonal y de superficie) en las probetas de mármol ha sido el método de transmisión directa de impulsos ultrasónicos. Se han seguido las recomendaciones propuestas por la Norma Española UNE 83-308-86 (1986) y la Comisión NORMAL (NORMAL 22/86,1986). En concreto el procedimiento de trabajo ha consistido en medir de forma directa sobre las probetas de 5x5x15 cm los valores de velocidad de transmisión de ultrasonidos según las tres direcciones ortonormales H, F y L, fijadas por nosotros, y anteriormente comentadas.

El número de muestras sometidas a impulsos ultrasónicos ha sido de 75, clasificadas en 3 grupos de 25 en función de la presencia de anisotropía (grupos A, B y C), según se ha comentado anteriormente.

Hay que resaltar la importancia de la instalación de los transductores, ya que es condicionante para la correcta captación de las señales y es una exigencia ineludible el conseguir un perfecto contacto entre los transductores y la roca. Dada la escasa rugosidad de la superficie de las probetas se ha usado vaselina como interfase que asegure este contacto.

El equipo de ultrasonidos empleado es el modelo STEINKAMP BP V, constituido por un generador de impulsos de baja potencia, dos transductores de alta potencia y un convertidor de impulsos ultrasónicos en impulsos eléctricos. El campo

de medición es de 0,1 a 9999,9  $\mu$ seg, siendo de  $10^{-5}$  seg. la exactitud del emisor. Dadas las dimensiones de las probetas 15x5x5 cm, se han utilizado transductores de 100 kHz de frecuencia, de forma cilíndrica.

Para el calibrado se ha utilizado una pieza de PVC como elemento de tarado. El patrón de tarado que incluye el equipo está ajustado para que las ondas ultrasónicas lo atraviesen en un tiempo de 10  $\mu$ seg;

Para evitar posibles errores en la obtención de las medidas se ha de ejercer siempre la misma presión al aplicar los transductores sobre la superficie de la probeta

Por lo que respecta a las condiciones termohigrométricas de trabajo, las medidas se han efectuado en un ambiente con valores de temperatura del orden de 20°C y humedades relativas entre 40 y 50%.

Según se muestra en la Figura 5.4 la denominación de los distintos puntos de medida en las probetas han sido definidos para los grupos B y C de la manera siguiente.

Medición H: caras enfrentadas según la mayor longitud de la probeta.

Medición L1 y L2: medidas a 1/3 y 2/3 de la altura de la probeta, perpendiculares a la anisotropía visible de las muestras.

Medición F1 y F2: medidas a 1/3 y 2/3 de la altura de la probeta, paralelas a la anisotropía visible de las muestras.

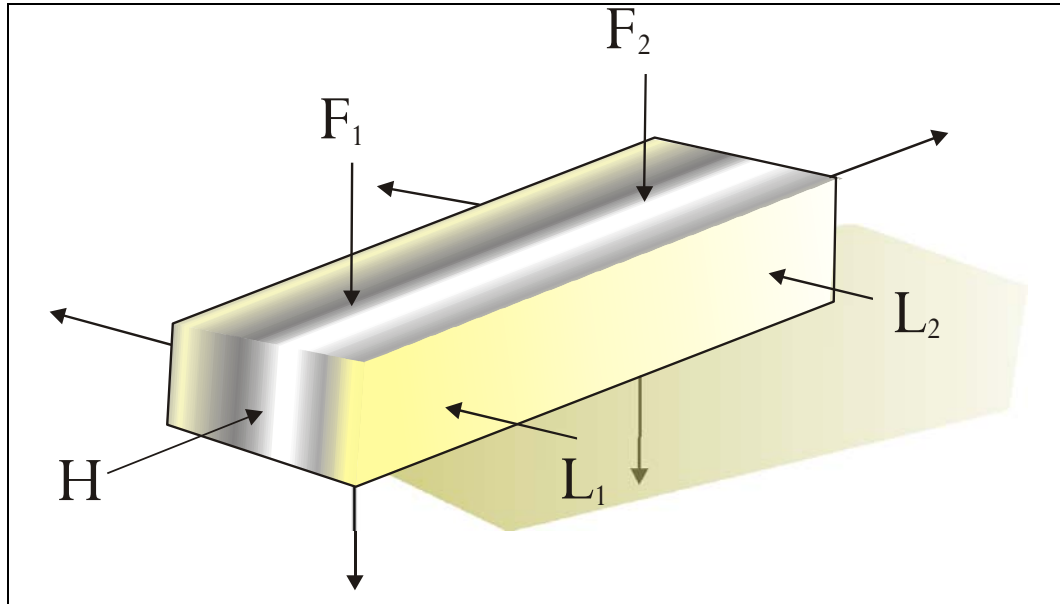


Figura 5.4. Esquema de colocación de los transductores (flechas H,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $L_1$  y  $L_2$  en dirección ortogonal) que han permitido obtener los cinco valores en cada probeta.

La ubicación de las mediciones para las probetas del grupo A, se mantiene para la toma o dirección H (la de mayor longitud de la probeta), pero en las direcciones F y L se realizan de forma aleatoria cuando el bandeo es totalmente inapreciable.

## 5.8. ENSAYOS HÍDRICOS

Las propiedades hídricas pueden ser consideradas como características de primer orden en materiales utilizados en construcción, y entre ellos los presentes en edificios histórico-artísticos. De hecho del comportamiento hídrico de un material dependerá su posible utilización, durabilidad, resistencia, etc.

El agua está presente en muchos de los procesos de alteración de material pétreo, es por eso fundamental conocer y establecer de forma cuantitativa el comportamiento del material frente a este medio ya que juega un papel principal en el deterioro del mismo.

Por otra parte, el comportamiento hídrico de un material variará según su estado y tipo de alteración, por lo que la verificación de este comportamiento será una constatación del grado de alteración alcanzado. Por ello se han realizado los ensayos

sobre el material de cantera sin someter a ciclos de calentamiento-enfriamiento y sobre las probetas tras los respectivos ciclos de estrés térmico.

Para la valoración de este comportamiento hídrico del material estudiado se han realizado los siguientes ensayos:

Absorción (absorción libre de agua por inmersión total)

Desorción (desorción libre de agua: evaporación)

Permeabilidad al vapor de agua

Ángulo de contacto

La utilidad de estos ensayos queda constatada por los múltiples trabajos de investigación que utilizan esta técnica en la caracterización y evaluación de las alteraciones de materiales pétreos, sirvan como ejemplos los desarrollados por: Ritter et al. (1945), Peruzzi et al. (1984), Alonso et al. (1987), Punuru et al. (1990), Alonso et al. (1992), Bello et al. (1992), Durán Suárez et al. (1998), Galán et al. (1999).

#### 5.8.1. ABSORCIÓN-DESORCIÓN

Estos dos ensayos, dada su complementariedad suelen tener un tratamiento y realización conjuntas. En ambos se cuantifica la variación del contenido en agua de las probetas en intervalos de tiempo determinados. Ambos ensayos finalizan cuando el material alcanza el equilibrio, lo que se considera cuando la diferencia entre dos pesadas, espaciadas un mínimo de 24 horas es inferior al 0,1% del peso de la probeta.

Los ensayos se han realizado sobre las probetas de 14x5x5 cm tras los respectivos ciclos de estrés térmico.

##### *Absorción*

En la realización del ensayo de absorción se han empleado cubetas de material plástico; en el fondo de las mismas se ha colocado una bandeja de aluminio perforada con la finalidad de evitar que las bases de las probetas sometidas a este ensayo tuvieran el mínimo contacto con el fondo de la cubeta, y así, asegurar una óptima accesibilidad del agua por toda la superficie de las mismas.

El procedimiento de medida y obtención de datos ha sido el siguiente: las probetas son introducidas en la cubeta y a continuación se cubren de agua desionizada. Seguidamente se van pesando a intervalos de tiempo establecidos.



Con los datos de peso obtenidos en cada tiempo se determina el porcentaje de agua absorbida en relación con el peso inicial de la probeta; a continuación se elaboran las curvas de absorción  $\Delta$ masa-tiempo ( $\sqrt{\text{min}}$ ) para el material (probetas con y sin ciclos).

Estos valores se calculan según la siguiente ecuación:

$$\Delta M = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \quad (5.3)$$

Donde  $M_t$ , es el peso (g) de la probeta en función del tiempo de inmersión, y  $M_0$ , es el peso inicial (g) de la probeta.

El ensayo finalizará cuando se alcance un peso constante, es decir y como ya se ha comentado, cuando las variaciones de peso estén por debajo de un 0,1%.

Una vez alcanzada la condición de peso constante se ha obtenido el valor máximo de imbibición IA (Documento NORMAL 7/81), definido por la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{of}}}{M_{\text{of}}} \times 100 \quad (5.4)$$

Donde  $M_{\text{máx}}$  corresponde al valor de la masa (g) de la probeta imbibida de agua al final de la prueba, y  $M_{\text{of}}$  corresponde a la masa (g) de la probeta seca.

Dado que para la realización de este experimento no se precisan condiciones determinadas de temperatura y humedad relativa, los errores que se pueden cometer derivan del proceso manual de pesada y de la fase previa a la misma, es decir, la eliminación del exceso de humedad con una bayeta absorbente.

#### *Desorción*

Una vez finalizado el ensayo de absorción y teniendo las probetas completamente saturadas se procede al pesado de estas a intervalos de tiempo regulares (siguiendo una progresión logarítmica) para de esta forma poder conocer la progresión de pérdida de agua que se produce en el material. Para ello las muestras se han colocado sobre una rejilla de plástico y se han dejado secar en el laboratorio a temperatura y presión ambientales, hasta alcanzar como en el ensayo anterior la pesada de valor constante.

A partir de los valores obtenidos se calcula el contenido de agua presente en la roca según las consideraciones descritas en Documento NORMAL 29/88, siendo el

proceso matemático muy similar al realizado en el ensayo anterior como se muestra a continuación.

$$\Delta M = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \quad (5.5)$$

Donde  $M_t$ , es el peso (g) de la probeta en función del tiempo de secado, y  $M_0$ , es el peso inicial (g) de la probeta.

Además de obtener estos resultados, una vez finalizado el ensayo se calcula el índice de secado ID a partir de la integral de la curva, según la siguiente ecuación (Documento NORMAL 29/88):

$$ID = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) dt}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (5.6)$$

Donde  $f(Q_i)$ , es la función que expresa el contenido porcentual de agua, respecto de la masa seca, en función del tiempo.  $Q_{m\acute{a}x}$  corresponde al contenido de agua inicial expresado en tantos por ciento, obtenido respecto al peso seco obtenido al final de la prueba;  $t_f$  es el tiempo final de la prueba, y  $t_0$ , es el tiempo inicial de la prueba, es decir: cero.

El cálculo de la integral, para obtener el índice de secado (ID), se ha realizado en esta prueba según el método de Simpson a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{t_f - t_0}{3n} [Q_{m\acute{a}x} + M_f + 2(M_2 + M_4 + \dots + M_{n-2}) + 4(M_1 + M_3 + \dots + M_{n-1})] \quad (5.7)$$

donde  $M_f$  es el contenido de agua al tiempo final de la prueba, expresado en tantos por ciento, respecto del peso seco;  $t_0$  es el tiempo inicial de la prueba, es decir: cero;  $n$ , es el número de intervalos establecidos para el cálculo, y  $t_f$  es el tiempo transcurrido hasta el final de la prueba.

Los errores que se pueden obtener con este ensayo pueden ser mayores que en el caso anterior, dado que este debe desarrollarse bajo condiciones constantes de temperatura y humedad relativa, con lo cual pequeñas variaciones en las mismas pueden generar variaciones discordantes en las pesadas obtenidas.

### 5.8.2. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

La importancia que tiene la humedad en los procesos de alteración y durabilidad de los materiales rocosos, viene dada porque un elevado porcentaje de la humedad que circula por los materiales rocosos lo hace en forma de vapor. El ensayo se fundamenta en la movilidad del vapor de agua a través del sistema poroso de una roca como respuesta a una diferencia de presión parcial de vapor de agua; esta diferencia provoca un movimiento difusivo de las moléculas de agua desde el interior de la roca hacia el exterior (siempre que la presión parcial de vapor de agua en la atmósfera sea menor que la presión parcial de vapor de agua en el interior del sistema poroso de la roca, puesto que en caso contrario, la difusión ocurre en sentido contrario).

Con este ensayo se pretende, pues, controlar la cantidad de vapor de agua que pasa a través de un material de espesor conocido, en un tiempo determinado y como es habitual en este tipo de ensayos en condiciones determinadas de temperatura y humedad relativa.

La permeabilidad al vapor de agua de un determinado tipo de roca con o sin tratamiento, quedaría expresada en  $\text{g/m}^2$ . Algunos trabajos como los que a continuación se citan ejemplifican la utilidad de esta técnica: Frediani et al. (1980), Valle et al. (1985), Katz et al. (1986), Jacobs et al. (1995), Bulut et al. (1996), Wark et al. (1998), Cartwright et al. (2000), Pape et al. (2000), Rivas et al. (2000, 2001), Zhang et al. (2001), Toniolo et al. (2002).

En este ensayo se han seguido las recomendaciones del Documento NORMAL 21/85, realizando el experimento sobre un total de 19 probetas de los tres tipos de material, y sometidas a distintos nº de ciclos. Las probetas son paralelepípedos de dimensiones 5x5x1 cm.

Los aparatos empleados en la medición han sido: una balanza analítica con precisión de 0,1 mg, y una célula portamuestras con las características requeridas por la recomendación NORMAL 21/85; el esquema de la célula empleada queda recogido en la Figura 5.5. Esta célula está realizada en material impermeable (PVC), y se compone de un recipiente donde se deposita un determinado volumen de agua desionizada (10 cc). En el mismo, se introduce una pequeña cantidad de pulpa de papel o algodón hidrófilo, para evitar que el agua depositada pueda mojar la superficie de la probeta. A una distancia mínima de 2 cm, se coloca la muestra alojada entre dos capas de material hermético (teflón); por último la célula se cierra con una tapadera igualmente hermética, provista de una apertura circular. El sistema contenedor, probeta-tapadera, se cierra mediante un dispositivo de tornillos, lo que condiciona que el vapor de agua, movido por las diferencias de presión parcial del

aire existentes entre el interior de la célula y el exterior, tenga que atravesar forzosamente la superficie de la muestra expuesta al aire, cuya área es constante.

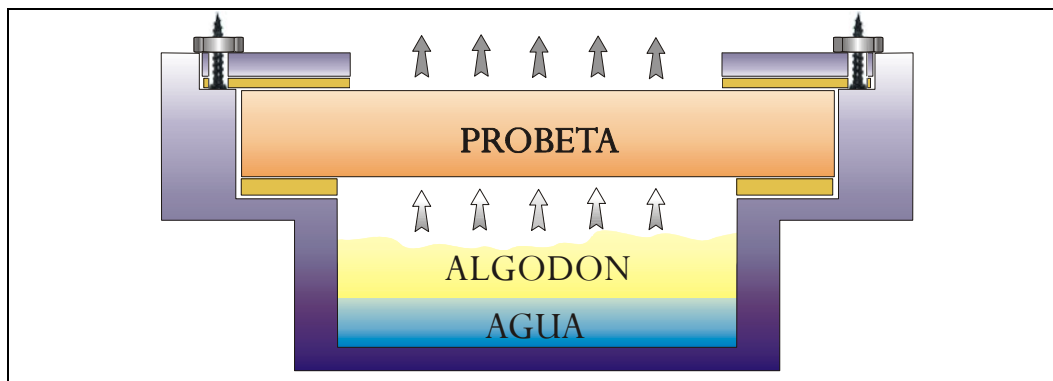


Figura 5.5. Esquema de la célula empleada en la medición del ensayo de permeabilidad al vapor de agua. Según diseño normalizado (NORMAL 21/85).

El sistema de medición consiste en controlar las diferencias de masa que experimenta el conjunto célula y muestra en el tiempo. Para ello, es necesario controlar el peso inicial de todo el conjunto; seguidamente, y al objeto de mantener constantes de humedad relativa y temperatura, la célula se introduce en una campana desecadora, que contiene gel de sílice (con indicador de humedad), y el conjunto a su vez se introduce en una estufa a temperatura constante.

Todos estos requerimientos están pensados para garantizar que las condiciones de temperatura y humedad relativa sean constantes; por un lado el gel de sílice alojado en el interior del desecador actúa como solución tampón, asegurando que el aire contenido en el mismo mantenga fijas las condiciones de humedad relativa; por otro, la constancia en los valores de temperatura establece que la presión parcial de vapor de agua también lo sea. A modo de ejemplo, la variación de temperatura de 1°, provocaría una variación del 6% en los valores de presión parcial de vapor: para 20°, la presión sería de 17.535 mm. de Hg, mientras que para 21°C, sería de 18.650 mm. de Hg (NORMAL 21/85).

El valor de la permeabilidad se calcula a partir de las diferencias de peso obtenidas para cada intervalo (24 horas) siempre que dentro del mismo se mantenga un régimen estacionario, es decir, que las diferencias de pesada, o pérdidas de masa, no difieran más del 5% (determinado por la ecuación 5.8) entre un intervalo y otro, lo cual asegura que las condiciones de humedad relativa y temperatura han permanecido aceptablemente constantes.

$$\frac{(\Delta M_i - \Delta M_{i-1}) \times 100}{\Delta M_i} \leq 5\% \quad (5.8)$$

Donde  $\Delta M_i$ , es la diferencia de masa registrada en un valor de tiempo determinado, mientras que  $\Delta M_{i-1}$ , es la diferencia de pesada registrada en la unidad de tiempo anterior.

La permeabilidad al vapor de agua es el valor medio registrado durante el ensayo, dividido por la superficie ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), según ecuación 5.9:

$$\text{Perm} = \frac{\Delta M}{s} \quad (5.9)$$

Por requerimientos de la normalización vigente, el valor de permeabilidad debe estar referido a una determinada temperatura ( $20^\circ\text{C}$ ); caso de haberse obtenido a otra temperatura estos valores se normalizan a partir de la ecuación 5.10:

$$\text{Perm}_{(20^\circ\text{C})} = \text{Perm}_{(t_x)} \times p_{(20^\circ\text{C})} / p_{(t_x)} \quad (5.10)$$

Donde:  $\text{Perm}_{(t_x)}$ , corresponde al valor en  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$ , obtenido a una temperatura determinada;  $P_{(20^\circ\text{C})}$ , y  $P_{(t_x)}$ , son los valores de presión parcial de vapor para ambas temperaturas. Los valores de temperatura empleados en nuestro caso han sido de  $20^\circ\text{C}$ .

### 5.8.3. ÁNGULO DE CONTACTO

El ensayo de ángulo de contacto piedra-agua-aire, consistente en la medición del ángulo de contacto que se forma al depositar una gota de agua sobre la superficie del material pétreo, es de notable importancia para el conocimiento de las propiedades hidrofílicas del sólido.

El ángulo de contacto es aquél que se forma en la línea de contacto (intersección de las tres interfaces: sólido-líquido-aire) y que queda delimitado por las interfaces sólido-líquido y líquido-gas.

A partir de este ángulo se valorará si la superficie del sólido es más o menos hidrofílica, de modo que para una gota de un volumen determinado, un ángulo de contacto bajo (más hidrofílica) se observará como una gota que moja el sólido,

mientras que un ángulo alto (menos hidrofílica o más hidrofóbica) se verá como una gota menos extendida que no moja tanto al sólido.

Actualmente bastantes investigadores utilizan esta medida, o el valor del tiempo de absorción de gotas, para dar una idea de las características hidrofílicas de materiales en Patrimonio, y cómo se modifica la conducta de un material tratado con agentes protectivos; sirvan como ejemplos los trabajos realizados por De Castro (1980, 1981), Peruzzi et al. (1984), Simón et al. (1992), Nugari et al. (1997), Durán Suárez et al. (1998), Rodríguez Gordillo et al. (2000), Álvarez de Buergo et al. (2001), Ardebrant et al. (2001), Rodríguez Valverde et al. (2002), Toniolo et al. (2002).

En esta Memoria la medición del ángulo de contacto se ha realizado sobre un total de 45 probetas, todas ellas con unas medidas aproximadas de 5x5x1 cm. Posteriormente al corte de las probetas, estas se han lavado con agua desionizada y se han secado a una temperatura aproximada de  $60^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta conseguir una diferencia de pesada  $\leq 0,1\%$  de la masa de la probeta (con un intervalo de 24 horas entre cada pesada). Tanto la forma como las dimensiones de las probetas se ajustan a la norma de medida del ángulo de contacto (NORMAL 33/89). La superficie de medida no ha sido inferior a  $9\text{ cm}^2$  y el espesor de todas las muestras no ha sido inferior a 1 cm. Las superficies de las muestras no se tocaron con la mano para evitar el engrase de las mismas y por tanto obtenerse datos erróneos sobre los valores de ángulo de contacto agua-piedra.

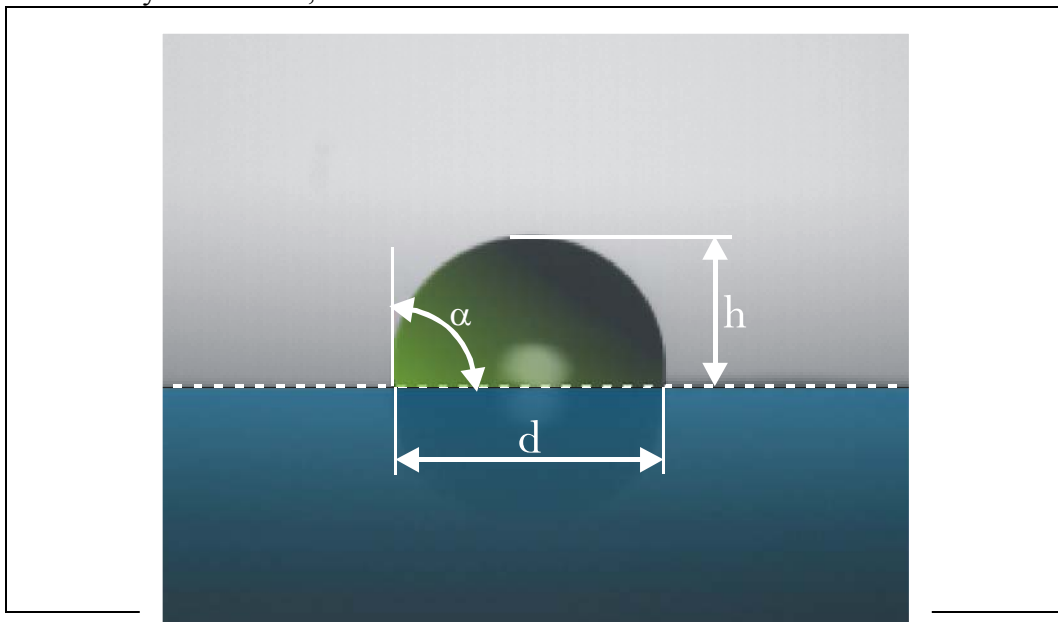
Para la realización de este ensayo se han utilizado los dispositivos del Grupo de Física de Fluidos y Biocoloides del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, consistentes en una cámara, marca Sony modelo CCD-Iris, orientada horizontalmente, que junto con un microscopio MELLES GRIOT modelo Invaritar, permite tomar las imágenes de los perfiles de las gotas analizadas. Esta unidad a través de una tarjeta digitalizadora (Data Translation modelo 3155) instalada en un PC, se encargará de digitalizar y almacenar las imágenes, y posteriormente de extraer los perfiles, y hacer el correspondiente calibrado, para aplicar la técnica ADSA-P (Axisymmetric Drop Shape Análisis – Profile) para determinar al ángulo de contacto (Lahooti et al., 1996).

Todo este dispositivo se encuentra ubicado sobre una mesa antivibratoria en un laboratorio de superficies, con las adecuadas condiciones de limpieza y temperatura ( $20^{\circ}\text{C}$ ) para aislar el experimento.

Sobre las probetas debidamente niveladas horizontalmente y alineadas con el eje óptico del aparato, se colocaron gotas de agua (“ultrapura”) de  $5\mu\text{l}$ ; para ello se utilizó una micropipeta BOECO 5-50. La fuente de iluminación ha sido una luz

blanca con difusores lo que ha permitido minimizar el efecto del calentamiento del sistema de medida y obtener un fondo luminoso uniforme; se colocaron un total de 36 gotas por probeta y se tomaron un total de 45 imágenes por gota a razón de una por segundo, con las cuales se observa la variación dinámica del ángulo de contacto debido a la extensión de la gota y a la pérdida de volumen debido a la porosidad del material.

Las imágenes adquiridas son analizadas automáticamente, obteniéndose así su perfil. Éste se calibrará y convertirá en coordenadas físicas y se ajustará por métodos numéricos a la ecuación de Laplace lo que nos facilitará la determinación de las características de la gota: el ángulo de contacto, y otras características como la tensión superficial del líquido utilizado, el volumen, etc. Para ello se ha utilizado el software diseñado por Holgado Terriza (2002) correspondientes a los programas Dinaten © y Contacto ©, en sus versiones 2.0.



Figuras 5.6. Esquema ilustrativo de la de medición efectuada en el ensayo de ángulo de contacto.

## 5.9. POROSIMETRÍA

Las características del sistema poroso, el volumen de huecos y el tamaño de estos son la causa de gran parte de las alteraciones producidas en materiales pétreos; en consecuencia el estudio de la porosidad de los materiales rocosos utilizados en

edificios histórico-artísticos permitirá conocer, además de las características físicas, la capacidad de almacenamiento y circulación de determinadas sustancias degradantes que favorezcan al deterioro, así como el control de la calidad y durabilidad de las rocas e incluso la viabilidad de los tratamientos de consolidación e hidrofugación que se apliquen. Este conocimiento lo posibilitan las técnicas o ensayos de porosimetría, entre los que la porosimetría de inyección de mercurio y las de adsorción de gases son de los más empleados en nuestro campo de investigación.

Dadas las características del material hemos abordado el conocimiento de sus características porosimétricas mediante la porosimetría de inyección de mercurio y la adsorción de  $N_2$  (Método B.E.T.). Debido a la escasa porosidad del material marmóreo en general, con la primera técnica se intenta cubrir el campo de la posible macroporosidad presente, y con el segundo la microporosidad no accesible al método de inyección de mercurio.

#### *POROSIMETRÍA DE INYECCIÓN DE MERCURIO*

Los fundamentos de este ensayo se basan en introducir mercurio a presiones variables en el seno poroso de una roca. Dado que este líquido no moja a gran cantidad de sustancias naturales, al ponerlo en contacto con un material poroso y someterlo a presión creciente, este penetrará sucesivamente por poros de menor diámetro. Con este planteamiento, es posible obtener en primer lugar la porosidad abierta de una roca, determinada por diferencias de pesada (picnometría de mercurio), y la distribución de tamaños de poros accesibles al mercurio, determinado por las presiones ejercidas para conseguir que penetre en la roca dicho líquido.

Es de destacar el empleo de esta técnica por parte de numerosos investigadores, para caracterizar materiales pétreos empleados en edificaciones arquitectónicas de carácter histórico-artístico, para evaluar el grado de alteración sufrido, y la determinación de la idoneidad de productos consolidantes y protectivos antes de su puesta en obra: Katz et al. (1986), Alonso et al. (1987), Zezza et al. (1992), Xie et al. (1996), Klobes et al. (1997), Durán et al. (1998), Meyer et al. (1999), Cultrone (2001).

El ensayo que se desarrolla en este apartado consiste en medir la cantidad de huecos, y la distribución de los tamaños de los mismos presentes en dicho volumen determinado de muestra. De forma paralela, se miden las variaciones inducidas por los distintos ciclos aplicados (tanto el volumen total de huecos, como los posibles cambios en la distribución de tamaños de poros).

La metodología seguida en este experimento se basa en gran parte en la recomendación propuesta por el Documento NORMAL 4/80. Se han ensayado un



total de 10 muestras de material de los tipos A y C sometidas a los distintos ciclos térmicos.

El equipo empleado para las determinaciones porosimétricas, ha sido un Micromeritics Autopore III modelo 9420 del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. Está compuesto por dos puertos de baja presión y uno de alta en los que se introducen el penetrómetro con la muestra. El aparato mide poros con diámetros de 0,003 hasta 360  $\mu\text{m}$  y puede ejercer una presión máxima de 60.000 psia (414 MPa), está conectado a un ordenador, el cual dispone de programa informático para el tratamiento numérico y gráfico de los datos obtenidos.

Una vez que las muestras están preparadas, estas son pesadas e introducidas en la célula portamuestras del porosímetro (penetrómetro). La intrusión forzada del mercurio se hace en dos fases: a baja presión (2 atmósferas), y a alta presión (4.000 atmósferas). Finalizado el proceso de intrusión y extrusión del mercurio, con los datos recopilados se pueden obtener los siguientes resultados: porosidad total de la muestra analizada, curvas acumulativas de volumen de mercurio intruido con respecto al radio de poro (% de volumen acumulado), y curvas de acumuladas de distribución de tamaños de poro (% de volumen relativo).

#### *SUPERFICIE ESPECÍFICA POR ADSORCIÓN DE NITRÓGENO. MÉTODO B.E.T.*

Las medidas más reproducibles del área superficial se obtienen mediante la adsorción en monocapa de un gas inerte sobre la superficie de un sólido a temperatura reducida y la subsiguiente desorción de este gas a temperatura ambiente. Las isotermas de adsorción obtenidas mediante esta técnica se interpretan utilizando las ecuaciones desarrolladas por Brunauer, Emmett y Teller, lo que se conoce con el nombre de método B.E.T. (1997) (Newman, 1995).

La cantidad de gas o vapor absorbido por un sólido poroso en función de la presión depende en gran medida de la distribución del tamaño de poro del sólido. En este tipo de técnicas es posible utilizar como absorbato un número muy elevado de fluidos; sin embargo los mejores resultados en materiales porosos naturales (rocas) se obtienen con  $\text{N}_2$  (Boucher, 1976).

La utilidad de esta técnica para la determinación de la microporosidad del material rocoso se pone de manifiesto en los distintos trabajos de investigación llevados a cabo entre los que se pueden citar Lüttge et al. (2002), Davini (1999), Keller et al. (1999), Suárez et al. (1996).

El modo en el que un material adsorbe un gas se asemeja a una isoterma de adsorción. El tipo de isoterma más común y útil para las medidas B.E.T. es la isoterma tipo II (Figura 5.7). El punto de inflexión de esta isoterma generalmente indica el recubrimiento monocapa del adsorbato.

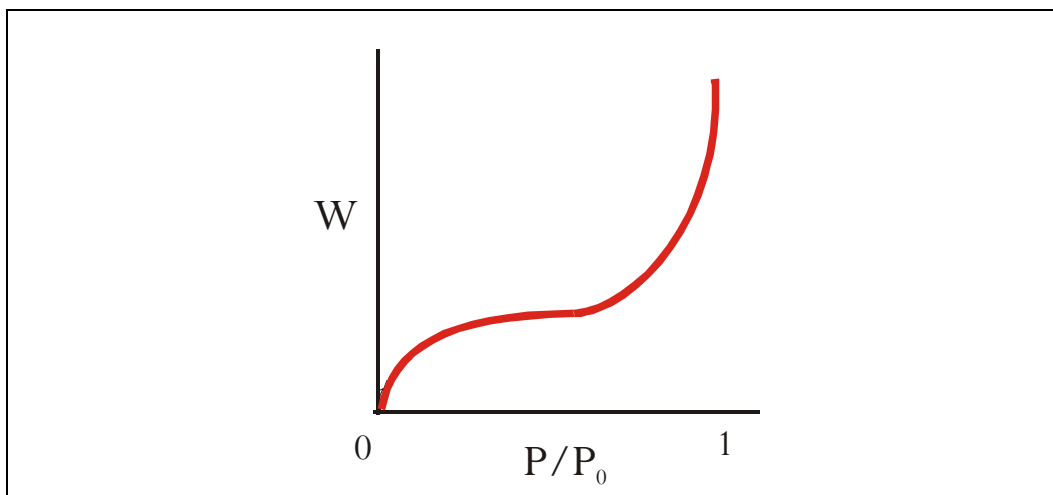


Figura 5.7. Isoterma de adsorción tipo II.  $W$ : Peso adsorbido;  $P/P_0$ : Presión relativa. La saturación se produce a  $P/P_0 \geq 1$ .

La ecuación B.E.T. del área superficial está basada en la teoría de Langmuir de la cinética de adsorción superficial en monocapa de un gas. Langmuir teorizó que la colisión de una molécula de gas con un sólido es inelástica y las moléculas de gas se mantienen en contacto con el sólido antes de retornar a la fase gaseosa, produciéndose la adsorción. Brunauer, Emmett y Teller extendieron la teoría de Langmuir a la adsorción multicapas moleculares. Establecieron una relación entre la velocidad de condensación de las moléculas de un gas sobre una capa adsorbida y la velocidad de evaporación desde esa capa para un número infinito de capas. La forma lineal de esta ecuación es denominada ecuación B.E.T.:

$$\frac{P}{V \times (P_0 - P)} = \frac{1}{V_m \times C} + \frac{C-1}{V_m \times C} \times \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (5.11)$$

Donde  $V$  es el volumen de gas adsorbido a presión  $P$ ;  $P$  es la presión parcial del adsorbato;  $V_m$  es el volumen de gas adsorbido en la monocapa;  $P_0$  es la presión de saturación del adsorbato a la temperatura experimental; y  $C$  es la constante B.E.T., que relaciona exponencialmente los calores de adsorción y la condición del adsorbato.

Para obtener una mayor exactitud en la determinación de la superficie específica (S), se prefiere realizar medidas de B.E.T. multipunto, en las que se obtiene una gráfica de  $P/V(P_0-P)$  frente a  $P/P_0$  utilizando varias concentraciones de adsorbato y midiendo el volumen adsorbido. Como la ecuación B.E.T. corresponde a una línea recta:

$$\text{Pendiente} = \frac{C-1}{V_m \times C} \quad (5.12)$$

$$\text{Ordenada en el origen: } \frac{1}{V_m \times C} \quad (5.13)$$

La monocapa de gas adsorbido ( $V_m$ ) y la constante B.E.T. se calculan a partir de la pendiente y la ordenada en el origen:

$$V_m = \frac{1}{\text{pendiente} + \text{ordenada}} \quad (5.14)$$

$$C = \frac{\text{pendiente}}{\text{ordenada}} + 1 \quad (5.15)$$

El área superficial total ( $S_t$ ) de la muestra se calcula a partir de:

$$S_t = \frac{V_m \times N_0 \times A_{CS}}{M} \quad (5.16)$$

Donde  $N_0$  es el número de Avogadro,  $A_{CS}$  es la sección del adsorbente y  $M$  es el peso molecular del adsorbente.

La superficie específica (S) del sólido se obtiene dividiendo el área superficial total ( $S_t$ ) entre la masa de la muestra pulverizada (m):

$$S = \frac{S_t}{m} \quad (5.17)$$

La metodología seguida ha permitido determinar la superficie específica de las 4 muestras de material de los tipos A y C sometidas a “0” y “200” ciclos térmicos, mediante la absorción de N<sub>2</sub> por el Método B.E.T. multipunto.

La medida de la superficie específica se realizó empleando un equipo Quantasorb Jr. De Quantachrome (USA) del Departamento de Física Aplicada. Dicho equipo dispone de un detector de conductividad térmica para determinar la cantidad de gas desorbido de la muestra. El gas adsorbato utilizado se mezcla con helio como gas transportador inerte no condensable en las concentraciones requeridas para el análisis. Para nuestras medidas se ha dispuesto de tres tanques de concentraciones del 10%, 20% y 30% de nitrógeno en helio. La masa de muestra empleada fue de 1g.

Tras la limpieza de la muestra, ésta es enfriada hasta el punto de ebullición del gas adsorbato mediante la inmersión del soporte de la muestra en un vaso Dewar con nitrógeno líquido, en presencia de un flujo de la mezcla N<sub>2</sub>-He deseada. El vaso Dewar de nitrógeno líquido se retira entonces de la célula muestra y la cantidad de gas previamente adsorbido se mide al desorberse cuando se calienta la muestra a temperatura ambiente. El volumen de gas desorbido se transforma en superficie específica (m<sup>2</sup>/g) de la muestra empleando la ecuación B.E.T.

## **5.10. MEDIDAS DE DUREZA SUPERFICIAL. ESCLERÓMETRO**

Como se indicaba en la Introducción de esta Memoria, uno de los efectos de deterioro más perceptibles en las columnas del Patio de los Leones es el de pérdida de material en forma de desplazados o laminillas que debe indicar una pérdida diferencial de cohesión superficial del material marmóreo. Interesa por tanto evaluar esta pérdida de cohesión superficial del material de cantera sometido a ciclos de estrés térmico, y su correlación con su posible pérdida de resistencia mecánica.

En nuestro caso, para determinar esta variación de cohesión y/o dureza superficial se ha recurrido a medidas esclerométricas sobre la superficie de probetas sometidas a ciclos de calentamiento-enfriamiento y probetas no sometidas a estos ciclos, y cuyos datos correlacionados con el ensayo de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos y el ensayo de resistencia a compresión nos van a permitir mejorar la precisión de las estimaciones de resistencia en el material estudiado.

Se ha optado por el uso del esclerómetro dado que es el que puede proporcionar una valoración más cuantitativa en términos de cohesión y dureza superficial del material, y de la incidencia de los ciclos de calentamiento-enfriamiento

sobre la misma y su relación con su pérdida de resistencia mecánica. En efecto, los métodos esclerométricos pretenden deducir la resistencia de un material a través de un estudio de su dureza superficial. En un principio este método fue ideado para aplicarlo sobre hormigón, de hecho el método esclerométrico más primitivo consistió en golpear la superficie de hormigón con un martillo y juzgar por el rebote, la bondad de su estructura.

Diversos estudios para distintos materiales han utilizado esta técnica, con sus distintas variantes, para determinar la dureza y el grado de cohesión entre sus componentes y la relación que estas propiedades mantienen con las propiedades mecánicas de un material; entre ellos podemos citar a Boyarskaya et al. (1995), Blau et al. (1997), Lyashko et al. (1998), Briscoe et al. (1999), Rapoport et al., (2001).

En la actualidad dentro de los llamados ensayos de dureza dinámicos, los métodos esclerométricos más importantes son los de rebote o retroceso, que se basan en la medida del rebote del martillo que presiona o cae sobre el material de ensayo. Son:

Medición de rebote con el martillo.

Medición de la huella dejada por una bola (lanzada por su martillo correspondiente) sobre la superficie del material.

En ambos métodos una masa metálica acelerada bajo el efecto de resortes golpea la superficie del material. La energía del choque es absorbida en parte por una deformación permanente de la superficie del material, y el resto, en el rebote del cuerpo que golpea.

En el caso de la impresión de la bola, se mide la deformación plástica del material (cemento, roca, hormigón, etc.), mientras que el rebote se relaciona con el comportamiento elástico.

Para hormigones el ensayo de impresión de bola presenta una gran dispersión, debido fundamentalmente a que no se golpea sobre cemento puro y el árido dificulta la deformación según el tamaño de grano. En nuestro caso tampoco es útil este ensayo dada la escasa plasticidad de la superficie marmórea.

El ensayo de medición de índice de rebote presenta también dispersiones, aunque en menor grado que en el ensayo de impresión y su exactitud depende de las características (rugosidad, grado de humedad, etc.) de la superficie a estudiar.

Se deduce por tanto que de estos dos ensayos el del rebote es el más utilizado y concretamente el esclerómetro el aparato que ha alcanzado mayor difusión.

Este esclerómetro está representado en la Figura 5.8, basa su fundamento en medir el rebote de una masa liberada por un percutor al apoyarse éste sobre la superficie del material.



*Figura 5.8. Realización del ensayo de medida de dureza superficial mediante esclerómetro.*

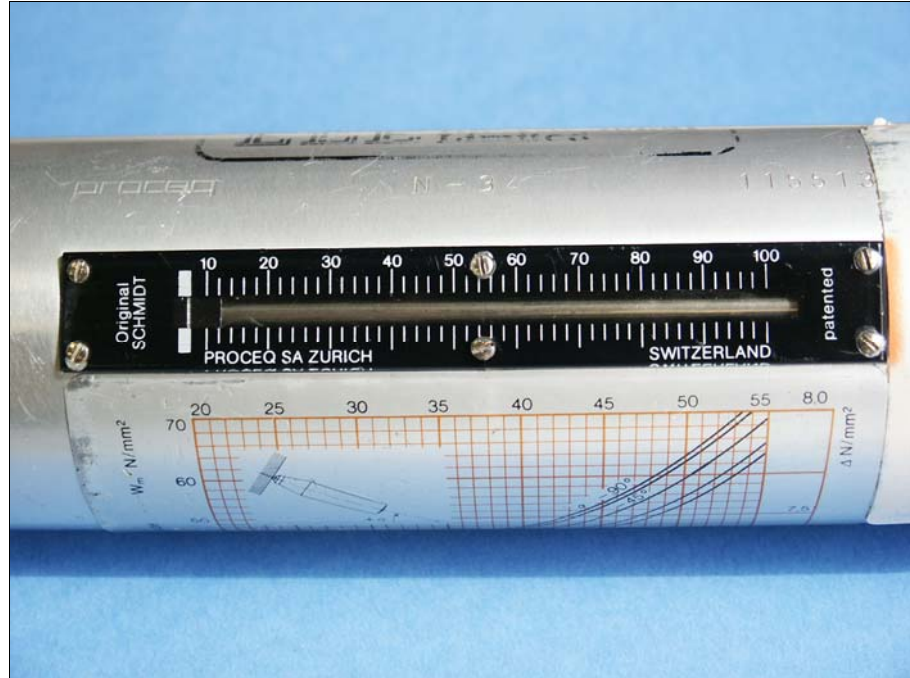


Figura 5.9. Detalle de la escala graduada del esclerómetro Schmidt empleado en el ensayo.

Al apoyarse el percutor sobre la superficie del material es comprimido el resorte que se libera al llegar el percutor al final de su recorrido y lanza una masa sobre la parte trasera del percutor estando éste apoyado sobre el material; después del choque la masa rebota y mueve un índice sobre una escala graduada. (Esta escala representa la relación entre el rebote y el recorrido total de la masa) (Figura 5.9). Al número indicado sobre esta escala se le llama índice esclerométrico IS.

Junto al aparato se acompaña un diagrama calibrador (Figura 5.10), que indica, en función de la dureza del choque (valores de índice esclerométrico), la resistencia a la compresión.

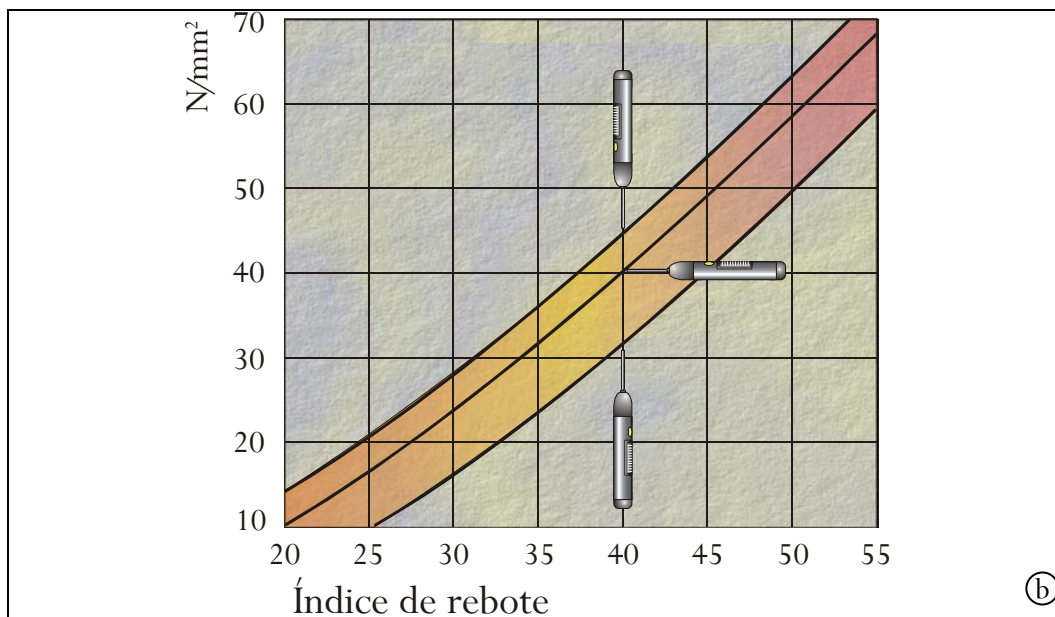
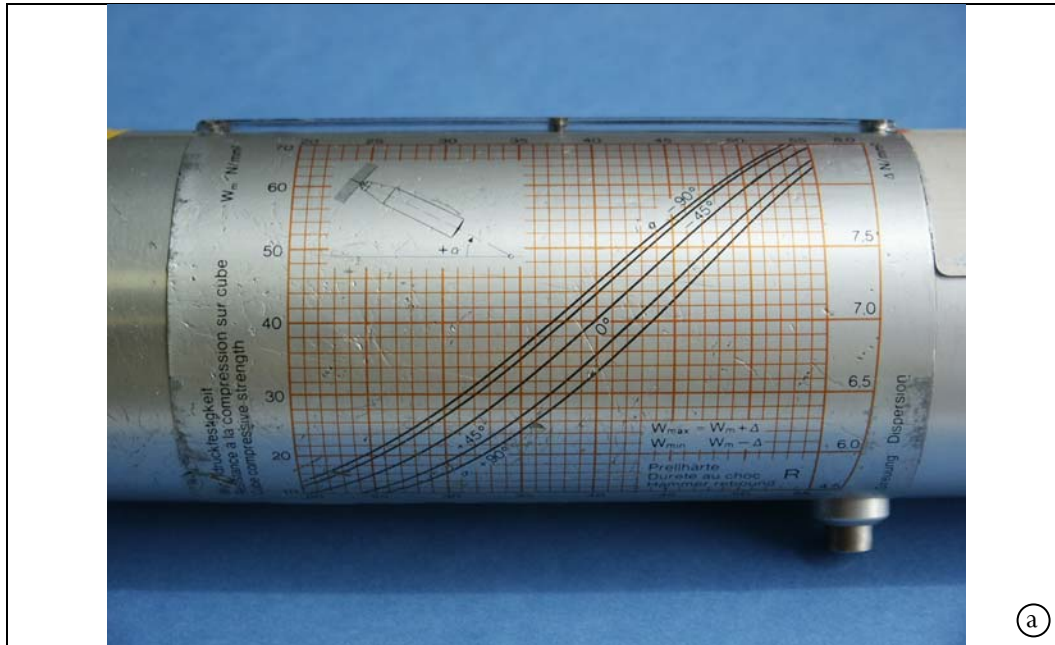


Figura 5.10. Diagrama calibrador del aparato en imagen real (a) y esquema ilustrativo (b) que permite en función de la posición determinar los valores de índice esclerométrico o de rebote del material.



La exploración esclerométrica es realmente un ensayo superficial pues, de hecho, los datos que se obtienen corresponden al comportamiento del material en una profundidad no superior a los 4 cm, y su extrapolación o extensión al resto del material exige una buena homogeneidad del mismo y la ausencia de defectos y discontinuidades superficiales.

Recogemos algunas de las precisiones referentes al uso del esclerómetro que, por la naturaleza del material (marmóreo en este caso) y tipo de probetas disponibles, nos son más aplicables:

El material deberá estar seco; en otro caso se obtendrán resultados anómalamente bajos.

La superficie sobre la que se aplica el esclerómetro deberá estar perfectamente lisa y limpia. Así mismo, se evitarán zonas donde puedan existir grietas o coqueas que darán resultados inferiores a los reales.

Hay que mantener una distancia mínima de 4 cm entre cada dos puntos consecutivos de aplicación y nunca se harán dos aplicaciones sobre el mismo punto, pues, por experiencia, se sabe que se obtienen valores erróneamente más altos.

Para controlar la igualdad de características del aparato medidor a lo largo del tiempo y periódicamente durante la realización del ensayo, se ha realizado el tarado mediante el golpeo sobre un yunque de tarado, considerando la comprobación correcta cuando las diferencias obtenidas no sean superiores a dos unidades.

Dado que las normalizaciones demandan probetas con dimensiones mínimas del orden de 20 cm según las distintas direcciones a fin de evitar que el efecto que un impacto anterior pueda tener en la medida siguiente en otra dirección, y nosotros disponer sólo de probetas de 15x5x5 cm, se ha optado por medir exclusivamente según la dirección de mayor dimensión de la probeta (L), esto es, se han efectuado dos medidas: una en cada una de las caras inferior (base) y superior de la probeta.

Hemos sometido a medidas de dureza superficial mediante el esclerómetro a 5 probetas de 5x5x15 cm de cada uno de los tres grupos A, B y C no sometidas a ciclos de enfriamiento-calentamiento, y a 5 probetas de cada uno de los grupos citados tras ser sometidas cada una de ellas a “50” ciclos de calentamiento a 100°C y enfriamiento a -20°C aproximadamente.

El ensayo se realizó en una cámara a temperatura constante de 20°C, todo ello acogiendo las recomendaciones que al respecto recoge la norma UNE 83-307-86 de determinación del Índice de Rebote para hormigón.

El aparato empleado ha sido un Esclerómetro Schmidt N/L, perteneciente a la empresa CECH S.L. (Granada).

## 5.11. ENSAYO DE RESISTENCIA MECÁNICA. MÓDULO ELÁSTICO

Con la realización de este ensayo se pretende evaluar el módulo elástico correspondiente al material de estudio, y en que medida puede verse modificado dicho módulo una vez aplicados los distintos ciclos de estrés térmico. Para evaluar estos comportamientos, las probetas objeto de estudio son sometidas a un esfuerzo progresivo mediante la aplicación de una carga por una prensa hidráulica, hasta su rotura.

La deformación inducida sobre un cuerpo debida a la acción de un campo de fuerzas exteriores puede ser elástica o plástica. La deformación es elástica cuando el cuerpo recupera su forma y volumen iniciales una vez finalizada la acción de las fuerzas externas. Si la deformación permanece, una vez que ha terminado la aplicación de fuerzas, se denomina plástica. Estos dos factores están determinados por la naturaleza del material, de la temperatura, y de la tasa de deformación a la que ha sido sometido.

El ensayo de módulo elástico se realiza mediante una prensa que registra el esfuerzo compresor aplicado sobre una probeta de material en una dirección del espacio, y la deformación lineal inducida. El esfuerzo es igual a la fuerza aplicada por sección o superficie según la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S} \quad (5.18)$$

Donde  $F_1$  es la fuerza aplicada longitudinalmente (expresada en Newtons, Dinas o Kilogramos-fuerza) y  $S$  es la sección de la probeta (expresada en  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$ ), por lo que el resultado final se expresa en  $\text{N/m}^2$ ,  $\text{Dinas/cm}^2$  o  $\text{kg/m}^2$ .

La deformación lineal o cambio de longitud experimentado por la probeta, se calcula a partir de la ecuación:

$$\epsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.19)$$

Donde  $l_0$  es la longitud original y  $l_1$  es la longitud final, expresadas en m., cm, o mm. por lo que  $\varepsilon_1$  es adimensional.

Como se comentó anteriormente, para estudiar el comportamiento mecánico de los materiales, se somete a los mismos a esfuerzos progresivos, registrando de forma paralela la deformación resultante.

Estos datos se expresan en diagramas esfuerzo-deformación como el que muestra la Figura 5.11. En la misma se puede observar un primer tramo de la línea donde el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Este comportamiento se describe por la Ley de Hooke, aplicable a pequeñas deformaciones hasta el denominado límite de proporcionalidad (Figura 5.11, punto a). En este tramo los materiales presentan un comportamiento elástico, es decir, si dejamos de aplicar el esfuerzo compresor lentamente, el material recuperará su longitud inicial. Superando este punto, existe un tramo curvo de la línea donde el comportamiento del material es elástico, aunque no se observe ya una proporcionalidad lineal entre el esfuerzo y la deformación. Este tramo está representado en la Figura 5.11 por la sección a-b, donde el punto b define el límite elástico de un material. Superado este punto, la deformación aumenta rápidamente, de manera que si se deja de aplicar el esfuerzo compresor lentamente el material ya no recuperará su estado original (decimos que el material presenta un comportamiento plástico), sino que mantendrá una deformación permanente cuyo valor viene dado por el punto de corte entre la paralela a la línea que define la Ley de Hooke desde el punto en cuestión, y el eje de abscisas.

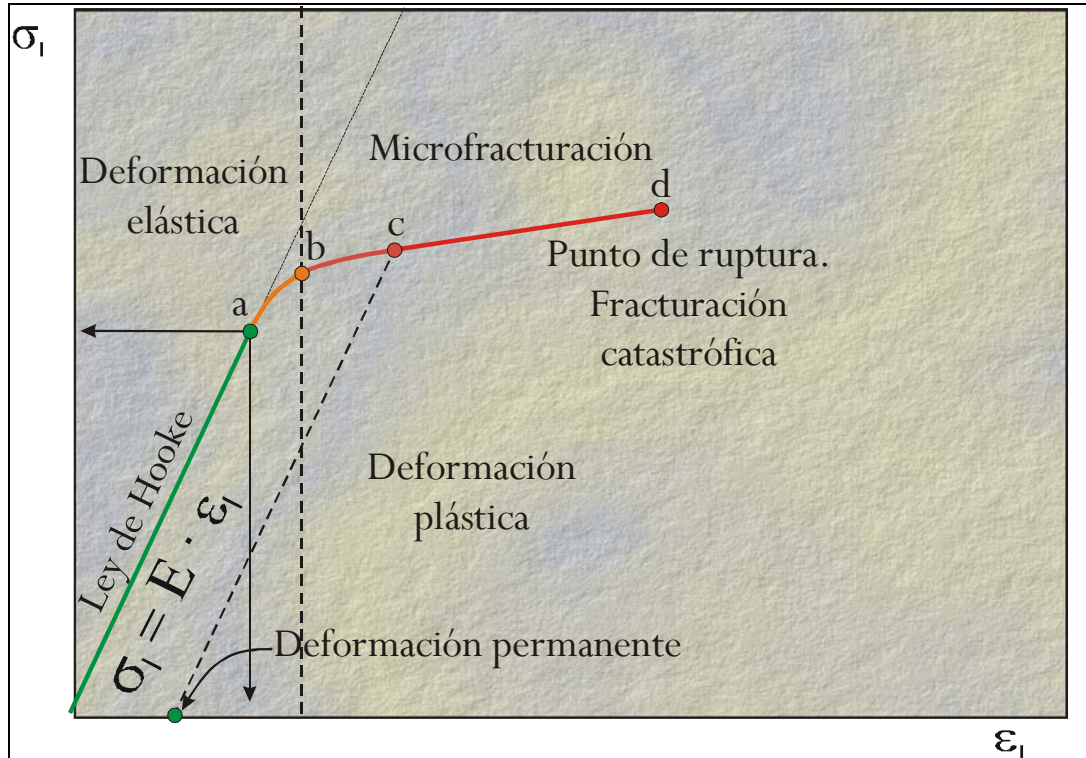


Figura 5.11. Curva esfuerzo-deformación, con ilustración de los tramos elástico y plástico, tomado de Durán Suárez (1995).

A partir del punto c de la curva se producen fenómenos de microfracturación, y seguidamente (punto d) una fracturación catastrófica de la probeta sometida a los esfuerzos de compresión.

La proporcionalidad entre el esfuerzo ( $\sigma_1$ ) y la deformación ( $\epsilon_1$ ) en el tramo de la Ley de Hooke permite definir el Módulo de Young (E), o módulo de elasticidad. Este módulo es la constante de proporcionalidad, que se obtiene mediante el cálculo de la pendiente de la curva, dentro del periodo elástico o bien a partir de la ecuación:

$$E = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \quad (5.20)$$

Donde E posee las mismas dimensiones que el esfuerzo (MPa). El valor del módulo de elasticidad es característico para distintos materiales, por lo que puede utilizarse para comparar las características mecánicas de los mismos.

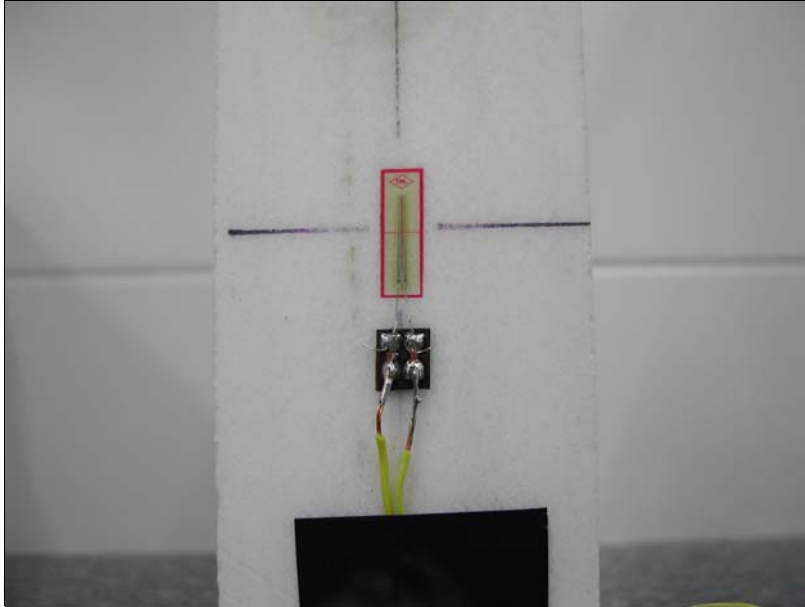
Como expresión de la utilidad de esta técnica en el campo de los materiales relacionados con el Patrimonio, destacar a título de ejemplo los trabajos de investigación realizados por: Suárez del Río et al. (1984), Zezza U. (1990), Zezza et al. (1992), Jacobs et al. (1995), Al-Lahyani et al. (1995), Durán et al. (1998), Theocaris (1999), Burlini et al. (2000), Chen et al. (2001), Monteiro et al. (2001), Zhang et al. (2001).

La metodología empleada para la realización de este ensayo en nuestro caso se ha regido según la norma UNE 22-187-85 (Mármoles y calizas ornamentales. Módulo elástico), el número de muestras ensayadas ha sido de 45, distribuidas en tandas de 15 probetas para cada uno de los 3 grupos estudiados (A, B y C) y sometidas a los distintos ciclos de estrés térmico. Las dimensiones son 14x5x5 cm; estas dimensiones se han ajustado a la relación altura/diámetro propuesta por la norma, cuyos valores deben estar comprendidos entre 2 y 2,5.

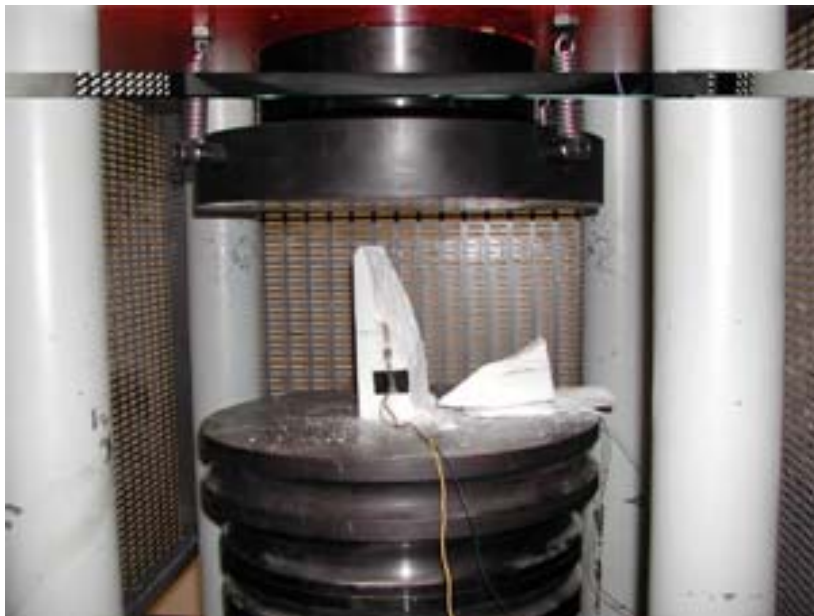
Para la medición de la deformación se han empleado dos bandas extensiométricas (TML PFL 10-11) colocadas paralelamente al eje en lados opuestos de la probeta, obteniéndose el promedio de ambas deformaciones. Las bandas se han pegado con adhesivo (Cianocrilato TML CN, para superficies no porosas) a la superficie acabada con lija de grano 1.000, cuidando la manipulación de estas, de modo que no lleguen a tocarse con los dedos (Figura 5.12).

La prensa utilizada en este ensayo ha sido una IBERTEST MEH 2000 CO perteneciente al Centro Tecnológico del Mármol (Cehegín, Murcia). Posee unas características de carga regulables que oscilan desde 2 kN hasta 2000 kN, ofreciendo un registro continuo de dos parámetros: esfuerzo (MPa) y deformación (mm/m), hasta la rotura de la probeta (Figura 5.13). La velocidad de carga aplicada ha sido de  $\approx 0,7$  MPa/s.

Para la elaboración de los resultados, se han registrado de forma continuada los valores de esfuerzo y deformación de cada probeta, hasta que esta se ha roto. A continuación se han representado en una gráfica tensión unitaria/deformación para cada probeta ensayada, obteniendo el módulo elástico mediante el cálculo de la pendiente media del tramo recto más largo posible, por correlación lineal, eligiéndose para ello los extremos de dicho tramo. En consecuencia, los resultados que se han obtenido son: valores de módulo elástico (MPa) y curvas esfuerzo deformación, para cada una de las probetas ensayadas.



*Figura 5.12. Detalle de colocación de las bandas extensiométricas en una de las caras de la probeta para la realización del ensayo de determinación del módulo elástico.*



*Figuras 5.13. Detalle de rotura de una probeta en el ensayo de determinación del módulo elástico.*

## 5.12. COLORIMETRÍA

Entre las técnicas de estudio desarrolladas, se ha considerado conveniente la catalogación colorimétrica del material marmóreo de cantera.

La determinación instrumental del color de materiales en el campo de la conservación-restauración del patrimonio se ha convertido en una herramienta imprescindible. No podemos obviar que en una obra artística o monumental el aspecto estético es algo implícito e indisoluble de cualquier otra función, de ahí la necesidad de evaluar con la mayor precisión y objetividad el impacto colorimétrico que productos, intervenciones o material de reposición puedan provocar. La proliferación por tanto de trabajos sobre estudios instrumentales del color en Patrimonio es continua; baste citar por recientes y próximos los trabajos de Zezza et al. (1992), Durán Suárez et al. (1995), Durán Suárez et al. (1998), Cultrone et al. (2000), Durán Suárez et al. (2000), Esbert et al. (2002), Toniolo et al. (2002), Grossi et al. (2003). Así mismo en Durán Suárez (1996) podemos encontrar una completa recopilación y exposición de los fundamentos y principales métodos colorimétricos, y su aplicación al campo de consolidantes y protectivos.

En nuestro caso, dado que se trata de un material blanco con un cierto desarrollo de bandas grisáceas en ciertas zonas, es más que suficiente tratar de forma exclusiva con los llamados “índices de blancura”, obviando la utilización explícita de coordenadas de cromaticidad referidas a algún sistema de representación del color específico.

De los posibles índices de blancura (WI) admitidos por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), (Wyszecky, 1982) en principio planteamos la utilización de los siguientes: Z%, CIE1931, y E313.

1) Índice de blancura Z%.

$$WI_{Z\%} = \frac{Z}{Z_n} \times 100 \quad (5.21)$$

donde Z es el componente valor triestímulo CIE1931 de la muestra y  $Z_n$  es el correspondiente valor triestímulo CIE1931 del iluminante de referencia utilizado. La aplicación de este índice de blancura es frecuente en la industria del papel, así como en estudios de blancura en dentaduras humanas.

2) Índice de blancura CIE1931.

$$WI_{CIE1931} = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y) \quad (5.22)$$

donde  $x$ ,  $y$ ,  $Y$  son las coordenadas de cromaticidad CIE1931 de la muestra y  $x_n$ ,  $y_n$  las del iluminante empleado (p.e. para el iluminante CIE D<sub>65</sub>,  $x_n = 0,3138$ ,  $y_n = 0,3309$ ).

Cuanto más próximo sea el “blanco” de la muestra al “blanco perfecto” (dado por las coordenadas de cromaticidad del estímulo que presente un valor de reflectancia unidad en todo el espectro visible) tanto más próximo será  $WI_{CIE1931}$  al valor 100.

3) El índice de blancura E313 es igualmente función de  $Z\%$  y de la luminancia relativa  $Y$ , siendo la ecuación que lo define la siguiente:

$$WI_{E313} = 4Z\% - 3Y \quad (5.23)$$

El material usado, de acuerdo con el planteamiento global de esta memoria ha sido material procedente de cantera y en concreto el clasificado en los distintos grupos (A, B y C) sometido a los distintos ciclos de estrés térmico, siendo un total de 75 probetas las estudiadas.

Las medidas colorimétricas se han obtenido con un espectrofotómetro marca Hunter Lab. Ultrascan, perteneciente al Departamento de Óptica de la Universidad de Granada, cuyas características fundamentales son: rango de medición entre 375 y 750 nm, a intervalos de 5 nm; precisión en longitud de onda  $\pm 0,5$  nm; sistema de iluminación por haz de luz continuo; medición de color por reflectancia; precisión o repetitibilidad del 99,94% (entre 680 y 750 nm), del 99,96% (entre 430 y 680 nm) y del 99,85% (entre 380 y 430 nm).

Las medidas se han efectuado usando el iluminante D<sub>65</sub>.



# **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



# 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 6.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA Y QUÍMICA

Se exponen a continuación los datos de composición mineralógica y química del material de cantera posteriormente sometido a ciclos de calentamiento-enfriamiento, así como del material marmóreo desprendido de la parte superficial de diversas columnas del Patio de los Leones. Como ya se expuso, las muestras del Patio analizadas químicamente corresponden a las columnas 8, 13, 24, 40 y 106, y las muestras BLANCA y GRIS corresponden a probetas de cantera, sin mineralización en el primer caso, y abundante mineralización gris en el segundo.

Así mismo, el estudio mineralógico del material de cantera mediante microscopía óptica se ha efectuado sobre láminas delgadas de material sin mineralización gris visible (probetas tipo A), y de material con gran concentración de mineralización gris (probetas tipo C) sometidas a los distintos ciclos de estrés térmico.

El estudio mediante microscopía de luz polarizada pone de manifiesto que el material de las probetas A (Figuras 6.1 y 6.2) está compuesto casi exclusivamente por

calcita, y minoritarias cantidades de cuarzo y moscovita, y algunos cristales aislados de feldespato. La microestructura es de tipo granoblástico, variando desde equigranular, con grano de gran tamaño, hasta grano medio-fino heterogranular.

Por su parte, en las láminas con alta proporción de bandeo grisáceo (Figuras 6.3, 6.4 y 6.5) además de los minerales anteriormente citados se observa la presencia de epidota, titanita y menas metálicas opacas (pirita) fundamentalmente, que se concentran en niveles paralelos de espesor milimétrico.

El estudio óptico de las láminas de material de cantera sometido a los distintos ciclos de estrés térmico mediante microscopía óptica no ha permitido observar variaciones de composición mineralógica ni diferencias en cuanto a la disposición de los granos, posibles fracturas, separaciones intergranulares, etc. (Figura 6.6 y 6.7).

Por otra parte, y de forma general se observa un cierto alargamiento morfológico de los cristales de calcita.

El estudio de Difracción de Rayos X (método de polvo) de las muestras BLANCA y GRIS indica, en términos concordantes con el estudio óptico, para la muestra BLANCA la presencia de calcita y algo de cuarzo (Figura 6.6) mientras que en el difractograma de la muestra GRIS (Figura 6.7) es detectable, además de las citadas fases minerales, la presencia de mica (la técnica no permite detectar fases muy minoritarias).

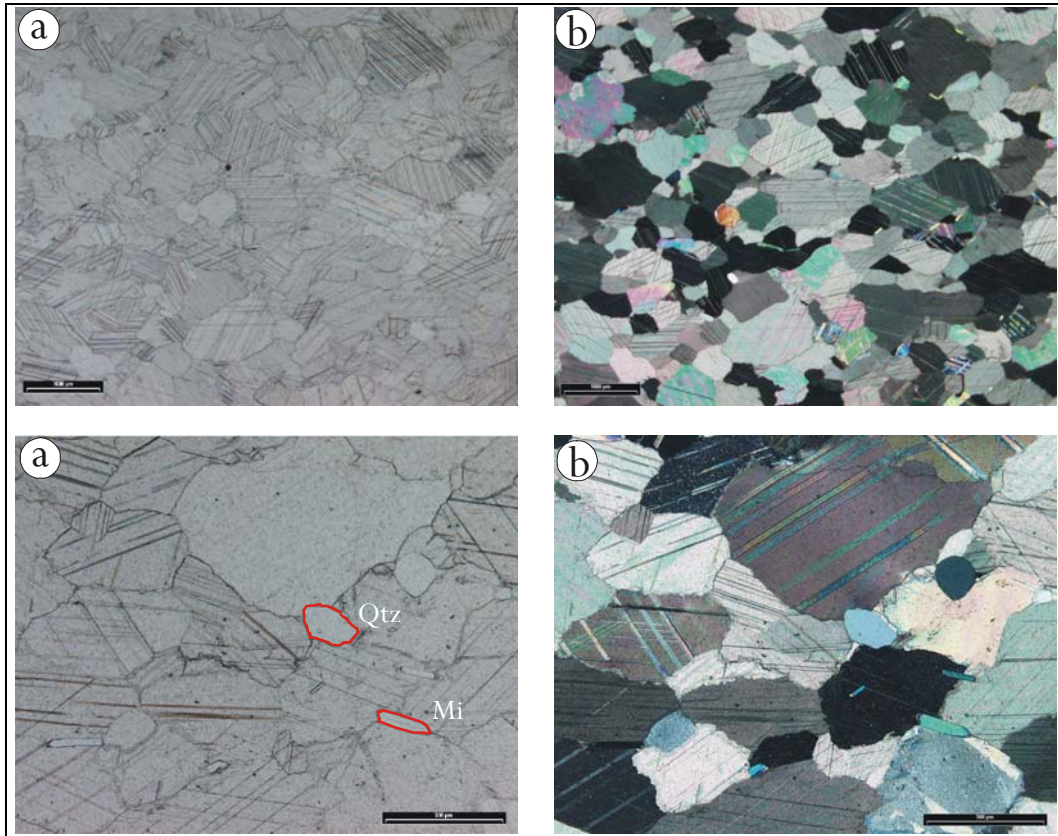


Figura 6.1 (superior). Vista general de la muestra blanca (material grupo A, "0" ciclos) compuesta casi exclusivamente por calcita que presenta una clara textura granoblástica. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 1000  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.2 (inferior). Vista de detalle de minerales accesorios (cuarzo y mica) nótese el alargamiento coincidente de los cristales de mica incolora y de calcita. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

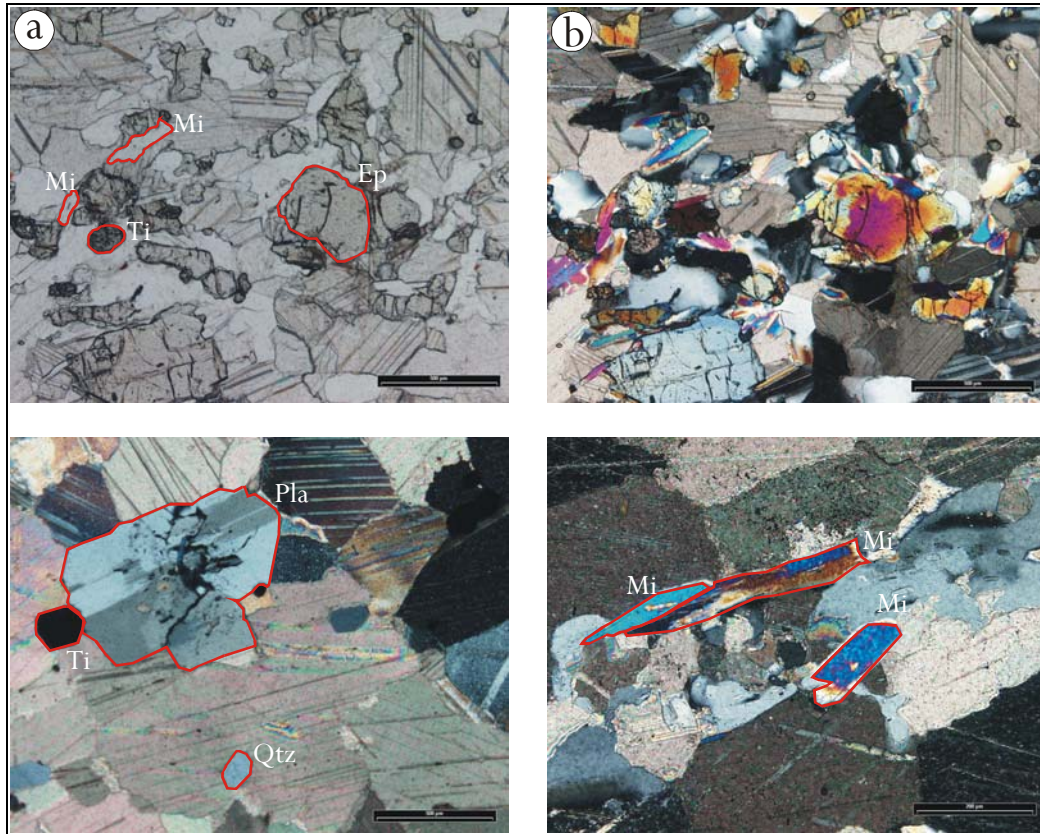


Figura 6.3 (superior). Vista general de la concentración de minerales accesorios (epidota y titanita fundamentalmente) en niveles oscuros de la muestra gris. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.4 (inferior izquierda). Vista de detalle de minerales accesorios (pirita, plagioclasa y cuarzo en niveles oscuros (polarizadores cruzados). (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.5 (inferior derecha). Vista de detalle de la orientación preferencial de cristales de mica incolora coincidentes con el alargamiento de los cristales de calcita (polarizadores cruzados). (Longitud de la escala 200  $\mu\text{m}$ ).

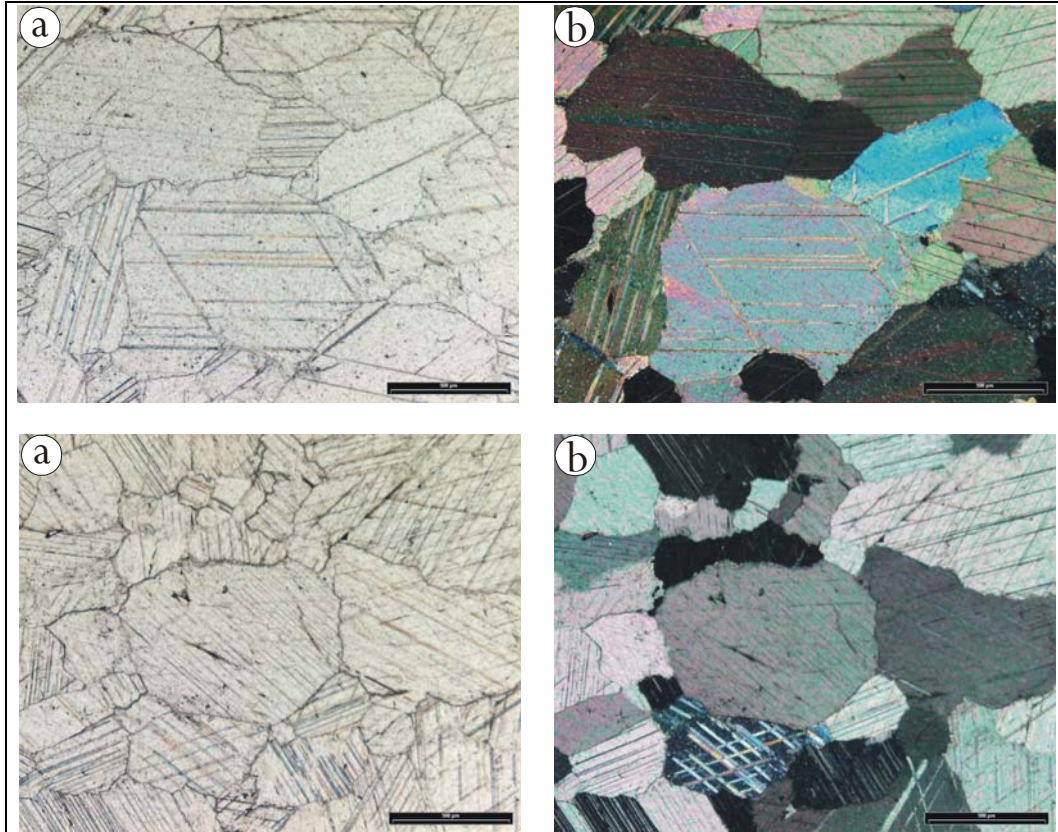


Figura 6.6 (superior). Vista general de una muestra del grupo A no sometida a ciclos de estrés térmico. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.7 (inferior). Vista general de una muestra del grupo A sometida a "200" ciclos de estrés térmico. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

Nótese que no se aprecian diferencias significativas salvo las derivadas del relieve provocado por la diferencia de orientación óptica de los cristales de calcita y del espesor de la preparación.

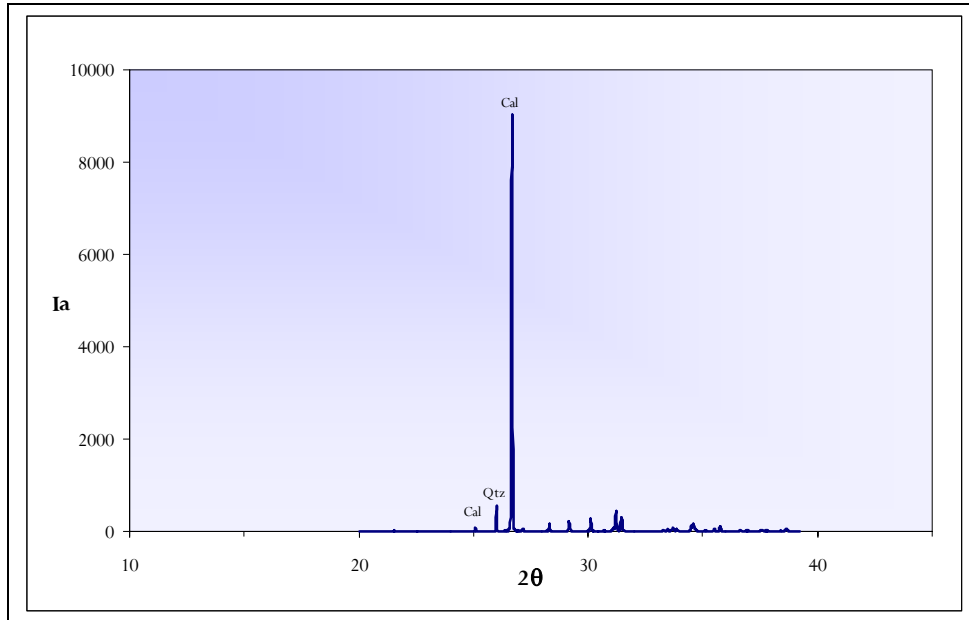


Figura 6.6. Registro de difracción de rayos X (DRX) de la muestra blanca. Las siglas de los minerales adoptan la nomenclatura de Kretz (1983): Cal= calcita; Qtz= cuarzo.

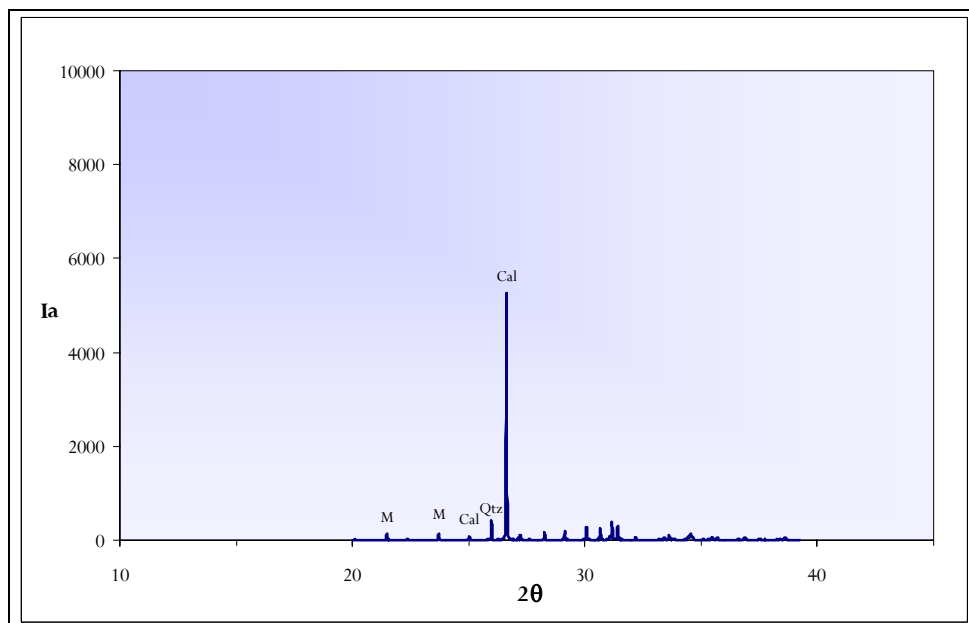


Figura 6.7. Registro de DRX de la muestra gris. Las siglas de los minerales adoptan la nomenclatura de Kretz (1983): Cal= calcita; Qtz= cuarzo; M= mica.



Por lo que respecta al material desprendido de las columnas, el estudio de las muestras (Figuras 6.8, 6.9 y 6.10) revela en la superficie externa la presencia de una capa muy fina de espesor variable (entre 20-50  $\mu\text{m}$ ), color ocre que presenta un frente de penetración muy uniforme y de trazado continuo. Está constituida por calcita microcristalina, constituyendo una matriz fina y que llega a constituir especie de glóbulos, consecuencia probablemente, de la disolución y posterior reprecipitación del  $\text{CaCO}_3$  del mármol. Esta capa presenta una coloración ocre debido a la presencia de hidróxidos de hierro.

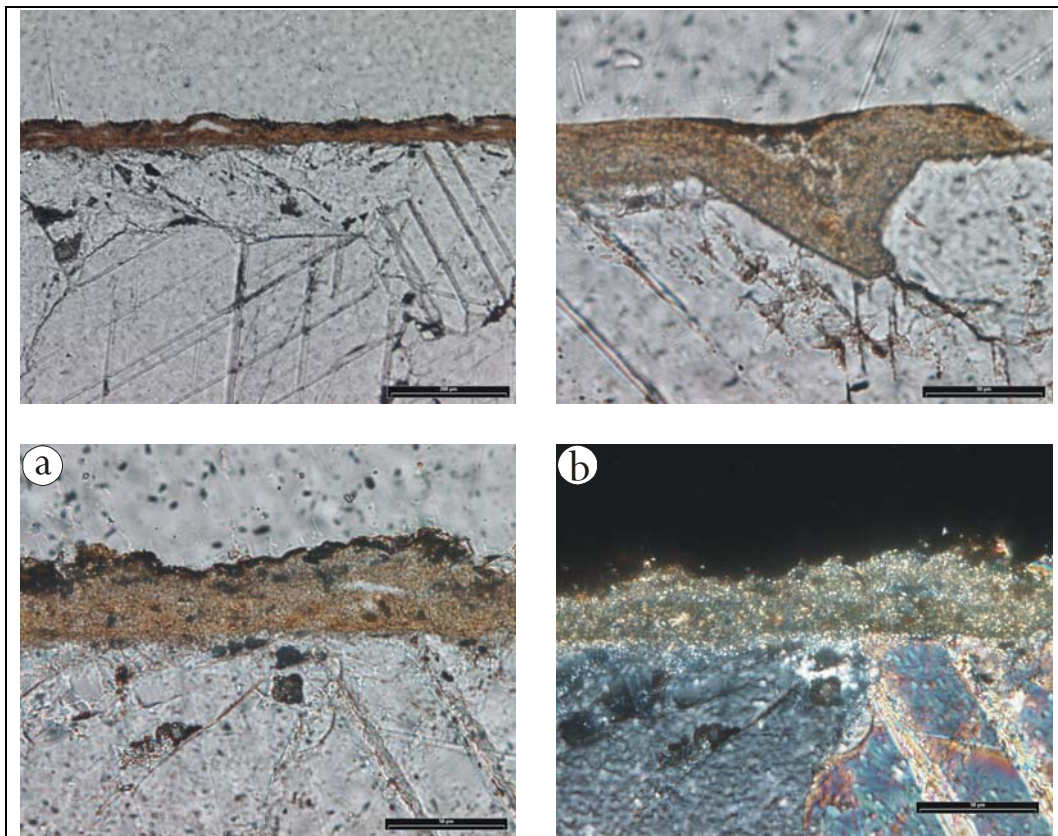


Figura 6.8 (superior izquierda). Sección transversal de una escama de la columna n° 24. Se aprecia la existencia de una capa externa color ocre. (1 polarizador). (Longitud de la escala 200  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.9. (superior derecha). Vista detalle de la zona de contacto entre la capa externa ocre y el material de la columna. (1 polarizador). (Longitud de la escala 50  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.10. (inferior). Capa externa ocre constituida fundamentalmente por calcita microcristalina e hidróxidos de Fe. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 50  $\mu\text{m}$ ).

Por otra parte el resto de la muestra se revela como un mármol calcítico muy puro, de textura granoblástica heterogranular. Se observa que el desprendimiento del material ocurre principalmente en las superficies de contacto entre los granos, desprendimiento que tiene lugar desde una zona bastante más interna a la de la mencionada delgada capa de alteración superficial. En las Figuras 6.11 y 6.12 se ilustra lo anteriormente expuesto.

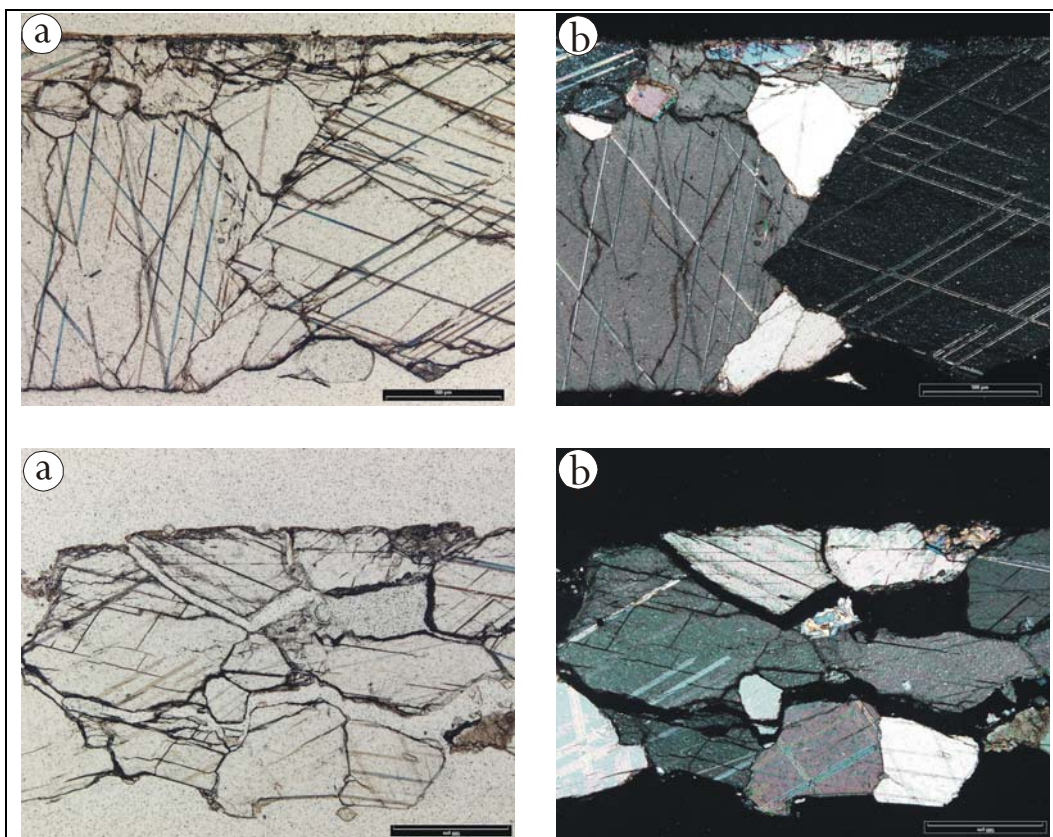


Figura 6.11. (superior). Sección transversal de la escama de la columna n° 13. Se aprecia una incipiente desagregación del material en la superficie de contacto entre los granos de calcita. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

Figura 6.12. (inferior). Sección transversal de la escama de la columna n° 8. Se observa una evolución en el proceso de desagregación favorecida por la preparación de la lámina delgada. (a) un polarizador, (b) polarizadores cruzados. (Longitud de la escala 500  $\mu\text{m}$ ).

La única diferencia apreciable entre el material de cantera y el de las columnas es la presencia de la mencionada pátina superficial en estas últimas (Figuras 6.11 y 6.12).

En cuanto a la composición química, en la Tabla 6.1 se recogen los resultados del análisis químico de elementos mayoritarios de las seis muestras correspondientes al material desprendido de las columnas, y a las muestras BLANCA y GRIS procedente de la cantera.

*Tabla 6.1. Elementos mayoritarios (% óxidos) correspondientes al material de las columnas y a las muestras de material de cantera BLANCA y GRIS.*

Muestra	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
A1	53,40	0,82	0,14	2,00	0,80	0,03	0,11	0,02	0,04
A2	55,00	0,36	0,04	1,32	0,06	<0,01	0,13	0,01	0,05
A3	55,20	0,36	0,01	1,42	0,07	<0,01	0,04	0,01	0,06
A4	54,70	0,42	0,04	1,33	0,06	<0,01	0,04	0,01	0,07
A5	55,10	0,52	0,11	1,30	0,07	0,03	0,08	0,02	0,04
A6	55,30	0,21	<0,01	1,27	0,07	<0,01	0,03	0,01	0,04
BLANCA	56,10	0,27	0,08	0,75	0,02	0,02	0,06	<0,01	<0,01
GRIS	49,10	6,12	3,05	0,89	0,04	0,72	0,89	0,15	0,03

Estos resultados confirman que en todos los casos se trata de un mármol muy puro. Por otra parte, los contenidos algo elevados en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las columnas pueden explicarse por la citada presencia de cuarzo y micas en la capa superficial de alteración. La presencia de estos minerales puede deberse a factores de tipo ambiental y antrópico, es decir, tanto al polvo adherido superficialmente e incluido en la capa más externa en el proceso de disolución del mármol por el CO<sub>2</sub> atmosférico, como debido a las impregnaciones que con “agua barro” se aplicaban a las zonas descarnadas de las columnas para amortiguar las diferencias de coloración. En el material de probeta ya se ha comentado la presencia de micas, epidota, cuarzo y menas en la muestra GRIS lo que explica las diferencias con la BLANCA.

El contenido “anómalo” de  $P_2O_5$  para un mármol encontrado en las columnas debe corresponderse con la presencia abundante de excrementos de aves en las columnas y Patio en general.

En la Tabla 6.2.A y 6.2.B se recogen los resultados del contenido en una serie de elementos minoritarios en el material marmóreo desprendido de las citadas columnas y en el de cantera. En términos generales los valores para el material de las columnas, o son coincidentes con los correspondientes al material de las probetas tipo A, o se sitúa en valores intermedios entre este y los del tipo C (muestra GRIS) por lo que estos contenidos, teniendo en cuenta además la presencia de minerales detríticos y oxihidróxidos de Fe en la capa más superficial, están dentro de los valores normales de mármoles en general, y de los distintos tipos de mármoles blancos de Macael. Puede quizás tenerse en cuenta el valor algo alto en Pb comparado con el análisis de las muestras BLANCA y GRIS, y que puede ser indicativo de un cierto nivel de contaminación ambiental por combustión de derivados del petróleo (gasolinas).

*Tabla 6.2.A. Elementos minoritarios (ppm) en muestras correspondientes al material de las columnas y a las muestras de material de cantera BLANCA y GRIS.*

Elemento	A1	A2	A3	A4	A5	A6	BLANCA	GRIS
Rb	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	24
Cs	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Be	1,0	2,0	2,0	<1	<1	1,0	<1	<1
Sr	162	210	194	185	158	146	145	111
Ba	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	35
B	12,0	<10	<10	<10	<10	<10		
Sc	0,4	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1	1,8	4,9
V	15	15	15	13	12	<10	<10	23
Cr	3	4	3	2	4	2	4	20
Mn	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<40
Co	1	1	1	1	1	1	<1	2
Ni	7	7	5	2	6	6	15	25
Cu	7,3	3,8	7,8	6,4	4,2	2,6	5,3	5,3
Ag	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5		
Au	0,1	0,3	0,1	<0,1	0,2	0,3		
Zn	18,2	20,5	12,2	9,7	18,6	15,60	17,4	32,4
Cd	<1	<1	<1	<1	<1	<1		
Y	<10	14	<10	<10	<10	<10	<10	<10

Tabla 6.2.B. Elementos minoritarios (ppm) en muestras correspondientes al material de las columnas y a las muestras de material de cantera BLANCA y GRIS.

Elemento	A1	A2	A3	A4	A5	A6	BLANCA	GRIS
Nb	<10	<10	<10	<10	11	<10	<10	<10
Ta	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Zr	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	27
Hf	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Mo	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
W	<3	<3	<3	<3	<3	<3		
Ge	19	17	23	14	<10	<10		
Pb	7	15	16	10	13	24	1	1
As	<2	<2	<2	<2	<2	<2		
Sb	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2		
Se	<3	<3	<3	<3	<3	<3		
U	<0,5	0,6	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,7
Th	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2
La	1,4	0,9	0,8	0,8	2,1	0,7	2,0	5,8
Ce	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	12
Nd	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5
Sm	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,4	1,0
Eu	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Tb	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Yb	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,3	0,4
Lu	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Br	2	2	3	2	3	3		

## 6.2. CICLOS DE ENVEJECIMIENTO (ESTRÉS TÉRMICO)

Tal y como se comentó en el apartado de Materiales y Métodos las probetas se han sometido a sucesivos ciclos de calentamiento-enfriamiento. Tras cada ciclo se ha ido observando el posible deterioro de cada probeta (pérdida de material, variación de color, aspecto, etc.), así como la variación de peso tras el número de ciclos fijado para cada grupo de probetas.

En la Tabla 1 del Anexo 3 se recoge el peso de las probetas para “0” y los restantes ciclos (50, 100, 150 y 200) a que han sido sometidas según los casos. Se recogen así mismo las diferencias de peso experimentadas por las probetas tras cada bloque de ciclos tanto respecto a la pesada anterior ( $\Delta$ Peso parcial) como respecto a su peso inicial ( $\Delta$ Peso total). Se incluye además la densidad de cada probeta antes de someterlas a los ciclos de calentamiento-enfriamiento.

En cuanto a los cambios observados, lo más destacable ha sido una ligera pérdida de material en forma de polvo, acompañada de un redondeamiento de aristas y esquinas de las probetas. En bastantes casos se ha observado así mismo, según se incrementaba el número de ciclos, cierto amarilleamiento en zonas superficiales. Observando los valores medios de pérdida de peso de la Tabla 6.3 (Valores completos en la Tabla 1 del Anexo 3), y en concordancia con lo comentado anteriormente, se detecta un aumento de la pérdida de peso según se incrementa el número de ciclos. Este aumento es del mismo orden en los tres grupos, y tiene lugar de manera no uniforme pero análoga también en los tres grupos: vemos que tras “50” ciclos se produce el 50% de la pérdida total aproximadamente, se estanca entre “50” y “100” ciclos, y posteriormente aumenta tras “150” y “200” ciclos.

En la Figura 6.13 se han representado las variaciones porcentuales de peso, en la que puede observarse lo comentado al respecto.

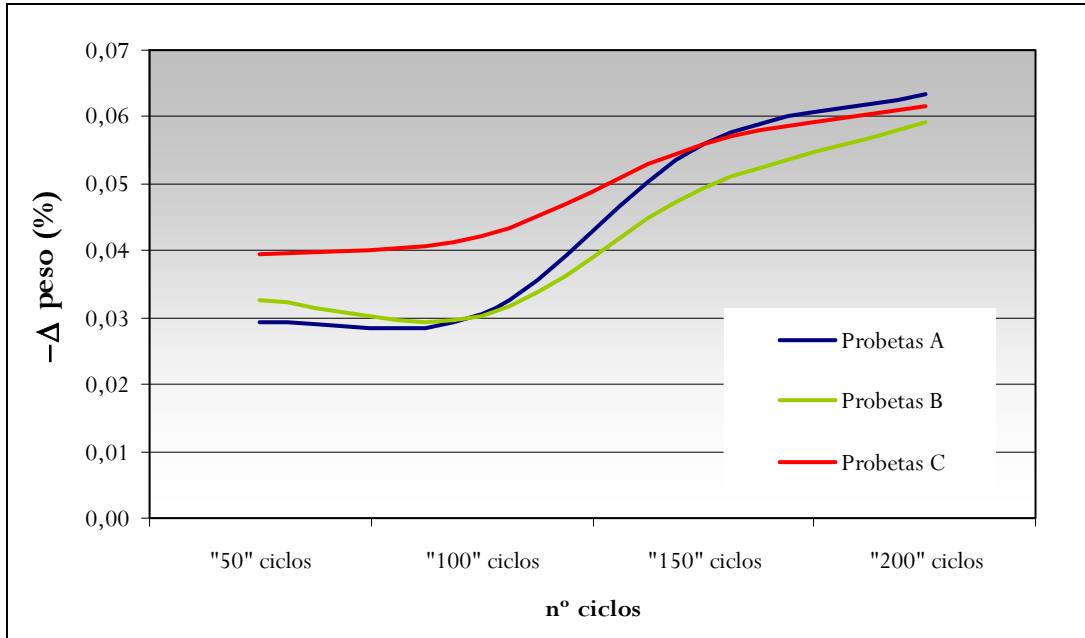


Figura 6.13. Pérdida de peso (%) para los grupos de probetas A, B y C, sometidos a los distintos ciclos (50, 100, 150 y 200).

Tabla 6.3. Valores medios de  $-\Delta$ peso (%) y desviación estándar (Std) para los distintos grupos de probetas en las distintas tandas de ciclos establecidas 50, 100, 150 y 200.

Nº ciclos	Grupo	$-\Delta$ peso Total (%)	Std.
"50" ciclos	A	0,03	0,11
	B	0,03	0,14
	C	0,04	0,09
"100" ciclos	A	0,03	0,13
	B	0,03	0,14
	C	0,04	0,11
"150" ciclos	A	0,06	0,09
	B	0,05	0,15
	C	0,06	0,15
"200" ciclos	A	0,06	0,09
	B	0,06	0,16
	C	0,06	0,18

### 6.3. ULTRASONIDOS

Se presentan y discuten a continuación los resultados de las medidas de velocidad de transmisión de pulsos ultrasónicos a través de los tres tipos de probetas (A, B y C), antes y tras los ciclos de calentamiento-enfriamiento establecidos.

Tal y como se expuso en el Capítulo de Materiales y Métodos, en cada probeta se han efectuado cinco medidas ( $VP_H$ ,  $VP_{F1}$ ,  $VP_{F2}$ ,  $VP_{L1}$  y  $VP_{L2}$ , según Figura 5.4).

#### *Material no tratado*

En la Tabla 1 del Anexo 4 se recogen los valores de las cinco medidas de velocidad de transmisión de pulsos ultrasónicos de cada una de las 75 probetas de los tipos A, B y C posteriormente sometidas a ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Dado que en las probetas del grupo A la zonación gris es escasamente perceptible, (y en algunos casos nada), las direcciones F y L en este grupo serían mayoritariamente aleatorias.

En las Figuras 6.14 y 6.15 se presentan los valores medios de  $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$  (m/seg.) para cada uno de los grupos A, B y C.

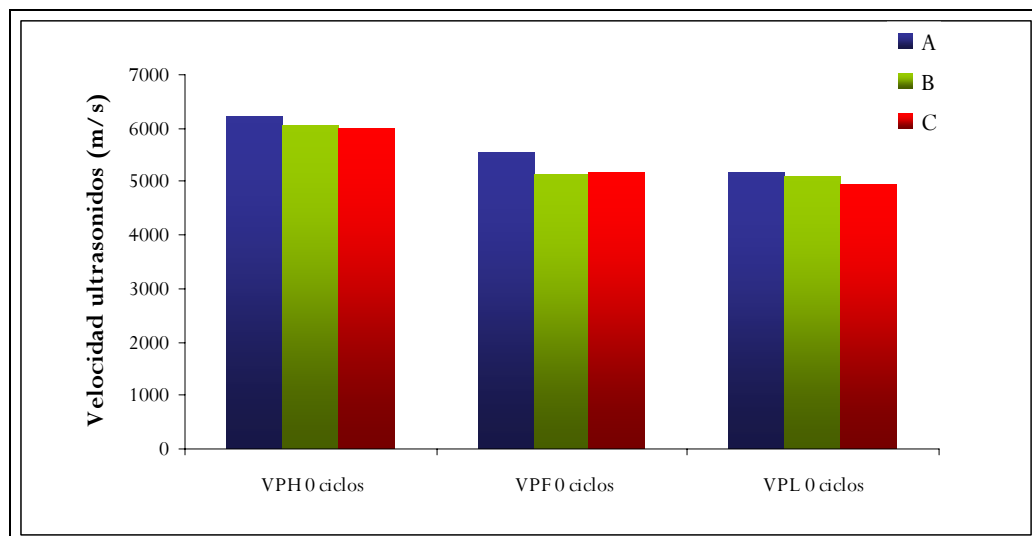


Figura 6.14. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en el material de cantera grupos A, B y C ("0" ciclos) según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ).



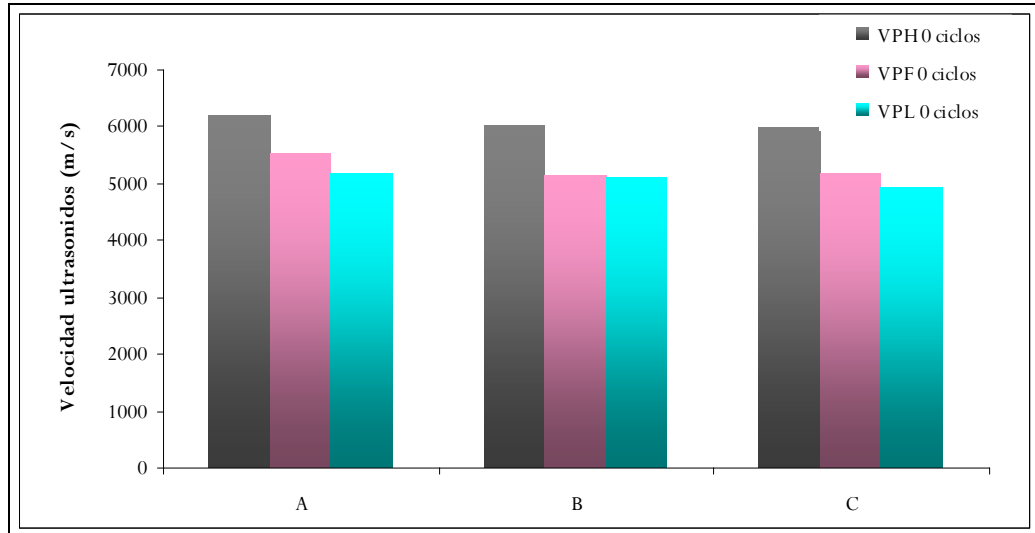


Figura 6.15. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas para cada uno de los grupos establecidos (A, B y C) según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ).

Los datos y sus representaciones nos ponen de manifiesto diversos hechos:

Considerando cada grupo de probetas, se observa como en todos  $VP_H$  es considerablemente mayor que la velocidad de propagación según las direcciones F y L. Análogamente, y en términos medios,  $VP_F$  es mayor que  $VP_L$  en los grupos B y C, aunque en este caso las diferencias son sensiblemente menores. Por otra parte las velocidades de propagación según cualquier dirección ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ) disminuyen ligeramente, y en términos generales, del grupo A, al B y C respectivamente, es decir, según aumenta el grado de zonación grisácea.

Centrándonos en los grupos B y C (probetas con abundante o muy abundante zonación) las diferencias medias de velocidad entre la dirección H y la L son de 923 y 1.044 m/seg para B y C respectivamente; las diferencias entre H y F son de 890 y 792 m/s, mientras que las diferencias entre F y L son de 33 y 252 m/s. Teniendo en cuenta que tanto H como F son direcciones paralelas a la zonación de mineralización grisácea no parece explicable en principio que ambas direcciones posean velocidades diferentes, y que estas diferencias deben estar originadas por otro factor ajeno al bandeo. Por otra parte, y dado que  $VP_H - VP_L$  es mayor que  $VP_F - VP_L$  deberíamos considerar que el “efecto común” de la zonación es el que viene determinado por el valor  $VP_F - VP_L$ , a lo cual parece apuntar el hecho de que las diferencias  $VP_F - VP_L$  sean mayores en las probetas C que en las B. En consecuencia la diferencia de comportamiento de las ondas ultrasónicas entre las direcciones F y L respecto a la H deben estar influenciadas además de por la anisotropía que aportan los bandeos grisáceos, por otros aspectos de anisotropía estructural o cristalográfica (orientaciones

preferenciales de los granos de calcita, de sus ejes cristalográficos, etc.), y cuya entidad, podríamos apuntar, vendría determinada por las diferencias  $VP_H - VP_F$ .

Respecto a los valores  $VP_F$  y  $VP_L$  en el grupo A como se ha indicado antes, en los casos en los que el bandeado gris no es nada perceptible, las direcciones F y L serán en principio aleatorias. No obstante, dado que sistemáticamente en todas y cada una de las probetas de este grupo, cuando el bandeado es mínimamente perceptible  $VP_F$  es mayor que  $VP_L$ , se ha optado por considerar en aquellas donde el bandeado no es perceptible,  $VP_L$  como el valor de velocidad mínimo.

### ***Material tratado***

En la Tabla 1 del Anexo 4 se recogen los datos de velocidad de propagación de ultrasonidos para las probetas sometidas a los diversos ciclos de calentamiento-enfriamiento.

En la Tabla 6.4 se presentan los valores medios de  $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$  con sus respectivas desviaciones estándar para cada uno de los grupos A, B y C, y para los bloques de ciclos establecidos (0, 50, 100, 150 y 200). Se recoge asimismo la diferencia respecto a la velocidad a “0” ciclos, y dicha diferencia en %.

Tabla 6.4. Valores medios, desviación estándar y variaciones respecto del material no sometido a ciclos (total y porcentual) de la velocidad de transmisión de ultrasonidos (m/s) para los grupos de probetas A, B y C y las distintas tandas de ciclos a las que fueron sometidos.

Grupo	Nº Ciclos	VP <sub>H</sub> (m/s)	Std.	Δ	%	VP <sub>F</sub> (m/s)	Std.	Δ	%	VP <sub>L</sub> (m/s)	Std.	Δ	%
A	“0”	6.20	141			5.53	191			5.17	245		
	“50”	3.50	149	2.68	43,3	2.75	331	2.77	50,1	2.40	344	2.76	53,4
	“100”	3.51	152	2.66	42,9	2.83	362	2.69	48,6	2.32	334	2.85	55,1
	“150”	3.64	162	2.55	41,2	2.84	390	2.68	48,5	2.32	304	2.84	55,1
	“200”	3.67	124	2.53	40,8	3.10	421	2.42	43,8	2.53	259	2.63	51,0
B	“0”	6.02	153			5.13	212			5.10	181		
	“50”	3.47	334	2.55	42,3	2.75	298	2.37	46,3	2.26	302	2.83	55,7
	“100”	3.78	403	2.23	37,1	2.86	363	2.26	44,2	2.48	354	2.61	51,3
	“150”	3.56	171	2.45	40,8	2.72	320	2.41	47,0	2.45	205	2.64	51,8
	“200”	3.66	124	2.36	39,2	2.79	383	2.33	45,6	2.55	146	2.54	49,9
C	“0”	5.97	216			5.17	224			4.92	231		
	“50”	3.73	296	2.23	37,5	2.91	227	2.26	43,8	2.50	294	2.41	49,1
	“100”	4.04	239	1.92	32,3	3.00	262	2.17	42,1	2.67	296	2.25	45,7
	“150”	3.50	120	2.46	41,4	2.87	214	2.30	44,4	2.51	186	2.41	49,0
	“200”	3.58	203	2.39	40,0	2.83	248	2.34	45,2	2.45	196	2.46	50,1

En las Figuras 6.16, 6.17 y 6.18 se representan los valores de velocidad para cada grupo y nº de ciclos respectivamente. Así mismo en la Figura 6.19 se recogen estos valores de forma comparativa para cada grupo, nº de ciclos y dirección.

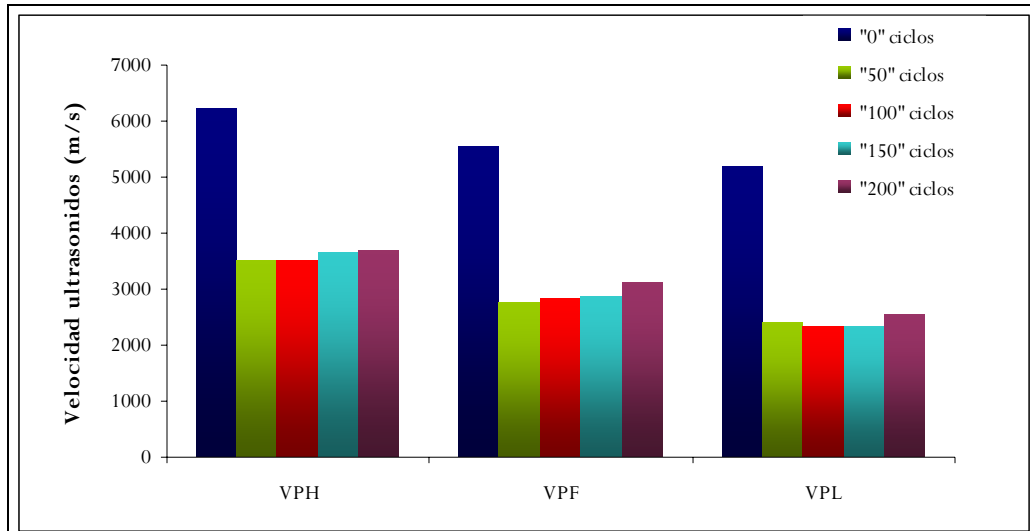


Figura 6.16. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en el material perteneciente al grupo A según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ) para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

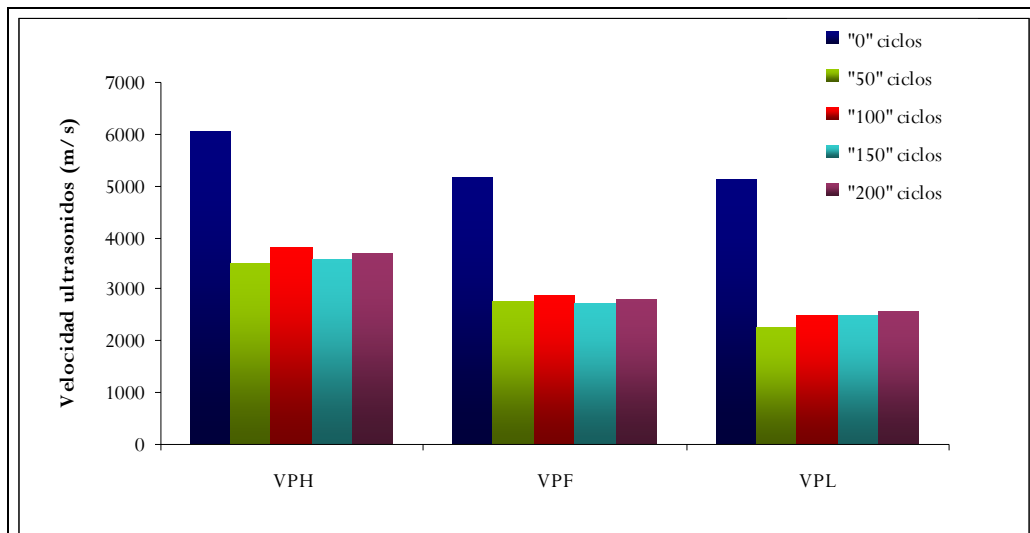


Figura 6.17. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en el material perteneciente al grupo B según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ) para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

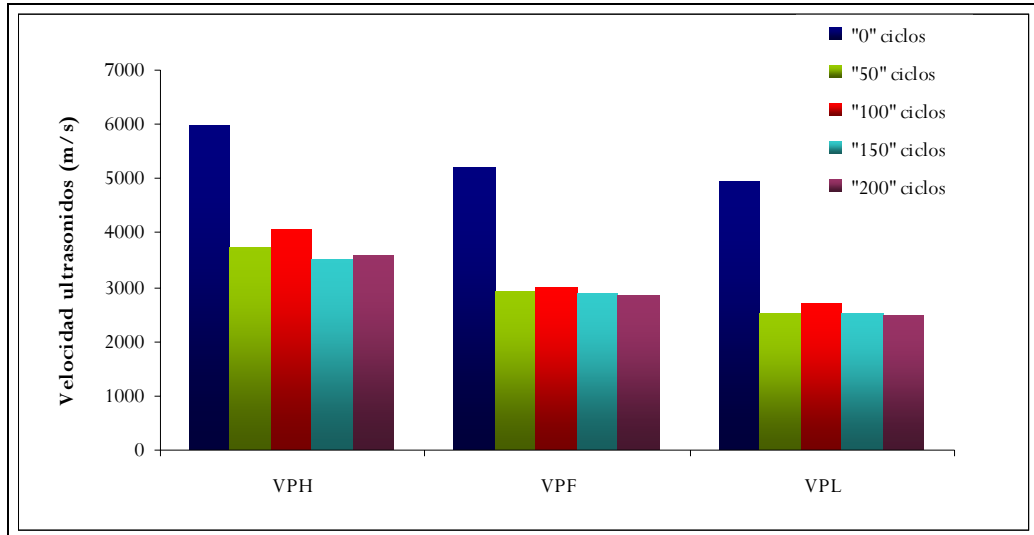


Figura 6.18. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en el material perteneciente al grupo C según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ) para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

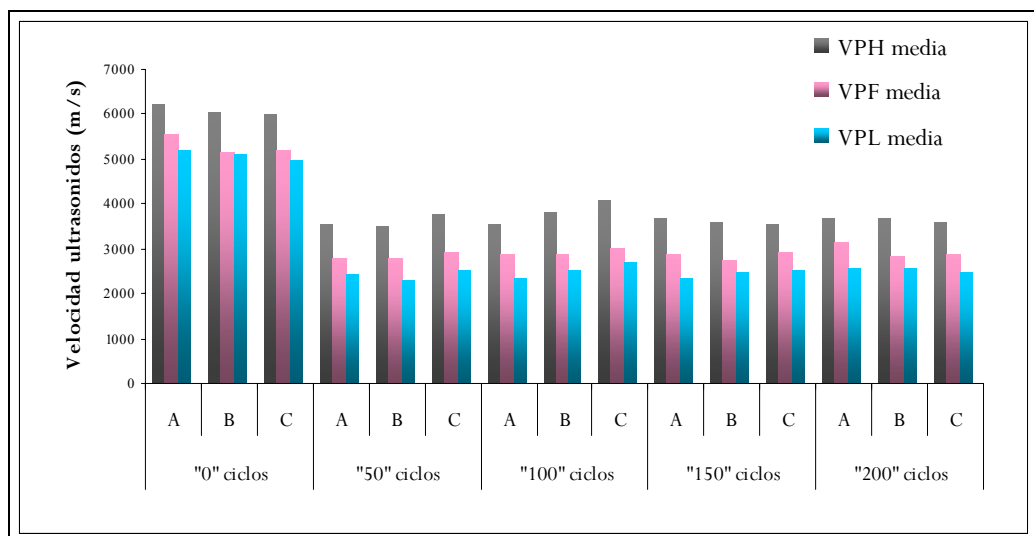


Figura 6.19. Variabilidad de la velocidad de transmisión de ondas elásticas en el material para cada uno de los grupos establecidos (A, B y C) según las tres direcciones analizadas ( $VP_H$ ,  $VP_F$  y  $VP_L$ ) para las tandas de ciclos (0, 50, 100, 150 y 200).

De los datos obtenidos y sus representaciones podemos comentar lo siguiente:

La velocidad de propagación según la dirección H ( $VP_H$ ) en las probetas del grupo A disminuye drásticamente de "0" a "50" ciclos (de 6.203 a 3.506 m/s, lo que

supone una disminución del 43,5%) y posteriormente aumenta ligera y paulatinamente hasta alcanzar los 3.671 m/s (una disminución respecto a “0” ciclos del 40,8%). Este comportamiento según la dirección  $VP_H$  es prácticamente análogo en el grupo B. Por su parte, en el grupo C se da esa disminución drástica entre “0” y “50” ciclos, aunque la tendencia posterior parece ser la de seguir disminuyendo.

Las velocidades de propagación según la dirección F sigue un patrón de variación análogo al comentado (recordamos las reservas en el análisis de estos datos para el grupo A dado que en él, la distinción entre las direcciones F y L puede ser en los casos de bandeo no perceptible, dudosa). Las velocidades según la dirección L ( $VP_L$ ) disminuyen drásticamente de “0” a “50” ciclos, y después siguen disminuyendo ligeramente en el grupo A, mientras que en el B, tras esa drástica disminución a “50” ciclos, la velocidad aumenta ligeramente; y en el grupo C tras la brusca caída después de “50” ciclos la velocidad permanece más o menos constante.

En cualquier caso estas consideraciones hay que hacerlas con las reservas a que obliga la alta dispersión de valores de velocidades en las diferentes probetas, que hacen que en la mayoría de los casos los valores de las desviaciones estándar (STD) sean superiores a las diferencias comentadas tras “100”, “150” y “200” ciclos, no así para las diferencias entre “0” y “50” ciclos donde las diferencias son en todos los casos muy superiores a las desviaciones estándar.

Otro hecho observable es que tras “50” y “100” ciclos el orden de valores para  $VP_H$  y  $VP_F$  entre los grupos se invierte, de manera que  $VP_C > VP_B > VP_A$ . No obstante, tras “200” ciclos vuelven al orden original, de forma que en general las velocidades  $VP_H$  y  $VP_F$  son mayores en las probetas del grupo A que en las de B y C. Las variaciones en  $VP_L$  son más aleatorias, y tras “200” ciclos el grupo B presenta el mayor valor, seguido de C y A respectivamente (a “0” ciclos  $VP_A > VP_B > VP_C$ ).

Asimismo comentar que, porcentualmente y tras “200” ciclos, la disminución de velocidad según la dirección H ( $VP_H$ ) es análoga en los tres grupos; la disminución según la dirección F es algo mayor en los grupos B y C que en el A, mientras que la disminución según la dirección L ( $VP_L$ ) es mayor en las probetas del grupo A que en las B y C (en estas dos la pérdida es del mismo orden).

Finalmente reseñamos que tras “200” ciclos y en términos porcentuales, en cualquiera de los grupos las disminuciones de velocidad son mayores según la dirección L, seguidas de la F, siendo la dirección H la que porcentualmente menos se ve afectada. Este hecho ya ocurre tras “50” ciclos, de manera que, en términos generales y para los tres grupos, las mayores disminuciones porcentuales de velocidad tienen lugar para la dirección L, seguida de la F y finalmente la H.

## 6.4. ESTUDIOS DE ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA Y CRISTALINIDAD

### 6.4.1 ESTUDIO DE LA ORIENTACIÓN PREFERENCIAL DE LOS GRANOS DE CALCITA

La existencia de orientación preferencial de los granos de calcita es un factor determinante sobre la anisotropía del material que puede tener una notable incidencia sobre el comportamiento físico del mismo.

Tal y como se ha planteado en los apartados sobre técnicas aplicadas, se ha abordado mediante microscopía óptica, platina teodolítica y DRX el estudio de la posible orientación de los granos cristalinos de calcita en el material marmóreo. Se reúnen y discuten los resultados obtenidos por cada uno de los métodos seguidos.

Por lo que se refiere a los resultados proporcionados por la microscopía óptica el estudio revela una difusa orientación morfológica que se pone de manifiesto por la presencia de cristales alargados de calcita dispuestos paralelamente (Figura 6.1). Esta orientación es coincidente con la que presentan los pequeños cristales laminares de mica que se encuentran dispersos entre los granos de calcita. (Figura 6.5).

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de los estudios de DRX:

El estudio de los 75 difractogramas de las láminas “001” –perpendiculares a la dirección L– de las probetas de mármol, además de datos sobre el índice de cristalinidad, nos han permitido obtener información adicional sobre orientación preferencial de los granos cristalinos en el material marmóreo, a partir de la consideración de las desviaciones de las intensidades relativas de las diferentes reflexiones del material “en láminas” respecto a las intensidades que deben corresponderles caso de no existencia de ninguna orientación preferencial.

El número de difractogramas es lo suficientemente elevado (75) de manera que los datos que esta consideración pueda aportar serán, al menos en términos cualitativos, significativos.

En la Figura 1 (del Anexo 5) se representan los difractogramas de las 75 láminas de mármol (25 de cada uno de los grupos y sometidas a distintos ciclos de calentamiento-enfriamiento).

En la Tabla 6.5 se recogen los valores medios de las intensidades relativas de las reflexiones (102), (104), (113), (110) y (202) para las 25 láminas de cada uno de

los grupos A, B y C; se recogen además las diferencias (en %) respecto a las intensidades teóricas caso de no existencia de orientación preferencial. Finalmente, se recogen los valores medios de las intensidades de cada reflexión para el conjunto de las 75 láminas, y el valor medio de la diferencia respecto al valor teórico (En la Tabla 1 del Anexo 6 se contienen todos los datos por muestra y reflexión).

Tabla 6.5. Valores medios de la intensidad relativa (%) de las reflexiones (102), (104), (113), (110) y (202) y las diferencias en % respecto de la intensidad teórica para los grupos de probetas A, B y C.

Grupo	102 (It=12)		104 (It=100)		113 (It=14)		110 (It=18)		202 (It=18)	
	Ireal (%)	$\Delta$ (%)	Ireal (%)	$\Delta$ (%)	Ireal (%)	$\Delta$ (%)	Ireal (%)	$\Delta$ (%)	Ireal (%)	$\Delta$ (%)
A	13	12	74	-26	45	223	32	77	51	76
B	17	43	80	-20	44	213	45	150	57	91
C	11	-8	92	-8	29	108	38	113	54	84
Media	14	16	82	-18	39	181	38	113	54	84

Se observa que tanto por grupos, como en el conjunto de las 75 láminas estudiadas, todas las reflexiones consideradas presentan intensidades superiores a las teóricas excepto la reflexión (102) que, por el contrario, presenta una intensidad inferior a la que teóricamente debería presentar (100%) caso de no existencia de orientación preferencial.

En la Figura 6.20 se esquematizan las direcciones de los planos (102), (104) y (202), responsables de las reflexiones correspondientes, respecto a los ejes  $x$  y  $c$  cristalográficos; por su parte, las direcciones de los planos (110) estarían contenidas en el plano  $xy$  del sistema de ejes cristalográficos.



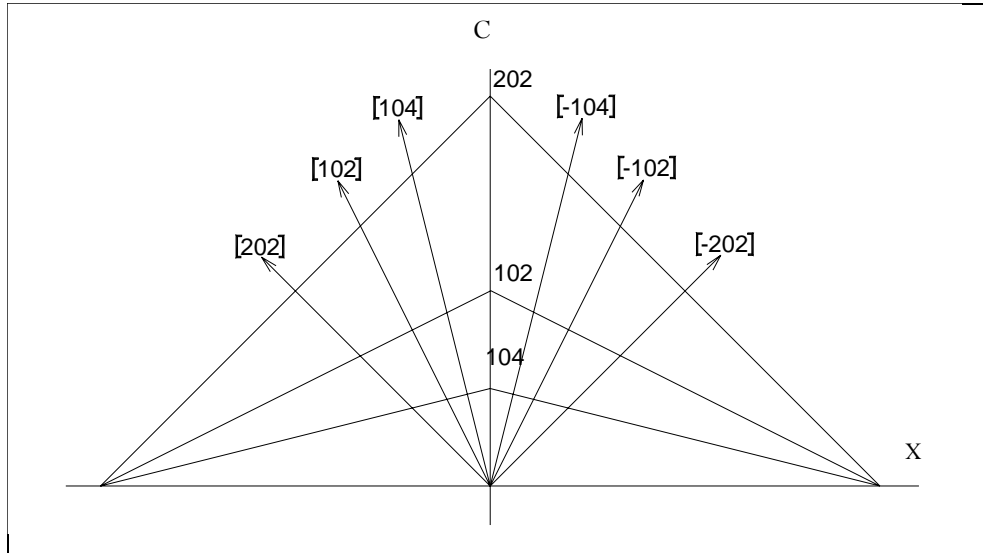


Figura 6.20. Esquema de direcciones de los planos (102), (104) y (202) respecto a los ejes  $x$  y  $c$  cristalográficos.

Tratando de relacionar o posicionar las direcciones cristalográficas con las direcciones de la probeta, hemos de considerar por una parte que si en un difractograma determinadas reflexiones resultan reforzadas respecto a otras, es indicativo de un mayor número de los planos correspondientes a las reflexiones reforzadas según la dirección perpendicular al RX incidente. Teniendo en cuenta que en nuestro caso las reflexiones reforzadas son las correspondientes a planos cuyas direcciones tienden a posicionarse más según el plano XY, o lo que es lo mismo según el plano SP de la probeta (hay que tener en cuenta que la superficie de la lámina sobre la que han incidido los RX es la SP, perpendicular a la dirección L), los datos de intensidades relativas de las distintas “reflexiones” o haces difractados nos indican una orientación predominante de los cristales de calcita del material marmóreo, de forma que el eje  $c$  cristalográfico de los mismos tendería a coincidir con la del plano SP (o posiciones próximas), pero no con la dirección L; podemos concluir por tanto que el grado de orientación resultante para el material estudiado con esta técnica de DRX es significativo.

Pasamos a exponer a continuación los datos obtenidos en los dos estudios de Análisis Textural por DRX.

Respecto a los estudios texturales por DRX realizados en el Servicio de Recursos Científicos de la Universidad Rovira i Virgili, la Figura 6.21 corresponde a las figuras de polos obtenidas sobre una lámina “010” (plano lateral de una probeta de material tipo A), correspondientes a las reflexiones (102), (104), (110), (113) y (202).

Los datos que proporcionan son irrelevantes, apreciándose sólo unos cuantos máximos de densidad muy estrechos, correspondientes a cristales individuales.

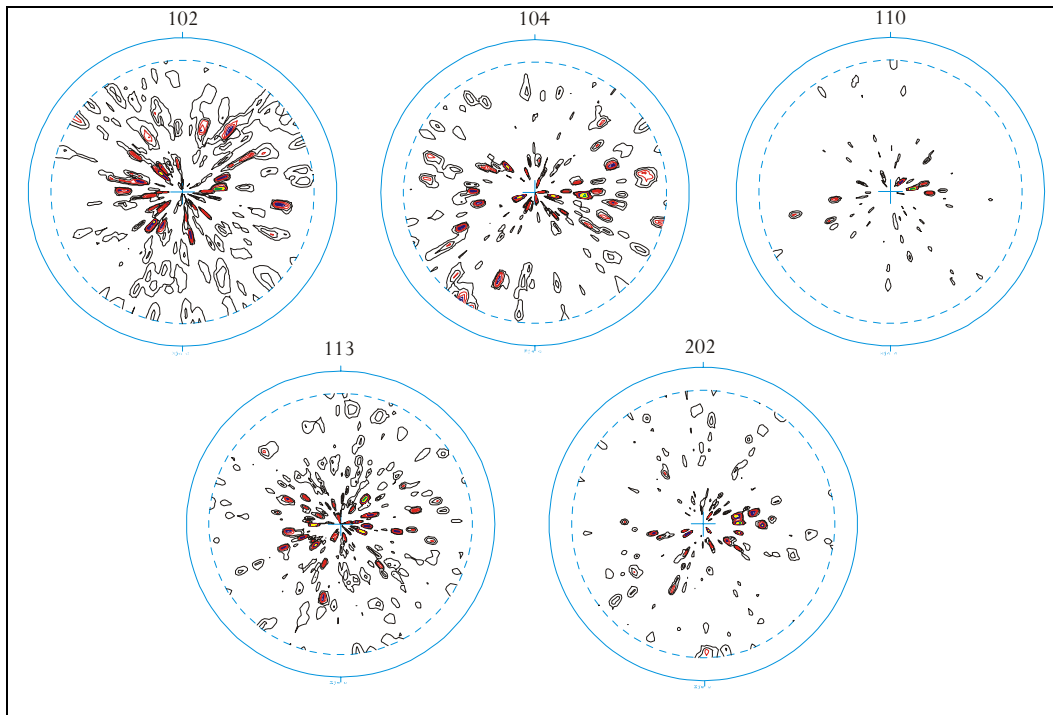


Figura 6.21. Diagramas de polos obtenidos sobre la lámina "010" correspondientes a las reflexiones (102), (104), (110), (113) y (202).

En efecto, tal y como confirmaron los técnicos del citado Servicio, el tamaño de los granos de las probetas es excesivamente grande, –los granos son visibles a simple vista–, y en el área que el análisis textural cubre (1 cm<sup>2</sup> aproximadamente) no hay un número suficiente representativo de cristales que permitan obtener una información estadísticamente correcta de la textura presente. A pesar de los esfuerzos no fue posible aumentar el área analizada.

Los estudios texturales realizados en este caso mediante el difractor Philips PW 1710 del Departamento de Mineralogía y Petrología han adolecido del mismo problema que en el caso anterior. Los estereogramas obtenidos no permiten deducir ninguna tendencia en la orientación de los cristales de calcita; en dichos estereogramas no aparece en ninguno de los casos máximos claros que permitan concluir que existe una orientación determinada y clara. En todo caso y dentro de lo poco representativo de los resultados, las máximas orientaciones detectadas en las

secciones 1a, 1b, 2a, 2c, 4b y 4c han sido para las caras (hkl) (113), (202) que son en todos los casos caras del romboedro (Tabla 6.6).

Tabla 6.6. Valores de intensidad (I) y coeficiente de textura (TC) para las distintas muestras en cada una de las reflexiones estudiadas (hkl) (102), (104), (006), (110), (113), (202) y (116).

(hkl)	Patrón		1 <sup>a</sup>			1B			2A		
	I	Ip/100	I	I/100	TC	I	I/100	TC	I	I/100	TC
(102)	509,00	2,81	392,00	15,86	0,0331	991,00	45,54	0,0596	420,00	3,97	0,0260
(104)	18138,00	100,00	1610,00	65,16	0,0038	275,00	12,64	0,0005	10587,0	100,00	0,0184
(006)	263,00	51,67	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,0000
(110)	1088,00	213,75	735,00	29,75	0,0290	532,00	24,45	0,0150	2025,00	19,13	0,0586
(113)	1625,00	319,25	2471,00	100,00	0,0653	2101,00	96,55	0,0396	1956,00	18,48	0,0379
(202)	1433,00	281,53	599,00	24,24	0,0179	2176,00	100,00	0,0465	0,00	0,00	0,0000
(116)	2372,00	466,01	974,00	39,42	0,0176	434,00	19,94	0,0056	1945,00	18,37	0,0258

(hkl)	Patrón		2C			4B			4C		
	I	Ip/100	I	I/100	TC	I	I/100	TC	I	I/100	TC
(102)	509,00	2,81	0,00	0,00	0,00	794,00	794,00	0,0596	420,00	3,97	0,260
(104)	18138,00	100,00	6976,00	25811,0	0,0155	1905,00	1905,00	0,0005	10587,0	100,00	0,0184
(006)	263,00	51,67	0,00	0,00	0,0000	351,00	351,00	0,0000	0,00	0,00	0,0000
(110)	1088,00	213,75	379,00	1772,00	0,0140	0,00	0,00	0,0150	2025,00	19,13	0,0586
(113)	1625,00	319,25	287,00	0,00	0,0071	0,00	0,00	0,0396	1956,00	18,48	0,0379
(202)	1433,00	281,53	2755,00	0,00	0,0772	351,00	351,00	0,0465	0,00	0,00	0,0000
(116)	2372,00	466,01	3123,00	6417,00	0,0529	3266,00	3266,00	0,0056	1945,00	18,37	0,0258

En cualquier caso, y debido al escaso número de cristales analizados por el elevado tamaño de los mismos, la intensidad obtenida para la reflexión (006), que corresponde con la dirección del eje c, es muy baja, lo que determina una escasa precisión en la obtención de la orientación del eje c por este método en nuestro caso.

El análisis de la distribución de la orientación del eje c cristalográfico mediante **microscopio óptico con platina teodolítica** permite poner de manifiesto la existencia de orientación preferencial de los cristales de calcita.

La proyección estereográfica de la orientación del eje c de los cristales de calcita en las tres láminas estudiadas muestra una distribución que indica la existencia de máximos coincidentes con una disposición del eje c inclinada 45° respecto al eje

001 tomado como referencia arbitraria para las probetas estudiadas según se muestra en los diagramas de densidades (Figuras 6.22 y 6.23), observándose zonas de mínimos de poca repercusión propios de la dispersión que pueden presentar las orientaciones de algunos de los granos medidos.

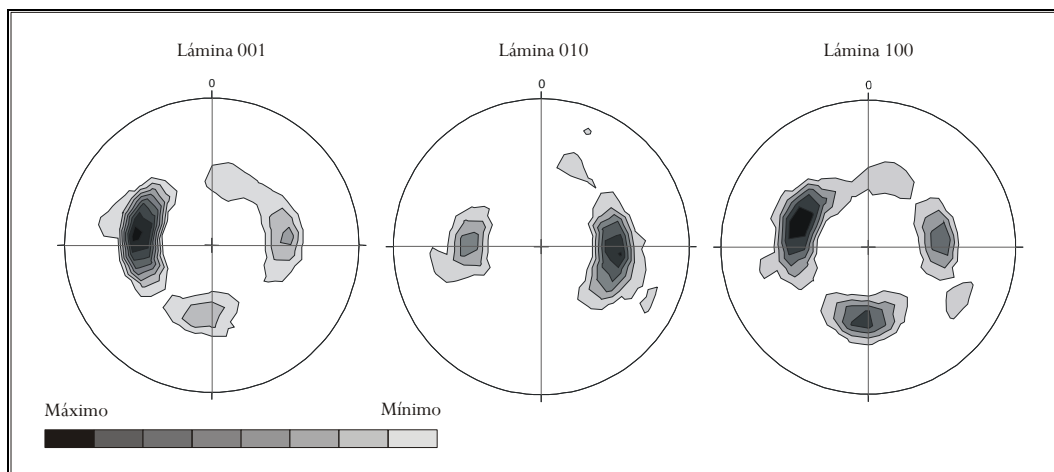


Figura 6.22. Diagrama de densidades de ejes  $c$  medidos en las láminas delgadas cortadas según cada una de las caras (001), (010), (100) del paralelepípedo probeta.

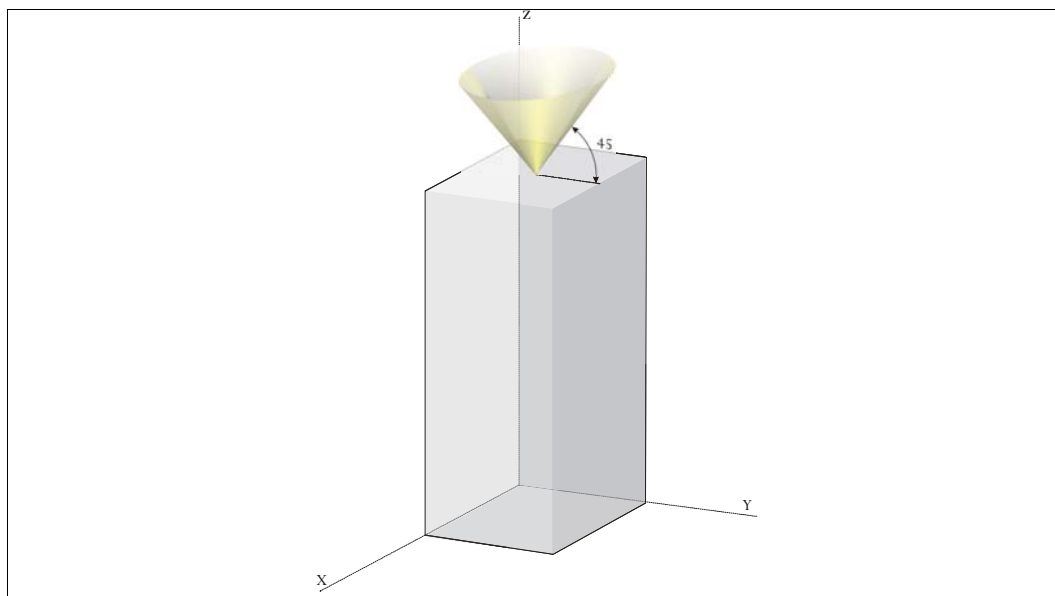


Figura 6.23. Esquema de orientación de los ejes  $c$  cristalográficos en el material de estudio.

En consecuencia es evidente que el material estudiado posee un importante grado de orientación preferencial de los cristales de calcita que lo constituyen, de manera que el eje c de dichos cristales, en relación a las probetas de estudio, se orienta mayoritariamente según las direcciones marcadas en el cono de la Figura 6.23, en concordancia igualmente con lo indicado en las Figuras 6.21 y 6.22.

#### 6.4.2 ESTUDIO DE ÍNDICE DE CRISTALINIDAD

De acuerdo con la metodología planteada en el apartado correspondiente, se han obtenido difractogramas de rayos X sobre láminas “001” de probetas de los tres grupos de material y sometidos a los distintos ciclos de estrés térmico.

La Figura 1 del Anexo 5 corresponde a los difractogramas comentados, y en la Tabla 2 del Anexo 6 se reúnen los valores de Índice de Cristalinidad (D) obtenidos mediante la fórmula de Scherrer, a partir de las reflexiones (102), (202) y (104).

En la Tabla 6.7 se recogen los valores medios de D para cada 5 muestras sometidas a igual número de ciclos por grupo, para las reflexiones 102, 202 y 104.

*Tabla 6.7. Valores medios de Índice de cristalinidad (D) para los grupos de probetas A, B y C según las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200) en las reflexiones (102), (202) y (104).*

(hkl)	(102)			(202)			(104)		
	Grupo			Grupo			Grupo		
Ciclos	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	651	1054	520	555	423	467	596	547	594
50	1128	834	671	477	464	475	545	535	563
100	799	735	799	618	452	557	554	553	605
150	1001	677	697	529	482	427	532	463	489
200	1065	653	875	692	522	448	603	502	569

Por lo que se refiere a la incidencia de los ciclos de calentamiento-enfriamiento sobre la cristalinidad del material marmóreo, los datos son muy poco o nada concluyentes, de manera que en 3-4 casos los valores parecen indicar un aumento del Índice de Cristalinidad (D) con el número de ciclos, en 3 casos los datos apuntan a todo lo contrario, y en 2-3 indican que no hay incidencia.

Algo más clara parece la tendencia resultante si se analiza como incide el grado o abundancia de mineralización o bandeado grisáceo en el material marmóreo, de manera que, con algunas precauciones o reservas podríamos establecer una relación o paralelismo entre mayor pureza (menor proporción de bandeado grisáceo) del material marmóreo y un mayor índice o grado de cristalinidad. En términos

generales los mayores valores de D, por grupo de ciclos, corresponden al material de tipo A sobre todo los proporcionados por las reflexiones (102) y (202). Sin embargo, la distribución de valores entre los grupos B y C es bastante aleatoria, lo que nos hace ratificarnos en las reservas expresadas anteriormente.

## 6.5. COMPORTAMIENTO MECÁNICO: DUREZA SUPERFICIAL Y MÓDULO ELÁSTICO

### 6.5.1 DUREZA SUPERFICIAL. ESCLERÓMETRO

Tal y como se expuso en el Capítulo de Materiales y Métodos, y dadas las dimensiones de las probetas, se ha procedido a la medida del índice de impacto exclusivamente según la dirección L de las mismas (caras superior e inferior de cada probeta). Las medidas se han efectuado sobre probetas de los tres tipos (A, B y C) no sometidas a ciclos de calentamiento-enfriamiento y tras haber sido sometidos a “50” de estos ciclos.

En la Tabla 6.8 se recogen los valores medios de estas dos medidas ( $IS_L$ ) para cada probeta, así como el valor medio para cada grupo de probetas de “0” y “50” ciclos. Así mismo se recoge la disminución (%) de estos valores medios para cada grupo tras “50” ciclos. Se incluyen además en la tabla los valores de resistencia a compresión para cada probeta y los correspondientes valores medios para cada grupo tras “0” y “50” ciclos, una vez realizada la conversión de las lecturas de índice esclerométrico a resistencia a compresión, según el diagrama calibrador que acompaña al aparato y que aparece en la Figura 5.10.

ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS LEONES.  
INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE DETERIORO

Tabla 6.8. Valores medios de índice esclerométrico  $IS_L$  y resistencia a compresión  $RC$  ( $N/mm^2$ ) para las distintas probetas pertenecientes a los grupos A, B y C para “0” y “50” ciclos. Variaciones de  $IS_L$  y  $RC$  de los valores medios de los grupos de probetas A, B y C para “0” y “50” ciclos.

Designación	$IS_L$	R.C ( $N/mm^2$ )	Designación	$IS_L$	R.C ( $N/mm^2$ )	$\Delta IS_L$ (%)	$\Delta RC$ (%)
Grupo A “0” ciclos	1a	46,0	Grupo A “50” ciclos	6a	27,5		
	2a	46,0		7a	22,0	25,0	
	3a	46,0		8a	29,0	29,5	
	4a	39,5		9a	32,5	34,0	
	5a	38,5		10a	29,0	36,0	
Valores medios	43,2	61,0	Valores medios	28,0	32,0	35,2	47,5
Grupo B “0” ciclos	1b	42,5	Grupo B “50” ciclos	6b	25,0	19,0	
	2b	39,5		7b	18,5	28,0	
	3b	39,5		8b	27,0	31,0	
	4b	39,5		9b	28,0	32,5	
	5b	36,0		10b	29,5	36,0	
Valores medios	39,4	57,5	Valores medios	25,6	29,0	35,0	49,5
Grupo C “0” ciclos	1c	41,0	Grupo C “50” ciclos	6c	32,0	36,0	
	2c	36,0		7c	17,0	25,0	
	3c	37,5		8c	26,0	29,0	
	4c	38,5		9c	23,0	29,5	
	5c	37,0		10c	39,5	30,0	
Valores medios	38,0	57,5	Valores medios	27,5	29,5	27,6	48,7

En la Figura 6.24 se representan los valores medios de índices esclerométricos (IS) y de resistencias a compresión (RC) para las probetas de cada grupo tras “0” y “50” ciclos.



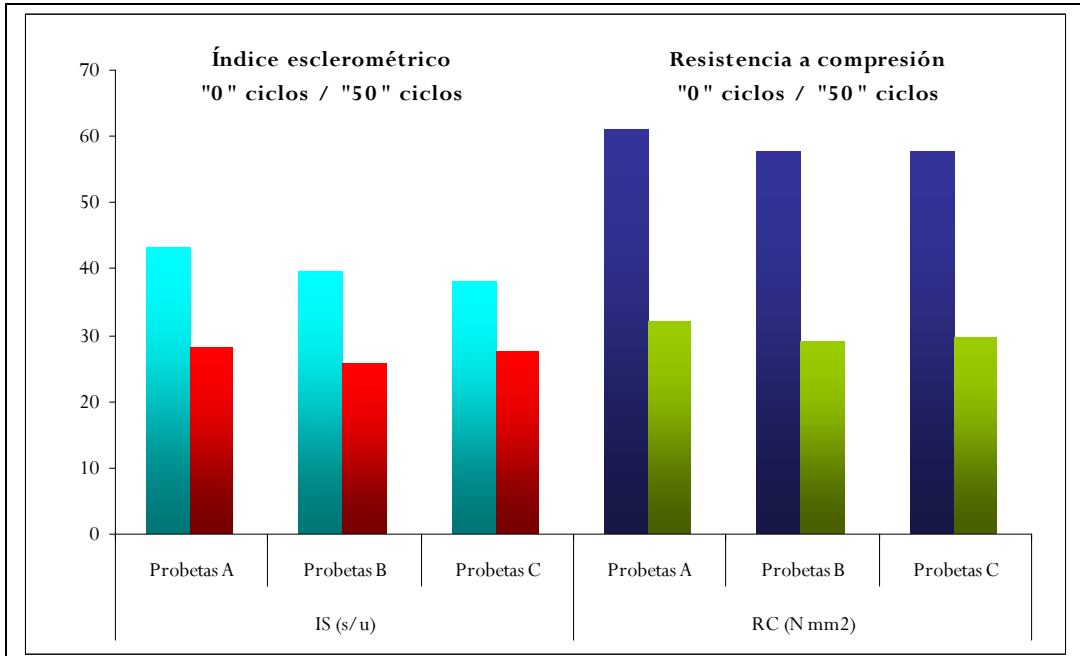


Figura 6.24. Variabilidad de Índice esclerométrico y Resistencia a compresión ( $N/mm^2$ ) para los grupos A, B y C en las tandas de "0" y "50" ciclos.

El análisis de los datos de la tabla y gráfica citadas ponen de manifiesto un brusco descenso en los valores de índice esclerométrico, y por ende, de resistencia a compresión tras "50" ciclos de calentamiento-enfriamiento. Estas disminuciones son de un orden análogo en los tres grupos de probetas (35 a 27% para  $IS_L$  y del 47 a 49% para la resistencia a compresión).

Respecto a estos últimos datos hemos de aclarar su valor orientativo dado el carácter superficial del ensayo. En efecto, los valores deducidos suelen ser inferiores a los proporcionados por los ensayos de carga o rotura. No obstante su valor comparativo para evaluar el efecto o incidencia de los ciclos es perfectamente válido.

### 6.5.2 RESISTENCIA MECÁNICA. MÓDULO ELÁSTICO

De acuerdo con lo previsto en el apartado metodológico correspondiente (Capítulo 5) se han sometido al ensayo de determinación del módulo elástico mediante esfuerzos de compresión un total de 45 probetas correspondientes a los tres grupos (A, B y C) y sometidos a los diferentes ciclos térmicos.

La Figura 1 del Anexo 7 corresponde a la representación esfuerzo-deformación para el total de las probetas ensayadas.

Por su parte en la Tabla 6.9 se recogen los valores de carga de rotura y módulo elástico que el ensayo proporciona para cada probeta. Se incluye además el valor medio del módulo elástico para cada tres probetas del mismo grupo, sometidas al mismo número de ciclos térmicos.

En las Figuras 6.25 y 6.26 se ofrecen distintas representaciones de los referidos valores medios.

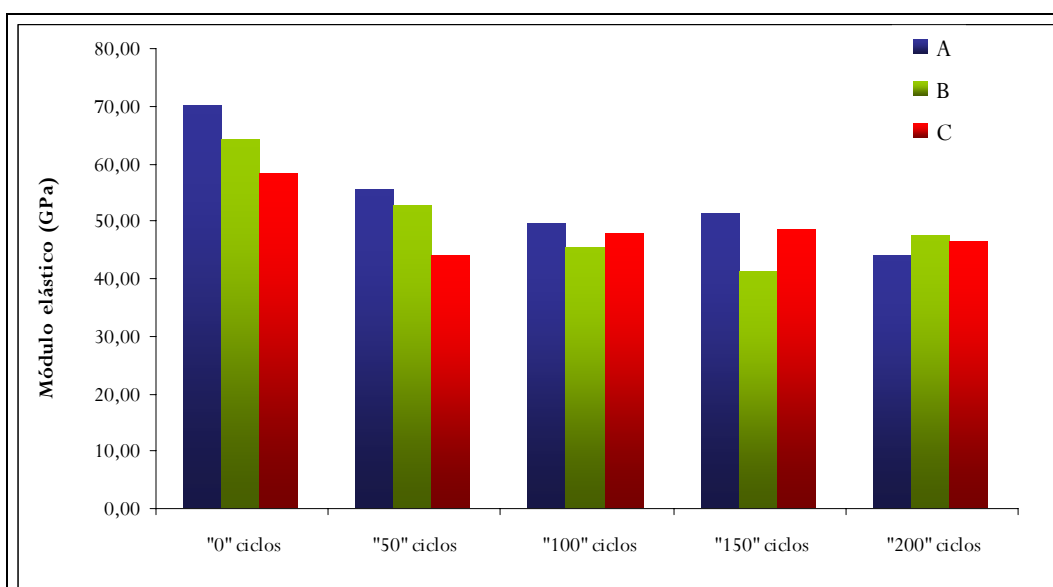


Figura 6.25. Variabilidad del módulo elástico (GPa) en el material según las tandas de ciclos (0, 50, 100, 150 y 200) para cada uno de los grupos establecidos (A, B y C).

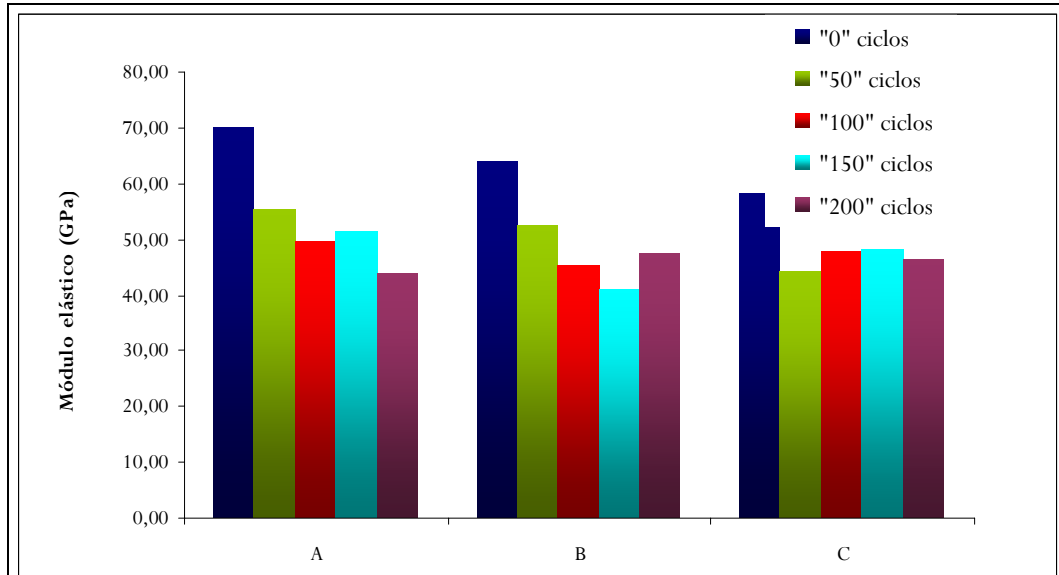


Figura 6.26. Variabilidad del módulo elástico (GPa) en los grupos A, B y C para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

Para cada uno de los tres grupos se observa una sensible disminución del módulo elástico transcurridos “50” ciclos. Este valor sigue decreciendo paulatinamente para las probetas del grupo A según aumenta el número de ciclos; en términos generales las probetas del grupo B tienen un comportamiento similar; el “incremento” tras “200” ciclos en principio puede ser incluido dentro del margen de variabilidad implícito al método. Para el material de tipo C, tras “50” ciclos los valores de módulo elástico parecen estancarse.

Por otra parte se observa que en el material “fresco” (“0” ciclos) los valores de elasticidad disminuyen según aumenta el grado de bandeado grisáceo ( $A > B > C$ ), aunque la repercusión de los ciclos de estrés térmico terminan homogeneizando este comportamiento elástico e incluso invertirlo.

Las líneas esfuerzo-deformación para el material no sometido a ciclos presentan una mayor pendiente y linealidad que una vez sometidos a ciclos, de manera que, una vez sometido a “50” o más ciclos, el material sufre un más acusado cambio de pendiente en la zona elástica. A título de ejemplo se recogen aquí la Figura 6.27 correspondiente a la Figura 1 del Anexo 7 (probetas 2a, 18a, 2b, 16b, 2c y 18c).

Finalmente, comentar que los valores de carga de rotura para el material no sometido a ciclos nos proporcionan un valor de resistencia a compresión de unos 86MPa, totalmente concordantes con otros valores obtenidos para el mármol de Macael (81,1-87,4 MPa, según López Mesones, 2000).

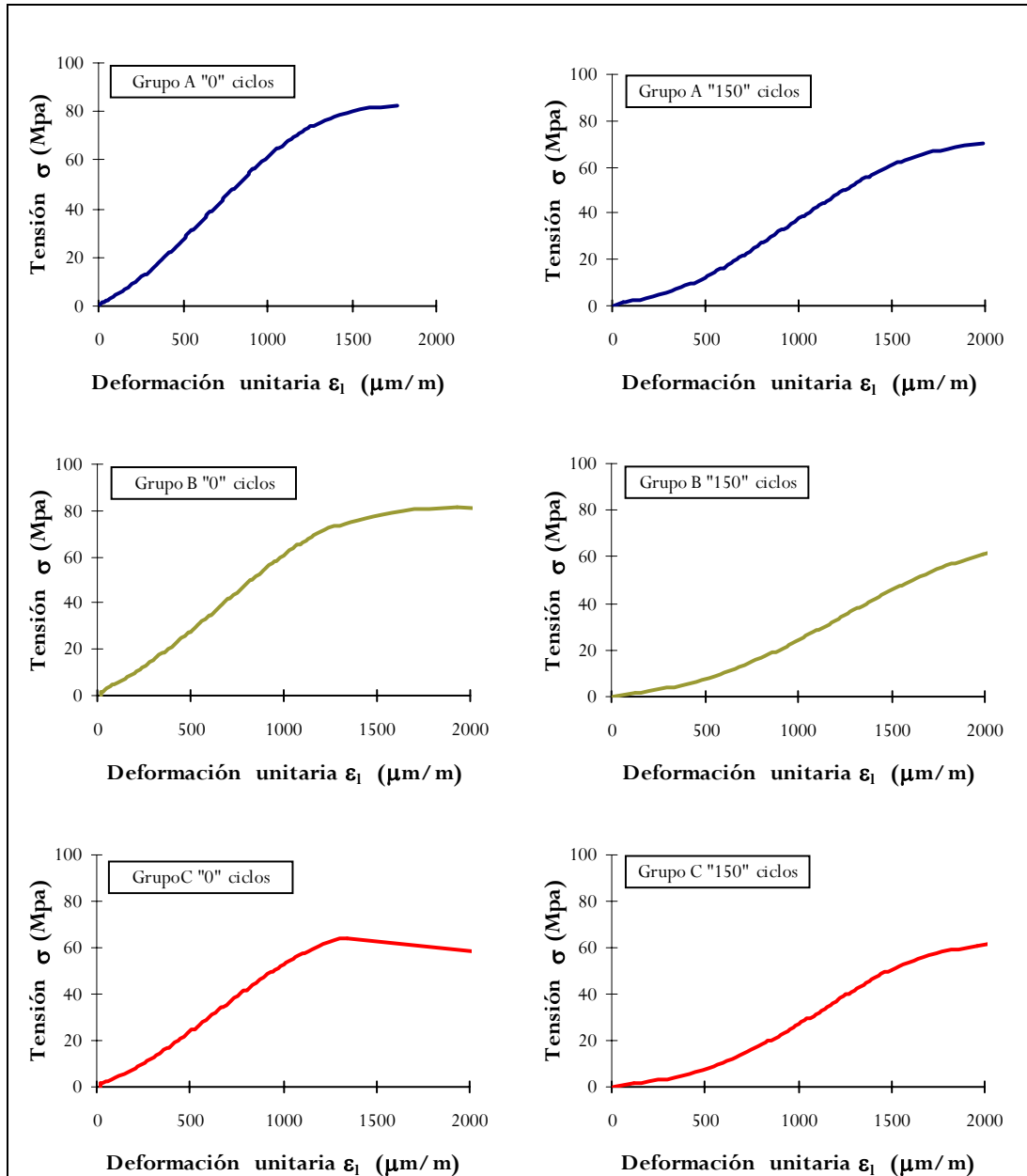


Figura 6.27. Curvas esfuerzo-deformación para probetas de los grupos A, B y C sometidas a "0" y "150" ciclos.

Tabla 6.9.A. Valores por probetas de carga de rotura y módulo elástico

Grupo	nº ciclos	Probeta	Carga de rotura (kN)	Módulo elástico (MPa)	
Grupo A	0	1a	196,3	67,8	
		2a	219,4	69,4	
		3a	230,6	72,3	
				Vmedio 215,4	Vmedio 69,8
	50	6a	171,8	57,9	
		7a	159,5	53,6	
		8a	168,4	54,1	
				Vmedio 166,6	Vmedio 55,2
	100	11a	159,9	51,0	
		12a	125,0	45,1	
		13a	178,7	52,5	
				Vmedio 154,5	Vmedio 49,5
	150	16a	157,3	49,5	
		17a	197,3	51,8	
		18a	184,2	52,3	
				Vmedio 179,6	Vmedio 51,2
	200	21a	177,3	50,4	
		22a	144,1	41,1	
23a		122,6	39,8		
			Vmedio 148,0	Vmedio 43,8	
Grupo B	0	1b	166,3	57,1	
		2b	208,5	67,2	
		3b	182,7	67,5	
				Vmedio 185,8	Vmedio 63,9
	50	6b	154,4	55,3	
		7b	193,4	55,7	
		8b	159,8	46,6	
				Vmedio 169,2	Vmedio 52,5
	100	11b	148,1	43,7	
		12b	150,8	47,5	
		13b	177,5	44,0	
				Vmedio 158,8	Vmedio 45,1
	150	16b	167,5	42,5	
		17b	166,4	39,4	
		18b	128,4	41,3	
			Vmedio 154,1	Vmedio 41,1	
200	21b	176,2	43,8		
	22b	176,7	46,7		
	23b	187,9	51,1		
			Vmedio 180,3	Vmedio 47,2	

ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS LEONES.  
INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE DETERIORO

*Figura 6.9.B. Valores por probetas de carga de rotura y módulo elástico*

Grupo	nº ciclos	Probeta	Carga de rotura (kN)	Módulo elástico (MPa)	
Grupo C	0	1c	129,0	55,5	
		2c	164,4	60,5	
		3c	166,7	58,1	
				Vmedio 153,4	Vmedio 58,0
	50	6c	140,7	42,6	
		7c	156,2	46,7	
		8c	153,1	42,7	
				Vmedio 150,0	Vmedio 44,0
	100	11c	158,2	40,5	
		12c	163,2	46,9	
		13c	161,7	55,6	
				Vmedio 161,0	Vmedio 47,7
	150	16c	139,1	51,2	
		17c	126,8	44,7	
		18c	158,7	48,7	
				Vmedio 141,5	Vmedio 48,2
	200	21c	125,7	38,3	
		22c	177,1	45,8	
		23c	172,1	54,6	
				Vmedio 158,3	Vmedio 46,2

## 6.6. POROSIMETRÍA

El estudio de la porosidad en el material de ensayo ha dado para las dos técnicas empleadas (porosimetría de inyección de mercurio y adsorción de N<sub>2</sub>) los resultados que se muestran en las Tablas 6.10 y 6.11.

La porosimetría de inyección de mercurio es utilizada para la obtención de la porosidad comprendida entre las 360 µm y las 0,003 µm. La aplicación al material de estudio nos ha permitido observar para las distintas muestras ensayadas las diferencias de rango de tamaño de poro que resultan y la porosidad total de cada una de ellas.

Según muestran los datos de la Tabla 6.10 la porosidad abierta para las muestras A y C es de 1,5 y 2,0% respectivamente, presentando variaciones tras “200” ciclos, que suponen una disminución de la porosidad abierta del 11% para el grupo A y del 36% para el grupo C.

Las variaciones experimentadas por cada uno de los dos grupos tras los distintos ciclos se muestra la Figura 6.28, observándose valores muy próximos tras “50” y “200” ciclos.

Comparando los valores de porosidad de los dos grupos estudiados se comprueba que la porosidad abierta es mayor para el grupo C a “0” ciclos; sin embargo alcanza valores muy similares al grupo A, una vez ambos han sido sometidos a “200” ciclos.

*Tabla 6.10. Porosidad abierta (%) para las probetas de grupo A y C sometidas a los distintos ciclos de estrés térmico (0, 50, 100, 150 y 200).*

	"0" ciclos	"50" ciclos	"100" ciclos	"150" ciclos	"200" ciclos
Probetas A	1,5	1,1	2,2	1,1	1,4
Probetas C	2,0	1,1	3,0	1,9	1,3

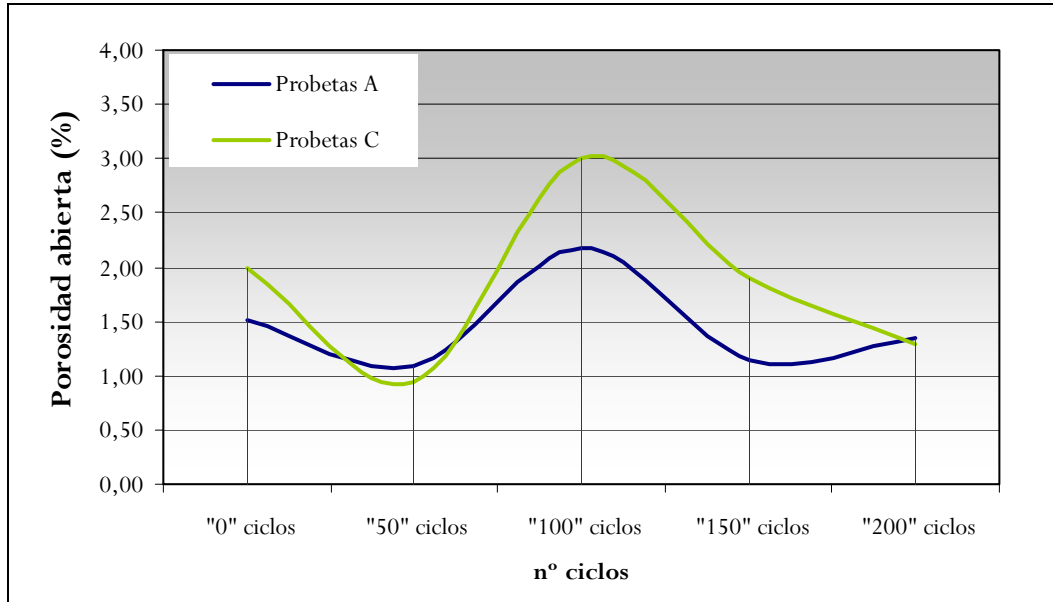


Figura 6.28. Variabilidad de la porosidad abierta para el material de los grupos A y C sometido a las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

En las Figuras 6.29 y 6.30 se resumen de manera conjunta las variaciones de distribución de poro según tamaño para el grupo A y para el grupo C respectivamente tras los distintos ciclos.

El análisis de los resultados indica que aumenta la proporción de poros de menor rango de forma significativa desde los "0" a los "200" ciclos. Así vemos como los rangos de poro entre  $100\mu\text{m}$  y  $0,1\mu\text{m}$  aumentan su proporción frente a los poros  $\leq 0,001\mu\text{m}$  en aproximadamente un 50% si comparamos los valores que se obtienen entre el material de "0" ciclos y el de "200" ciclos, resultando porcentajes intermedios para los ciclos restantes. Por otra parte, la evolución de las probetas de ambos grupos es bastante análoga.



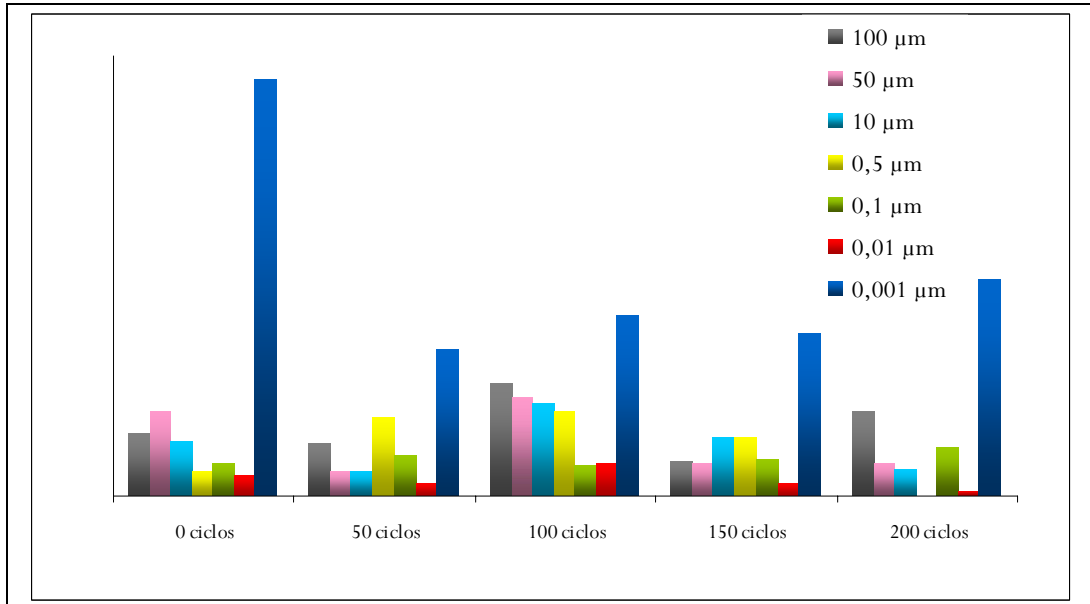


Figura 6.29. Variabilidad de la distribución de poro en el material perteneciente al grupo A, sometido a las tandas de ciclos establecidos (0, 50, 100, 150 y 200).

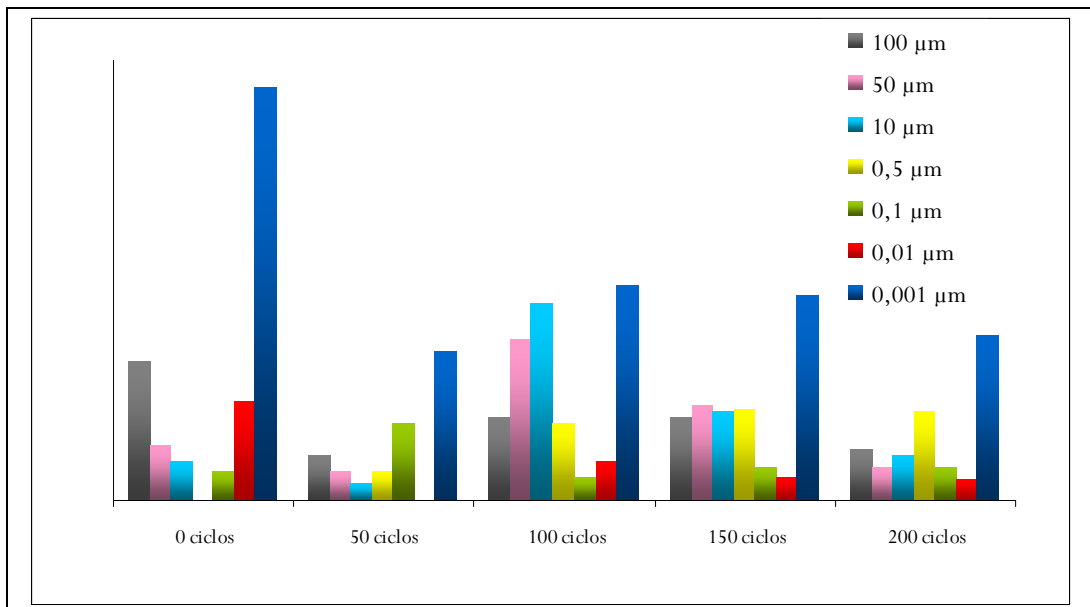


Figura 6.30 Variabilidad de la distribución de poro en el material perteneciente al grupo C, sometido a las tandas de ciclos establecidos (0, 50, 100, 150 y 200).

La segunda técnica empleada en la determinación de la porosidad “Método B.E.T. o de adsorción de N<sub>2</sub>” proporciona en función de los resultados de superficie de adsorción, la cuantificación de la porosidad para rangos de poro inferiores a 500 Å.

Los resultados obtenidos (Tabla 6.11) en este caso indican una superficie de adsorción algo mayor en el grupo A que en el grupo C (1,13 y 0,84 m<sup>2</sup>/g respectivamente).

En cuanto a la evolución que esta superficie de adsorción puede tener en el material sometido a ciclos hay que decir que no se observan diferencias significativas de manera que los valores obtenidos para los grupos A y C tras ser sometidos a “200” ciclos de estrés térmico son muy similares a los iniciales.

Tabla 6.11. Superficie específica (m<sup>2</sup>/g) para las probetas de grupo A y C sometidas a “0” y “200” ciclos de estrés térmico.

	"0" ciclos	"200" ciclos
Probetas A	1,13 ±0,24	0,95 ±0,07
Probetas C	0,84 ±0,09	0,84 ±0,09

Es necesario relacionar estos valores de superficie de adsorción con la porosidad del material, y poder comparar así los resultados de ambas técnicas. Por otra parte, teniendo en cuenta que, las relaciones entre los valores de presión de adsorbato y de saturación P/P<sub>0</sub> son del orden de 0,20, este valor de presión tan bajo no permite acceder al interior de los granos, y solo corresponde por tanto a la porosidad o espacio entre los mismos.

Dado que el tamaño superior de partícula usado por nosotros en el experimento es de 50 µm para un empaquetamiento de las mismas con unos huecos o separaciones entre partículas de 15Å, el valor de superficie de adsorción para el que podría considerarse ausente la microporosidad es de 0,044 m<sup>2</sup>/g. Como los valores experimentales obtenidos son bastante mayores (1 m<sup>2</sup>/g aproximadamente), hemos de concluir que efectivamente, las muestras ensayadas presentan una porosidad significativa. Por otra parte, la presión parcial máxima de N<sub>2</sub> utilizada P/P<sub>0</sub>=0,20, no permite detectar poros de tamaño inferior a 15Å, lo cual quiere decir que la diferenciación entre superficie medida (≈1 m<sup>2</sup>/g) y calculada (≈0,044 m<sup>2</sup>/g) ha de deberse a poros de diámetro inferior al valor mencionado de 15Å.

La técnica no permite conclusiones más precisas sobre tamaños y porcentajes de porosidad, aunque confirma los resultados de porosimetría de inyección de mercurio, en el sentido de que la escasa porosidad total del material es en forma de microporosidad.

## 6.7. ENSAYOS HÍDRICOS

### 6.7.1. ABSORCIÓN-DESORCIÓN

Han sido sometidas a estos ensayos 20 probetas de cada uno de los tres grupos de material (A, B y C) sometidos a los distintos ciclos de calentamiento-enfriamiento (4 por ciclo), lo que implica un total de 60 probetas.

Los datos obtenidos para cada probeta se reúnen en las Tablas 1 y 2 del Anexo 8.

En la Figura 6.31.A se representan los valores medios de las 4 probetas sometidas al correspondiente número de ciclos de calentamiento-enfriamiento del material marmóreo A. En las Figuras 6.31.B y 6.31.C se realizan dichas representaciones para el material B y C respectivamente.

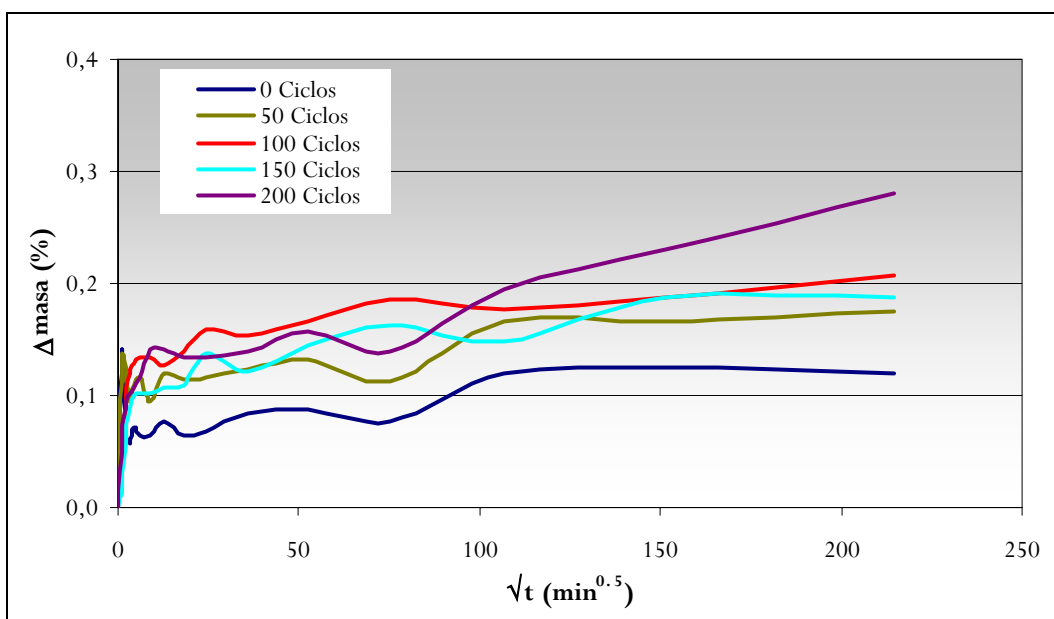


Figura 6.31.A. Curvas de absorción del material grupo A para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

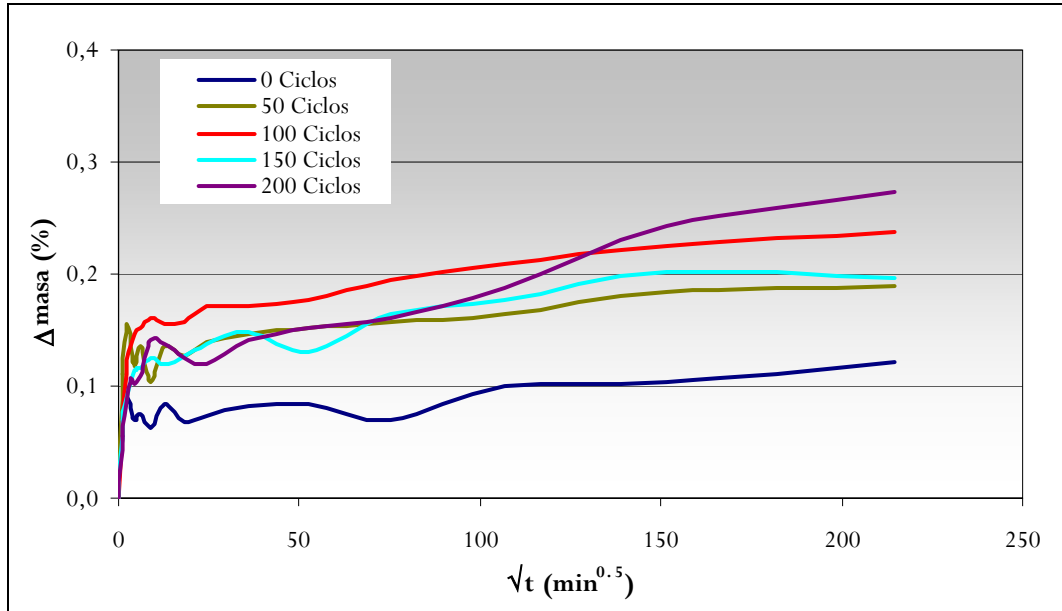


Figura 6.31.B. Curvas de absorción del material grupo B para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

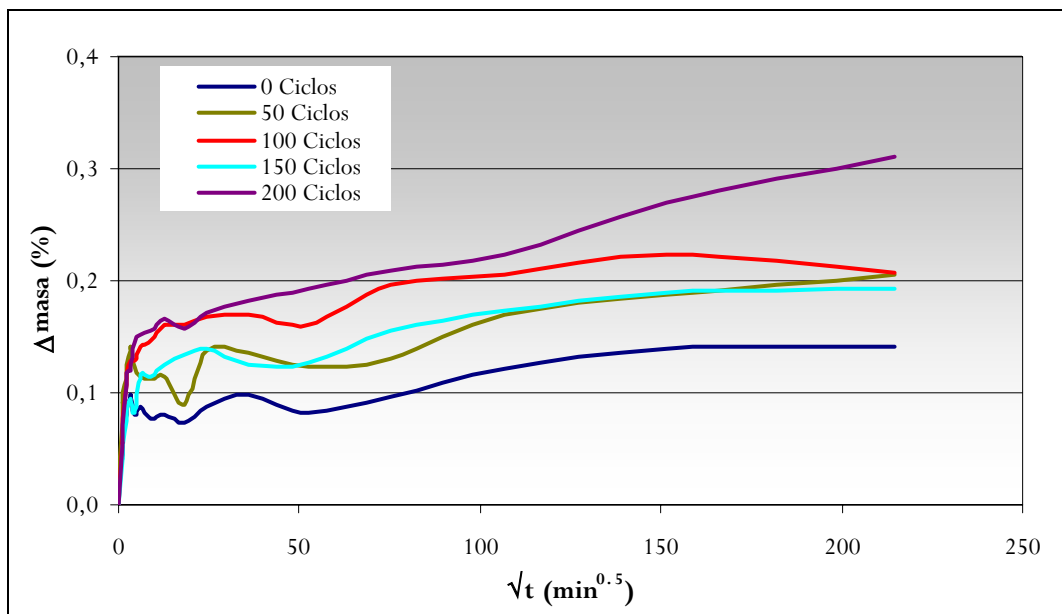


Figura 6.31.C. Curvas de absorción del material grupo C para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

En las Figuras 6.32.A, 6.32.B y 6.32.C se realizan análogas representaciones pero en este caso con los valores de desorción.

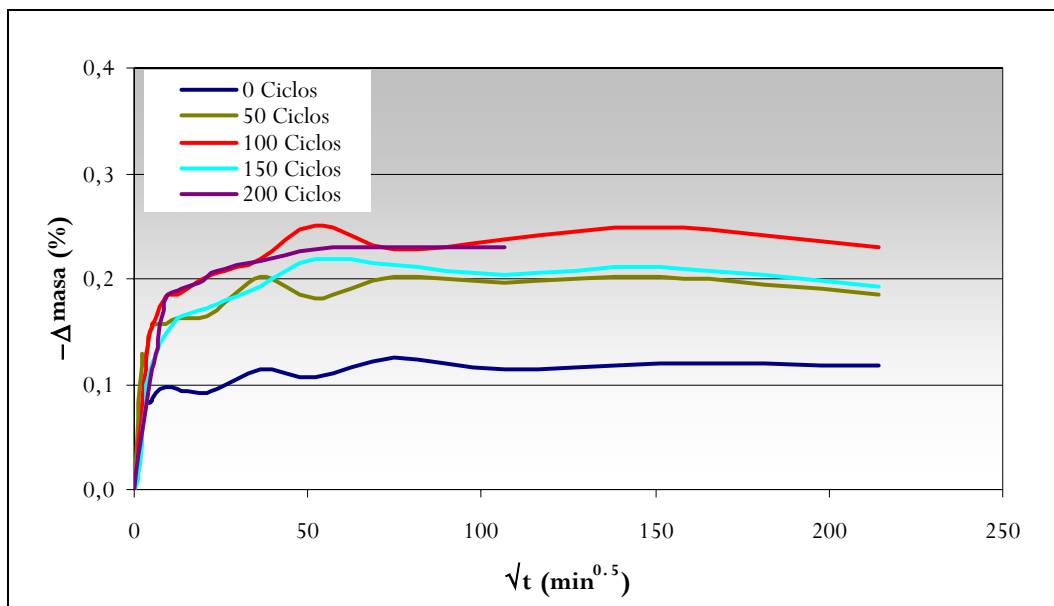


Figura 6.32.A. Curvas de desorción del material grupo A para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

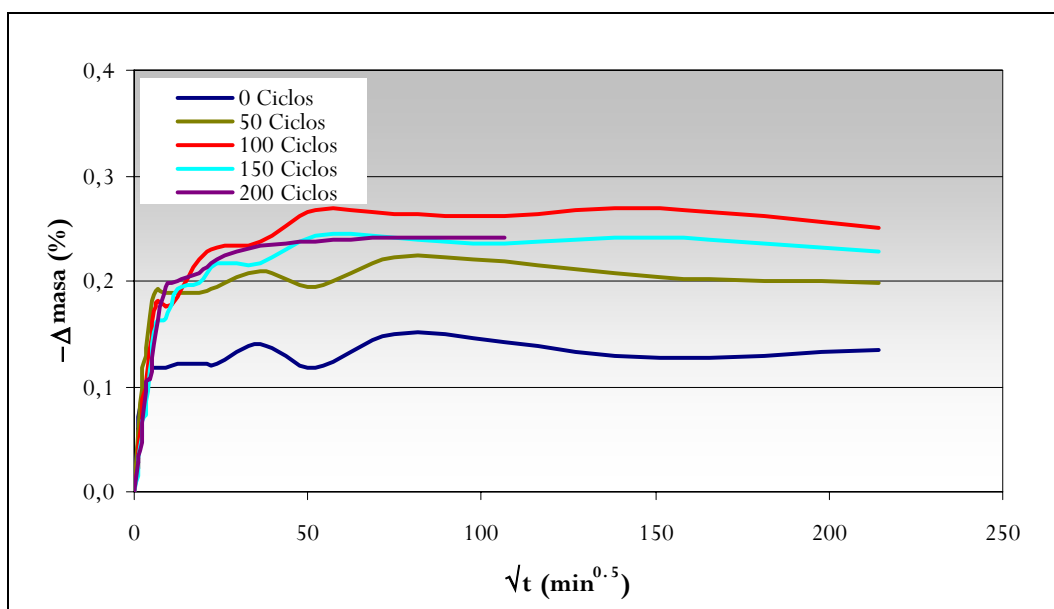


Figura 6.32.B. Curvas de desorción del material grupo B para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

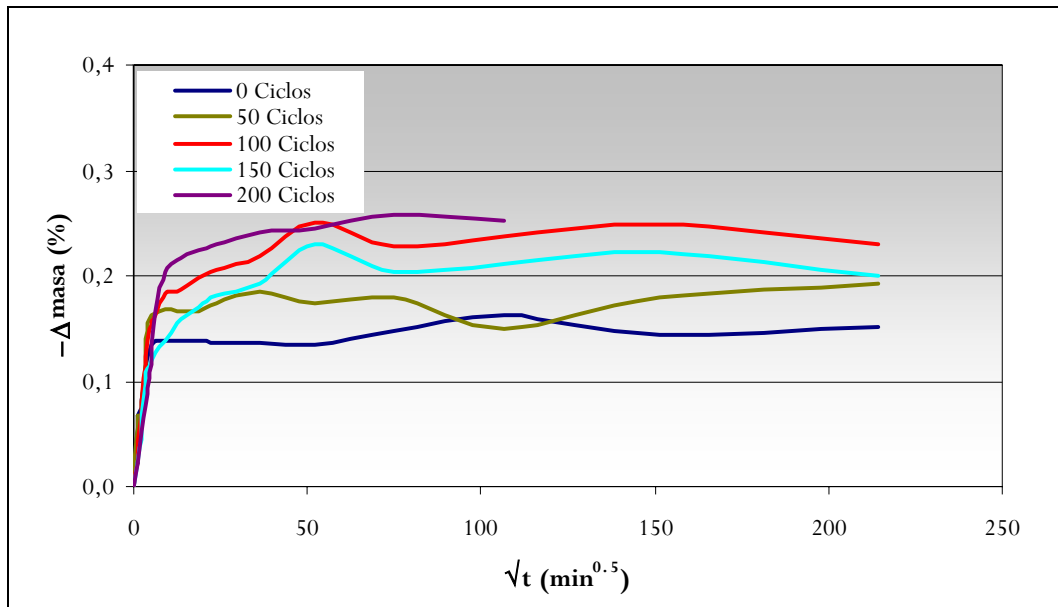


Figura 6.32.C. Curvas de desorción del material grupo C para las tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

En la Figuras 6.33 se representan para su comparación estos valores medios de absorción para el mismo número de ciclos para cada uno de los tres grupos, y de manera análoga en la Figura 6.34 lo mismo para los valores de desorción.

Finalmente en las Figuras 6.35.A (de 0 a 200), 6.35.B (de 0 a 200) y 6.35.C (de 0 a 200) se representan los referidos valores medios tanto de absorción como de desorción, para un mismo tipo de material, y para un mismo número de ciclos.

Es de resaltar la concordancia en la información que cada una de las citadas gráficas proporciona, y la lógica correspondencia entre los datos proporcionados por los ensayos de absorción con los de desorción.

Se observa como los datos y sus representaciones ponen de manifiesto por una parte la apreciable incidencia de los ciclos de estrés térmico sobre el comportamiento hídrico del material. Así, se observa como en todos los casos y para los distintos grupos la absorción –y correspondientemente la desorción– aumenta con el número de ciclos. De hecho las Figuras 6.34.A y 6.34.C especialmente indican como tras “200” ciclos el material aún tiene mayor capacidad de absorción de agua de la que el ensayo pone de manifiesto, dado que el mismo hubo que finalizarlo antes del tiempo requerido. Los ensayos que venimos realizando nos permitirán conocer el comportamiento hídrico del material a “200” y un mayor número de ciclos térmicos.

Las figuras indican así mismo una cierta incidencia de la proporción de mineralización grisácea en el comportamiento hídrico del material; las Figuras 6.33 y 6.34 indican siempre una menor absorción –o desorción– para el material A que para el B o C. En cualquier caso el efecto parece menos acusado que el caso del número de ciclos.

En cuanto a las dinámicas de absorción-desorción, las distintas Figuras 6.35.A, 6.35.B y 6.35.C indican que, salvo en las primeras etapas, la velocidad de desorción es mayor que la absorción. Por otra parte, no parece quedar agua retenida cuando el número de ciclos es inferior a 200.

Finalmente en la Tabla 6.12 se reúnen los valores de los índices de absorción (IA) e índices de desorción (ID) obtenidos mediante las expresiones propuestas en los NORMAL correspondientes (NORMAL 7/81 y NORMAL 29/88, respectivamente).

Los valores para los distintos tipos de material (A, B y C) expuestos a los ciclos establecidos confirman todo lo comentado anteriormente.



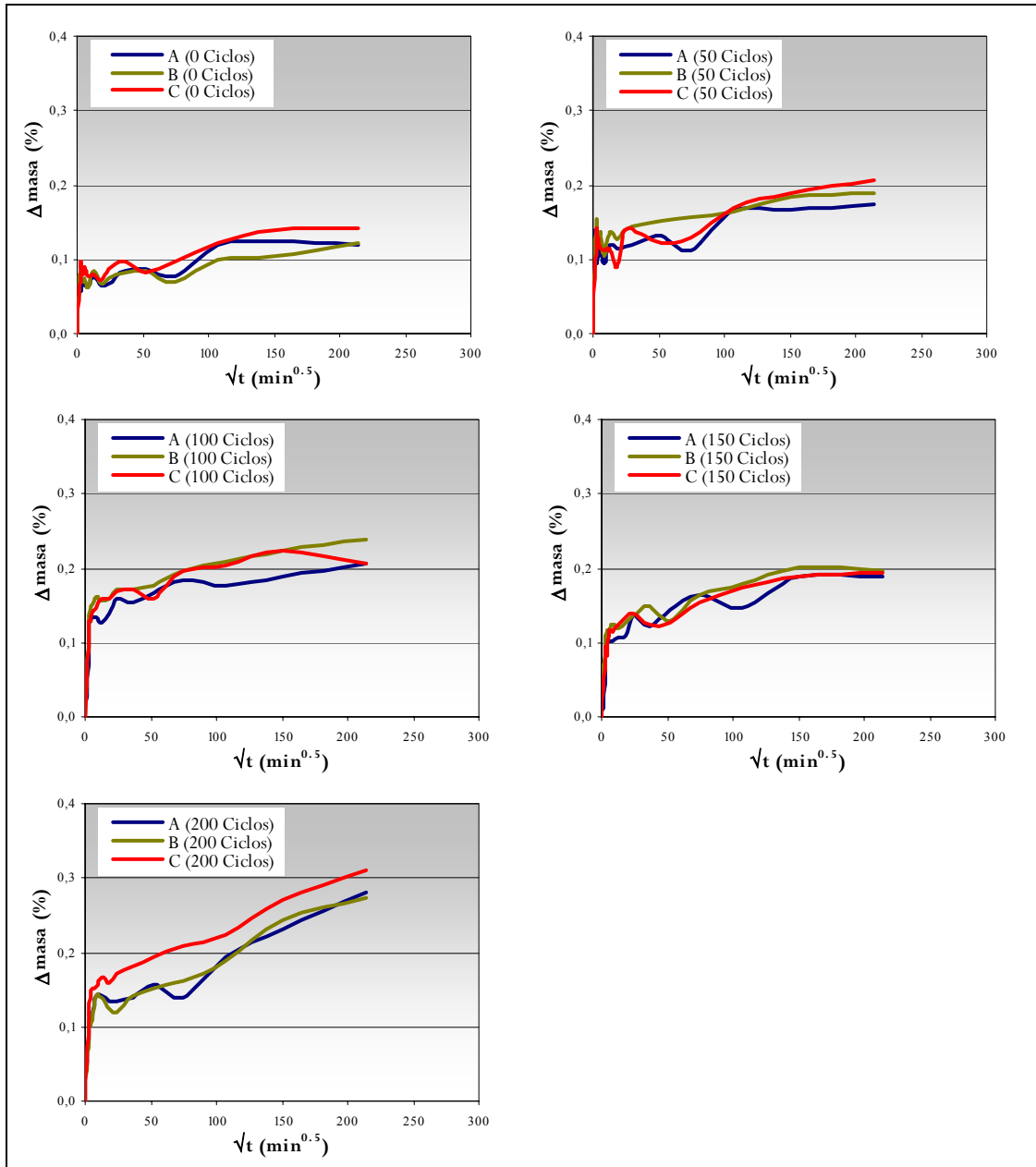


Figura 6.33. Curvas de absorción para el material grupo A, B y C y las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

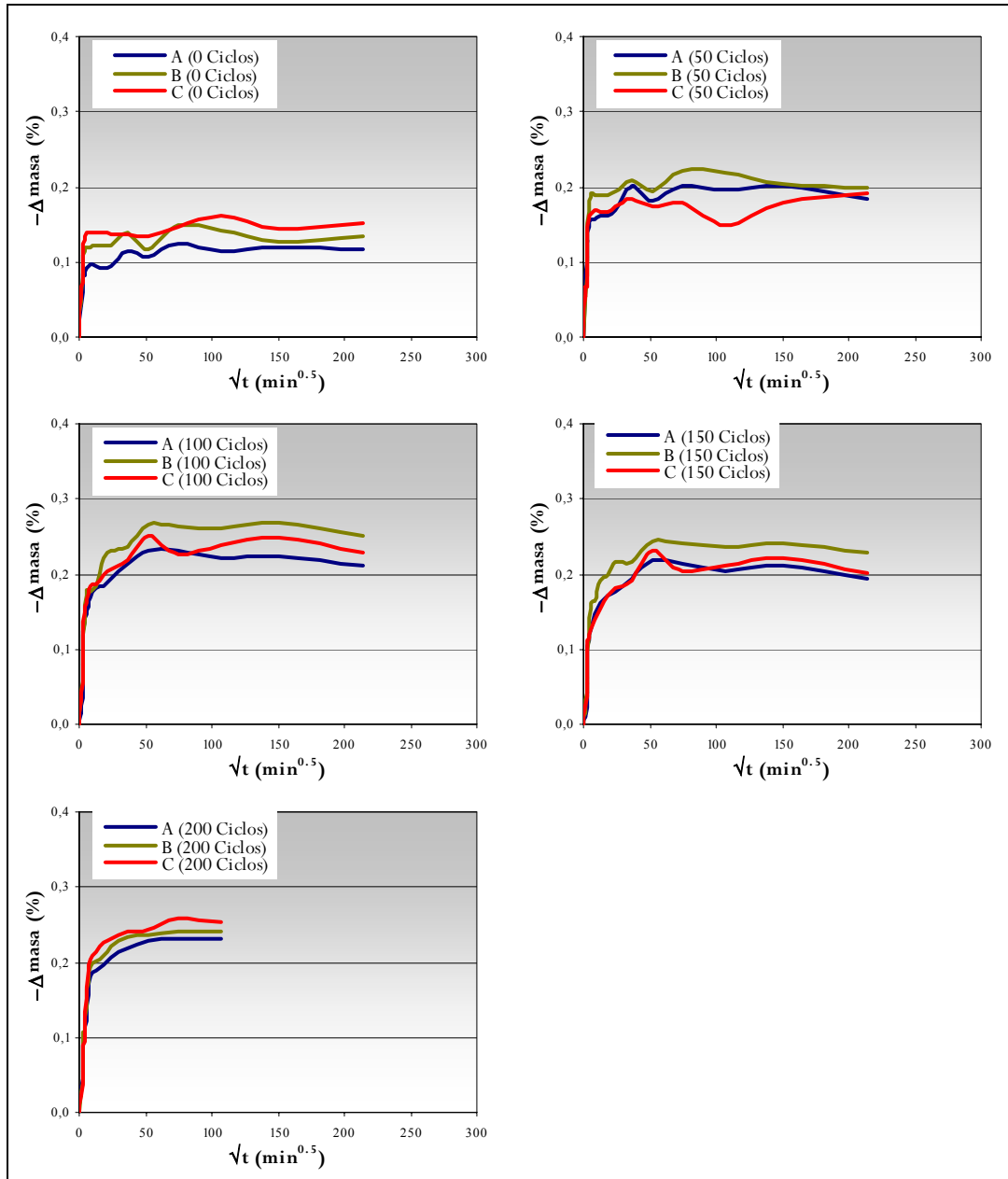


Figura 6.34. Curvas de desorción para el material grupo A, B y C y las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

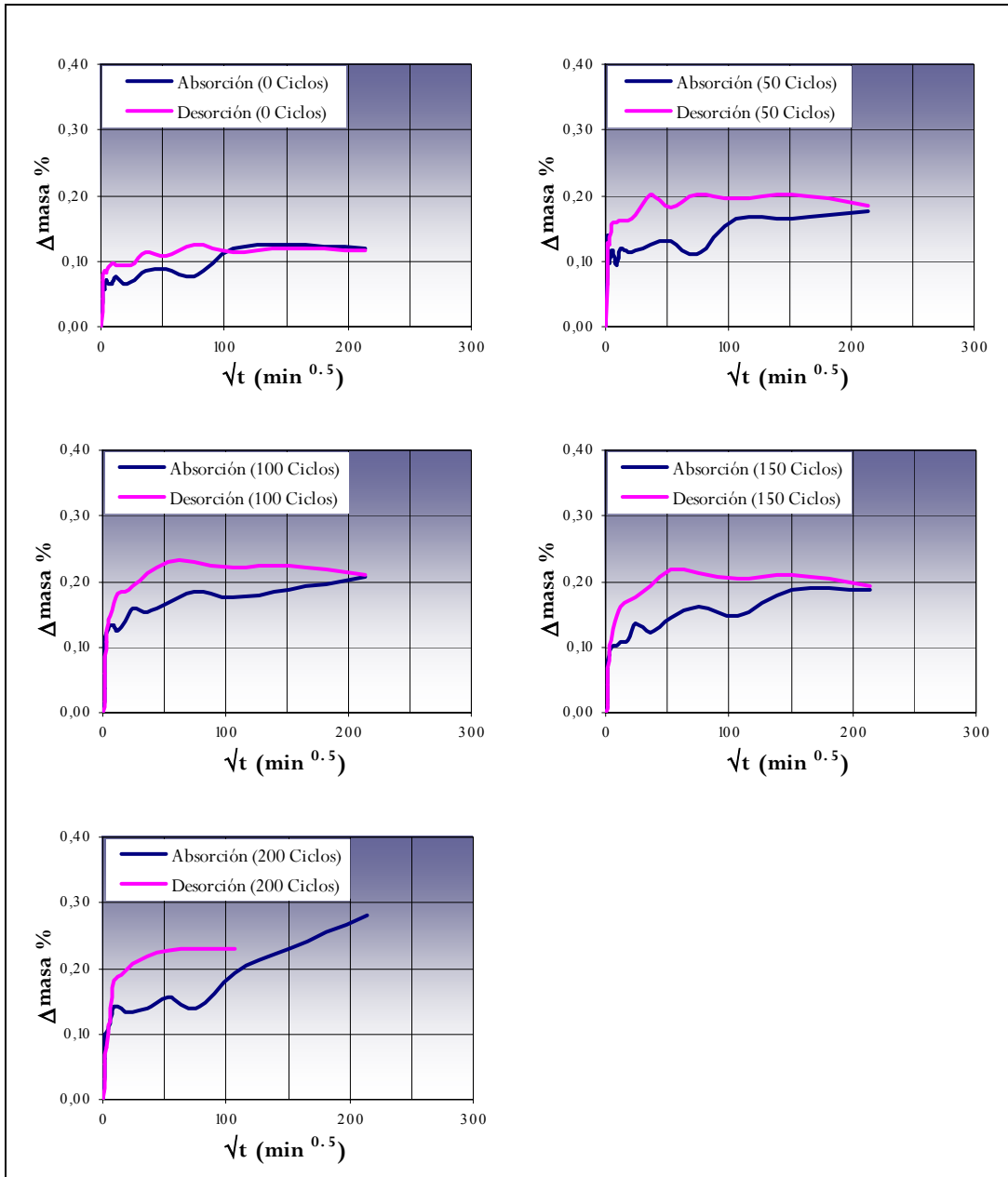


Figura 6.35.A. Curvas de absorción-desorción para el material grupo A en las distintas tandas de ciclos realizadas (0, 50, 100, 150 y 200). Los incrementos de masa en desorción son negativos ( $-\Delta \text{masa } \%$ ).

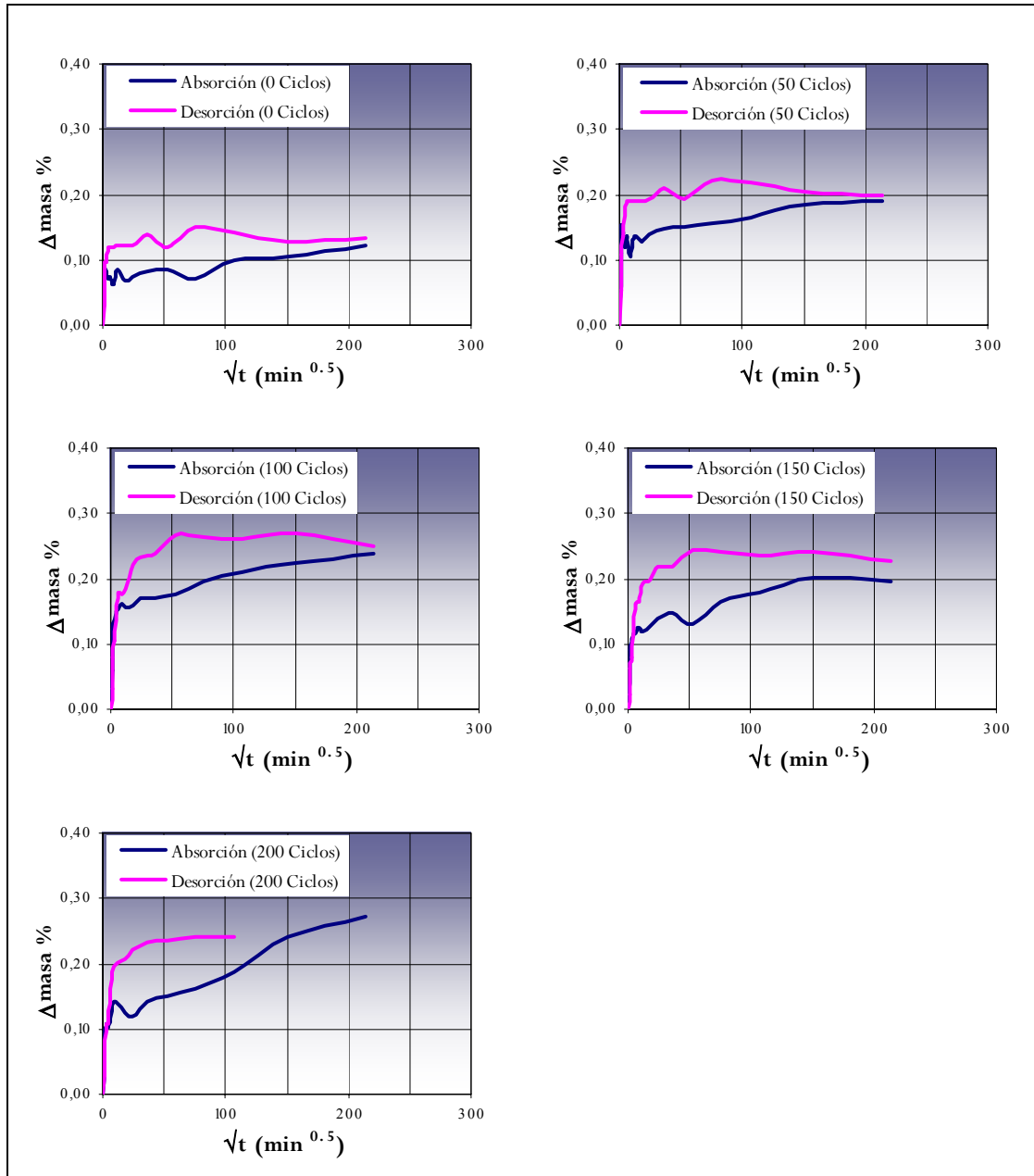


Figura 6.35.B. Curvas de absorción-desorción para el material grupo B en las distintas tandas de ciclos realizadas (0, 50, 100, 150 y 200). Los incrementos de masa en desorción son negativos ( $-\Delta \text{masa} \%$ ).

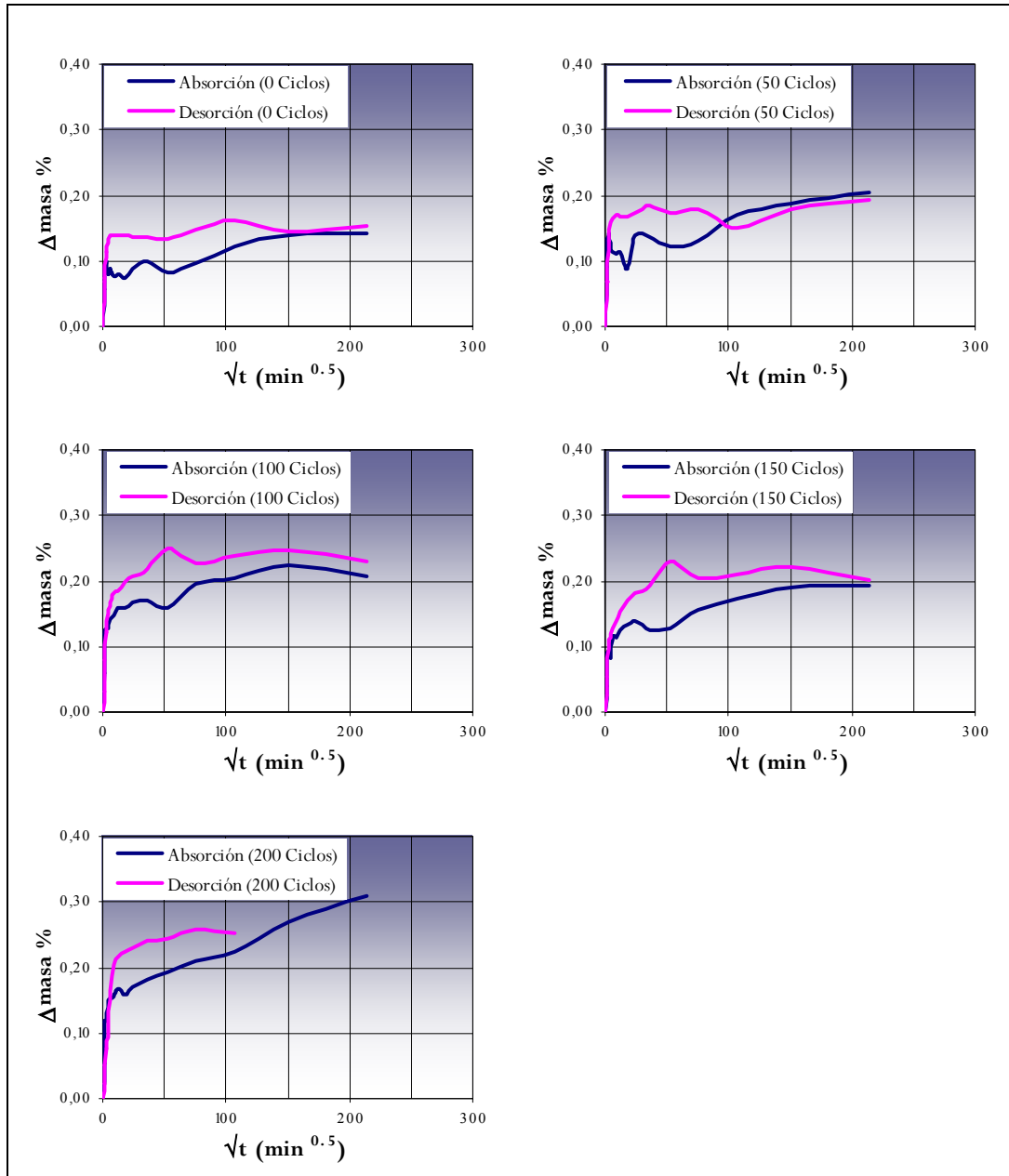


Figura 6.35.C. Curvas de absorción-desorción para el material grupo C en las distintas tandas de ciclos realizadas (0, 50, 100, 150 y 200). Los incrementos de masa en desorción son negativos ( $-\Delta\text{masa } \%$ ).

Tabla 6.12. Valores medios de índice de absorción (IA) e índice de desorción (ID) para los grupos de probetas A, B y C en las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200).

Nº ciclos	IA			ID		
	A	B	C	A	B	C
0	0,12	0,12	0,15	0,29	0,24	0,36
50	0,17	0,20	0,21	0,38	0,38	0,32
100	0,21	0,26	0,24	0,35	0,38	0,36
150	0,19	0,23	0,21	0,38	0,37	0,39
200	0,28	0,27	0,31	0,40	0,38	0,38

$$IA = \frac{\Delta M}{M} \times 100$$

$$ID = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) dt}{Q_{\max} \times t_f}$$

### 6.7.2. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Como se especifica en el apartado metodológico, se ha medido la permeabilidad al vapor de agua de probetas de los tres grupos sometidas a diferente número de ciclos.

Las diferencias de pesada constante para cada probeta que permiten obtener el valor de permeabilidad, son generalmente de 0,01-0,02 g, límite de pesada de la báscula que se ha podido utilizar (téngase en cuenta que el peso del conjunto, es decir, cápsula más probeta es del orden de 200 g).

Estas diferencias mínimas de peso referidas a la superficie expuesta a evaporación implican una permeabilidad de 6,28 a 12,56, lo que nos indica que la variabilidad de los valores obtenidos es al menos de ese orden.

En la Tabla 6.13 se reúnen los valores medios de permeabilidad para las distintas probetas y número de ciclos. Los valores obtenidos y la variabilidad mínima comentada para los mismos, sólo nos permiten concluir la baja permeabilidad al vapor de agua del material de las probetas, sin que puedan establecerse hipótesis sobre la incidencia del número de ciclos o el grado de mineralización grisácea.

Tabla 6.13. Valores medios de permeabilidad al vapor de agua ( $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h}$ ) y desviación estándar para los grupos A, B y C para las tandas de ciclos establecidas.

Superficie atravesada por el flujo de vapor ( $\text{m}^2$ ): 0,00159 Espesor de las muestras (cm): 1 Temperatura durante el ensayo ( $^{\circ}\text{C}$ ): 20 Presión parcial de vapor (mm Hg): 17,535			
Grupo	Nº ciclos	Permeabilidad media	STD
A	0	18	1,8
	50	8	1,6
	100	10	2,9
	150	8	0,7
	200	12	-
B	0	16,43	3,2
	200	6,6	-
C	0	14,36	1,4
	200	6	-

### 6.7.3. ÁNGULO DE CONTACTO

Se exponen y discuten a continuación los resultados obtenidos sobre las probetas de los grupos A, B y C sometidas a los ciclos de calentamiento-enfriamiento establecidos.

La totalidad de los datos obtenidos para las 45 probetas ensayadas se recogen en la Tabla 1 del Anexo 9. Se recogen aquí distintos valores medios para cada probeta transcurridos 40 segundos tras la deposición de la gota. Diversos ensayos previos nos han hecho adoptar este tiempo como el óptimo al cual los valores de ángulo de contacto se han estabilizado, y no es aún perceptible el efecto de la evaporación.

Dado que en cada probeta se han depositado 36 gotas según posiciones esquematizadas en la Figura 6.36, la evolución de los valores de ángulo de contacto han inducido a agrupar o considerar tres zonas de gotas en cada probeta: una zona periférica (1), otra intermedia (2) y otra interna (3), tal y como se esquematiza en la Figura 6.36.

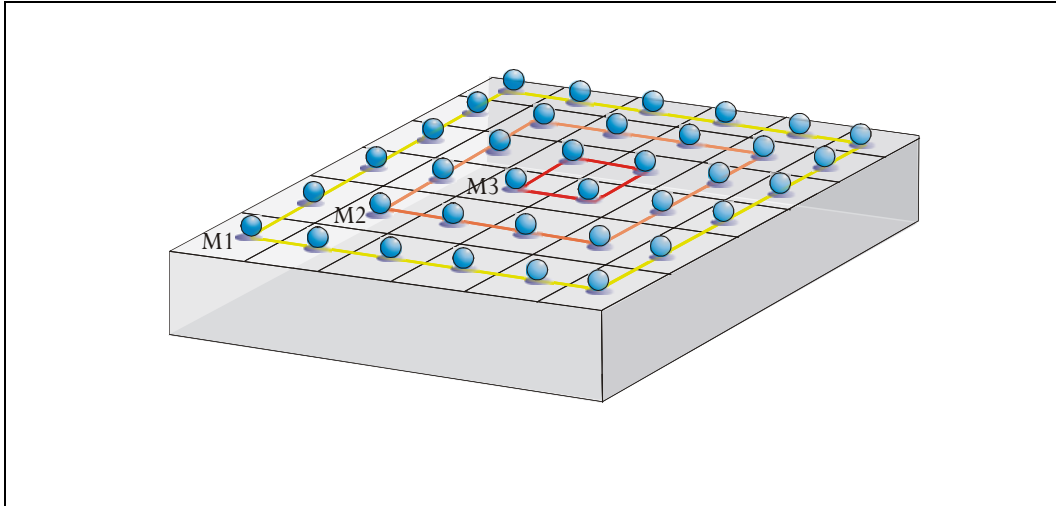


Figura 6.36. Esquema de la distribución de las gotas y zonas de valor medio consideradas en las probetas  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ .

En la Tabla 6.14 se recogen los valores medios de ángulo de contacto tras 40 segundos en cada una de las zonas establecidas, y el valor medio total para cada grupo de probetas tras cada uno de los ciclos. Se recogen además las diferencias de valores entre la zona periférica y la interior.



Tabla 6.14. Valores medios de ángulo de contacto (en grados) tras 40s para los distintos grupos A, B y C en las distintas tandas de ciclos establecidas.  $M_1$  valores en zona periférica,  $M_2$  valores en zona intermedia y  $M_3$  valores en zona interna.  $M_3-M_1$  incremento de ángulo de contacto entre zona interna y zona periférica.

Grupo Probeta	Nº ciclos	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_T$	$M_3-M_1$
A	0	66,59	79,86	79,21	72,42	12,62
	50	60,85	65,65	64,21	62,83	3,36
	100	65,90	79,32	80,07	71,95	14,16
	150	54,57	67,74	71,74	60,87	17,18
	200	76,42	88,51	87,11	81,64	10,69
B	0	56,55	62,27	70,79	60,04	14,24
	50	60,01	68,37	71,95	64,12	11,94
	100	58,07	66,40	77,81	63,04	19,73
	150	53,96	63,20	70,35	59,21	16,39
	200	74,65	92,85	100,56	83,60	25,91
C	0	60,04	62,60	62,10	61,12	2,06
	50	56,62	61,48	59,95	58,62	3,32
	100	58,70	65,83	67,26	62,03	8,56
	150	66,43	74,32	78,71	70,43	12,28
	200	78,17	84,73	88,81	81,54	10,65

En la Tabla 6.15 se recogen los valores medios totales en cada zona y las diferencias entre zona periférica y zona interna, para el conjunto de las 45 probetas medidas, tras cada uno de los ciclos.

Tabla 6.15 Valores medios de ángulo de contacto para el conjunto de las 45 probetas tras 40s.  $M_T$  valores totales,  $M_1$  valores en zona periférica,  $M_2$  valores en zona intermedia y  $M_3$  valores en zona interna.  $M_3-M_1$  incremento de ángulo de contacto entre zona interna y zona periférica.

Nº ciclos	$M_T$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_3-M_1$
0	64,53	61,06	68,24	70,70	9,64
50	61,86	59,16	65,17	65,37	6,21
100	65,67	60,89	70,52	75,04	14,15
150	63,50	58,32	68,42	73,60	15,28
200	82,26	76,41	88,70	92,16	15,75

En la Figura 6.37 se representan los valores medios totales de ángulo de contacto de la Tabla 6.14 ( $M_T$ ) para cada grupo y número de ciclos, y en la Figura 6.38 se representan los valores medios de ángulo de contacto de la Tabla 6.15 (los totales  $M_T$  y los correspondientes a cada una de las zonas establecidas ( $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ )).

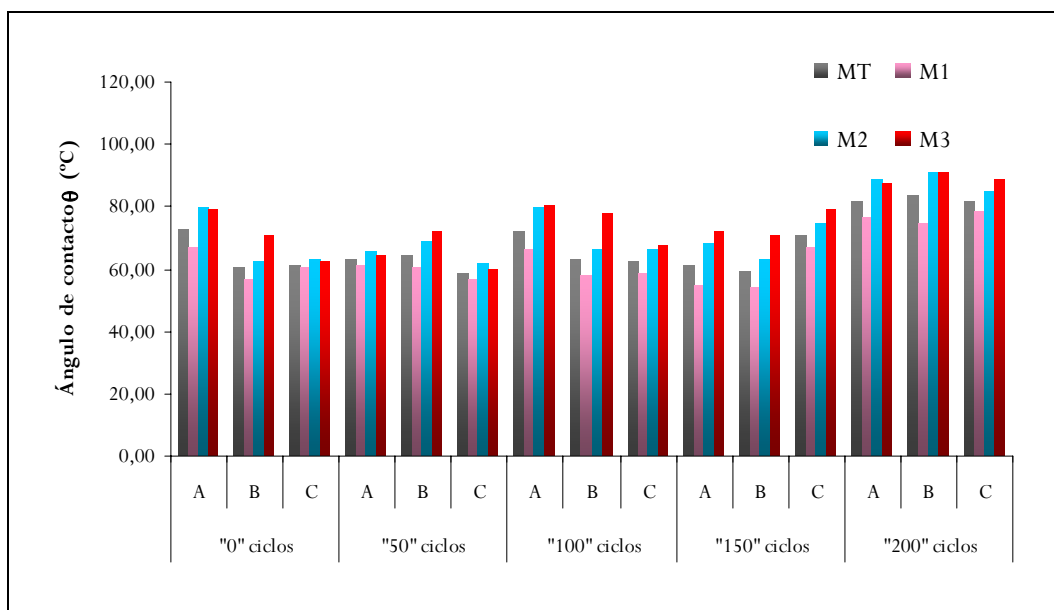


Figura 6.37. Variabilidad del ángulo de contacto para cada uno de los grupos establecidos (A, B y C) según los valores medios total y por zonas para las tandas de ciclos realizadas (0, 50, 100, 150 y 200).

Los datos de la Tabla 6.15 y su representación (Figura 6.38) indican que mientras que entre "0" y "150" ciclos no hay gran incidencia sobre el ángulo de contacto, este valor se incrementa tras "200" ciclos; es decir, el material se hace más hidrorrepelente (o menos permeable). Este fenómeno también ocurre para cada uno de los grupos por separado (Tabla 6.14 y Figura 6.37).

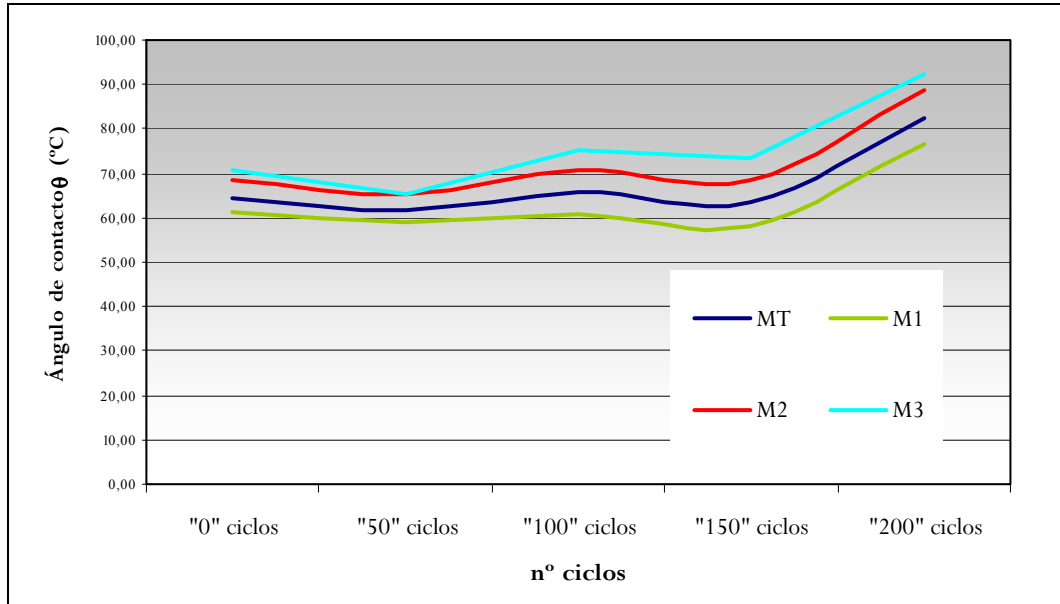


Figura 6.38. Variabilidad del ángulo de contacto para las distintas tandas de ciclos establecidas (0, 50, 100, 150 y 200) según los valores medios total y por zonas obtenidos.

En términos generales los valores de ángulo de contacto para las probetas del grupo C son algo inferiores a los del grupo A y B para un mismo número de ciclos (salvo a “150” ciclos). No obstante, la escasa entidad de estas diferencias de valores de ángulo de contacto entre los distintos grupos, para un mismo número de ciclos, no permiten establecer hipótesis sobre estas diferencias.

Se observa por otra parte que siempre, independientemente del número de ciclos, el valor del ángulo aumenta del exterior al interior de la probeta ( $M_1$  siempre presenta un valor inferior a  $M_2$  y  $M_3$ ), diferencia que parece incrementarse con el número de ciclos (véase evolución de los valores  $M_3-M_1$  de la Tabla 6.15).

## 6.8. COLORIMETRÍA

Como se comentó en el Capítulo de Materiales y Métodos para este ensayo se han estudiado 75 probetas de los distintos grupos (A, B y C), sometidas a los distintos ciclos de estrés térmico establecidos.

Según lo expuesto en el citado capítulo tres son los índices de blancura habituales en material de color cercano al blanco; por ello se ha optado por obtener dichos índices y determinar cual el más idóneo. Con este motivo en la Figura 6.39 se han representado los tres índices medidos en las 25 probetas del grupo A, en los que puede observarse una tendencia similar en todos ellos, de manera que los valores de reflectancia conforme se avanza en el número de ciclos son menores y por tanto el amarilleamiento es mayor.

Para el estudio de las 75 muestras pertenecientes a los distintos grupos (A, B y C) y tandas de ciclos de estrés térmico hemos escogido a tenor de los resultados de la Figura 6.39 como índice de blancura más representativo el propuesto por la CIE (Comision International de la Iluminación),  $WI_{CIE1931}$ .

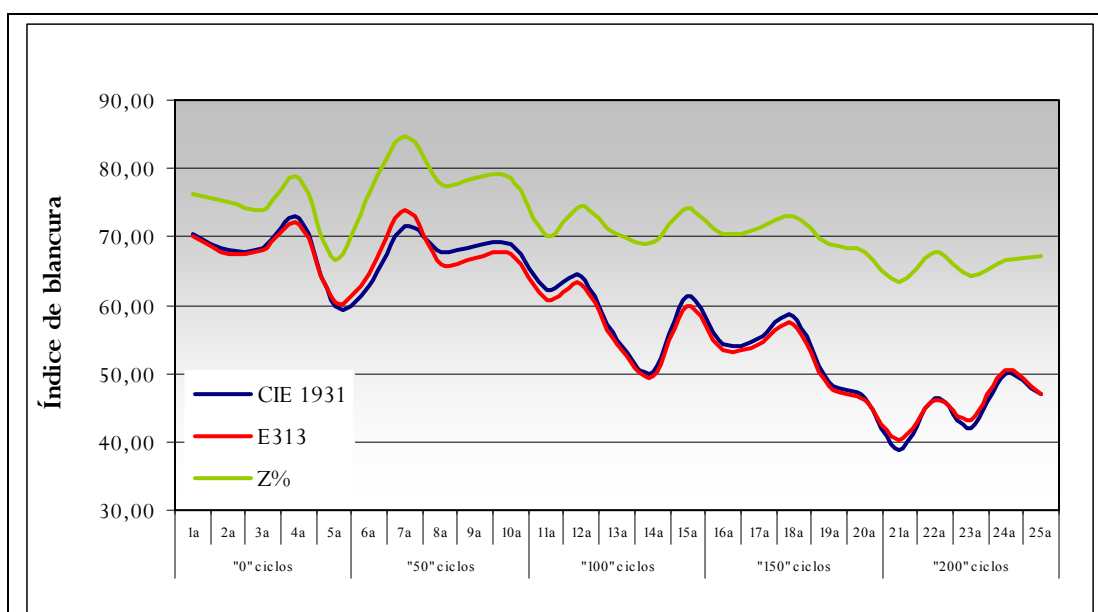


Figura 6.39. Representación de las variaciones de índice de blancura estudiados en las probetas del grupo A.

Como se observa en la gráfica los índices 1931 y E313 casi “calcan” los resultados para todas las muestras, por lo tanto nos basta con escoger una de las dos.

Dado que en la definición del índice E313 aparece el índice  $Z\%$ , escogemos el índice CIE1931. Además entre los índices CIE1931 y  $Z\%$ , se observa que el primero presenta una mayor variabilidad en la representación de los datos por ello, finalmente, lo escogemos para mostrar nuestros resultados.

En la Tabla 1 del Anexo 10 se muestran los valores de las coordenadas de cromaticidad ( $x$ ,  $y$  e  $Y$ ) medidas en todas las muestras, así como los índices de blancura calculados para las probetas A, B y C.

Para el material del grupo A no sometido a ciclos resulta un valor de Índice de Blancura (WI) CIE1931 de 67,86 (valor medio de las 5 probetas). Este valor va disminuyendo para los grupos B y C lógicamente, debido a los bandeados grisáceos.

En la Figura 6.40 se representan los valores de índice de blancura (WI) CIE 1931 para los grupos de probetas A, B y C sometidos a los distintos ciclos de estrés térmico (valores medios de cada 5 probetas de cada grupo sometidas a un mismo número de ciclos de estrés térmico).

No obstante una cierta dispersión de valores, se observa para los grupos A y B un alejamiento del “blanco perfecto”, siendo los valores cada vez menores y manteniendo por tanto una tendencia a la baja.

Por el contrario la Figura 6.40 nos muestra para el grupo C un comportamiento inverso y en consecuencia la tendencia de los valores es positiva, lo que indica la no adecuación de este índice de blancura al material con abundante bandeo grisáceo.

Como confirmación de lo expuesto observamos como la dispersión de valores aumenta del grupo A al B y de este al C.

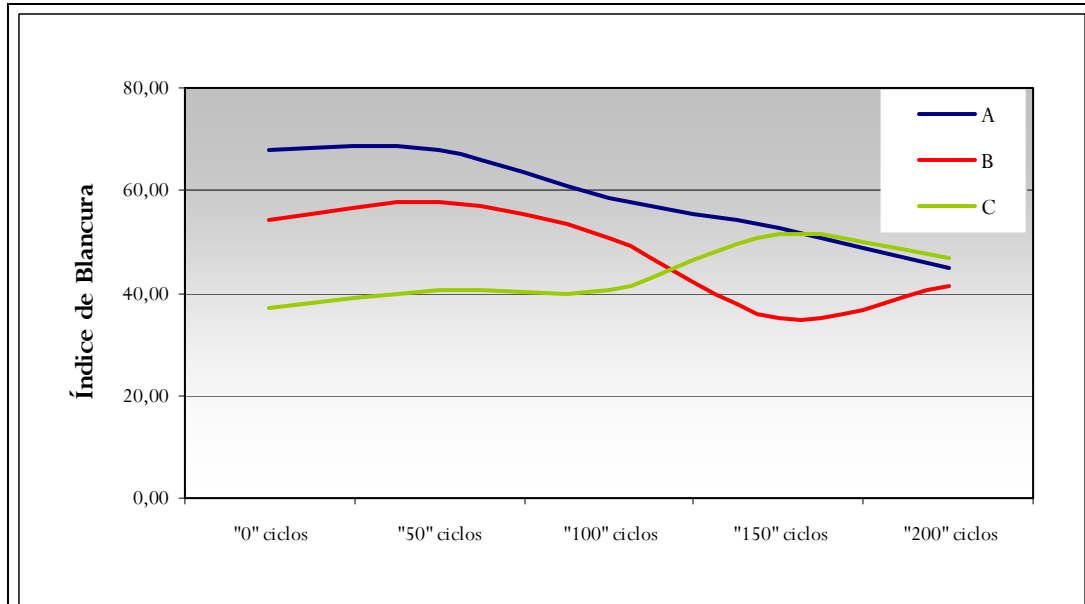


Figura 6.40. Representación gráfica de las variaciones de índice de blancura  $CIE_{1931}$  en los tres grupos de probetas estudiados A, B y C para las tandas de ciclos establecidos (0, 50, 100, 150 y 200).

## 6.9. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) ha puesto de manifiesto que en el caso de las muestras estudiadas, las imágenes de electrones secundarios (IES) obtenidas sobre láminas delgadas y fragmentos de columna y probeta proporcionan una información complementaria a la obtenida mediante microscopio óptico (Cap. 6.1) ya que ponen de manifiesto diferencias texturales más sutiles en la muestra que pueden ser el resultado de los tratamientos a los que ha sido sometido o a los procesos naturales sufridos por las columnas.

Las imágenes de muestras no sometidas a ciclos muestran superficies bastante homogéneas y en ellas apenas resaltan trazos geométricos (Figura 6.41), mientras que las muestras sometidas a “200” ciclos (Figura 6.42) presentan, en las partes de la lámina delgada correspondiente a caras externas de la muestra, imágenes en las que los granos de calcita exhiben netamente la exfoliación romboédrica característica, así como los bordes de grano y algunas microfracturas. Estos rasgos se hacen más patentes en las muestras sometidas a un mayor número de ciclos.

De igual forma en las muestras de columnas se observa una mayoración de los efectos comentados para las muestras sometidas a ciclos. En este caso la exfoliación observada en las anteriores ha derivado en fracturas que separan totalmente los granos de calcita (Figura 6.43).

Las imágenes de electrones secundarios obtenidas sobre fragmentos permiten la visualización de los efectos comentados en tres dimensiones, así en la Figura 6.44 (“0” ciclos) se observa un estado compacto de los granos de calcita, que evoluciona a microfracturación y desagregación cuando el material ha sido sometido a distintos ciclos de estrés térmico, pudiéndose comprobar como ésta sigue los bordes de grano (Figura 6.45).

En la Figura 6.46 que corresponde a la muestra obtenida de la columna 17 se aprecia como los efectos de microfracturación y desagregación alcanzan su máximo desarrollo hasta conseguir una separación intergranular total.

No obstante, debe mencionarse que los rasgos descritos pueden ser en parte enmascarados por un efecto similar que provoca el proceso de corte de las muestras para la obtención de las “probetas” y sobre todo, para la elaboración de las láminas delgadas, especialmente, cuando estos cortes no se han realizado con el suficiente cuidado.

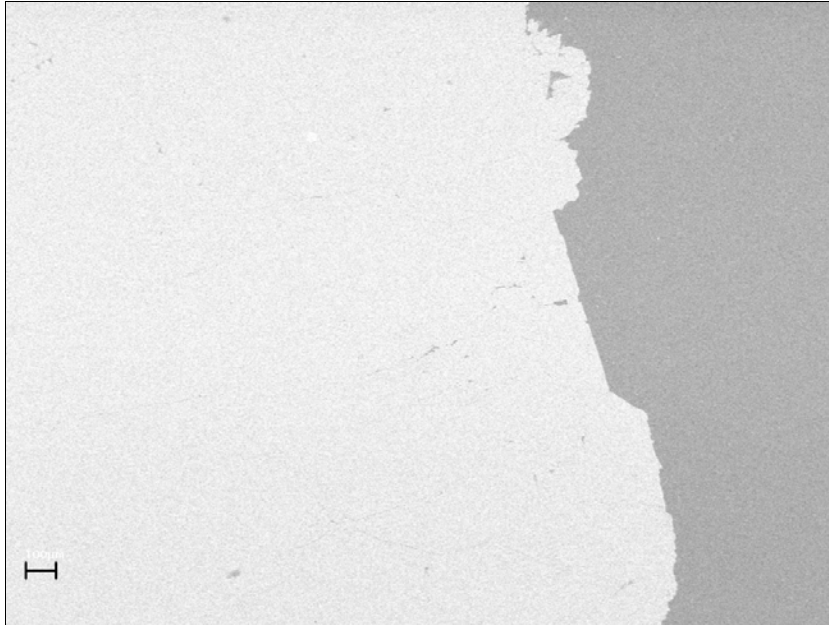


Figura 6.41. Imagen de SEM sobre lámina delgada de la probeta 1a (grupo A), cara externa, “0” ciclos que presenta una notable homogeneidad (Longitud de la escala 100 μm).

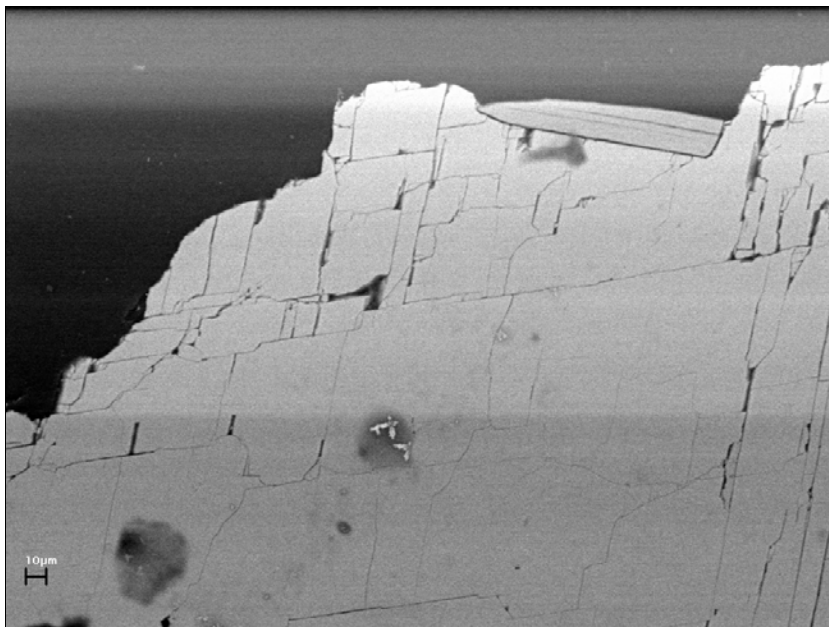


Figura 6.42. Imagen de SEM sobre lámina delgada de la probeta 21a (grupo A), cara externa, “200” ciclos. Se destaca la exfoliación romboédrica de los cristales de calcita especialmente en la zona externa (Longitud de la escala 10 μm).



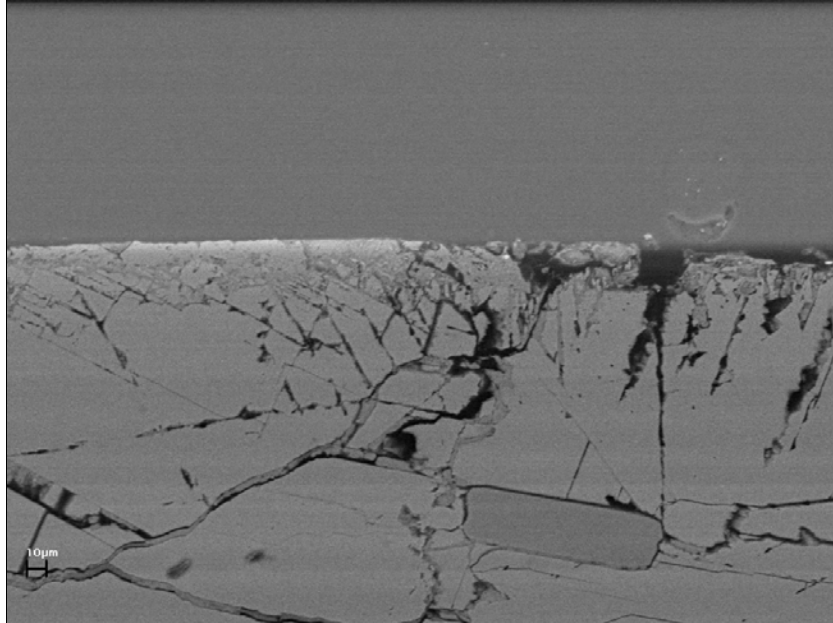


Figura 6.43. Imagen de SEM sobre lámina delgada de la columna 13. Se alcanza un gran desarrollo en la microfracturación y es acusada la separación intergranular (Longitud de la escala 10  $\mu\text{m}$ ).

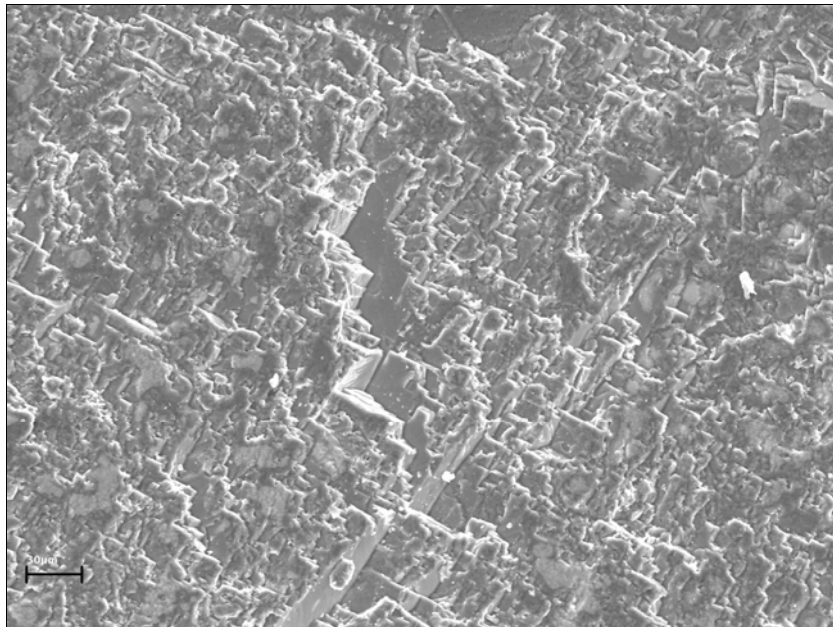


Figura 6.44. Imagen de SEM sobre fragmento de la probeta 1a (grupo A) “0” ciclos. Destaca el aspecto homogéneo de la muestra (Longitud de la escala 30  $\mu\text{m}$ ).

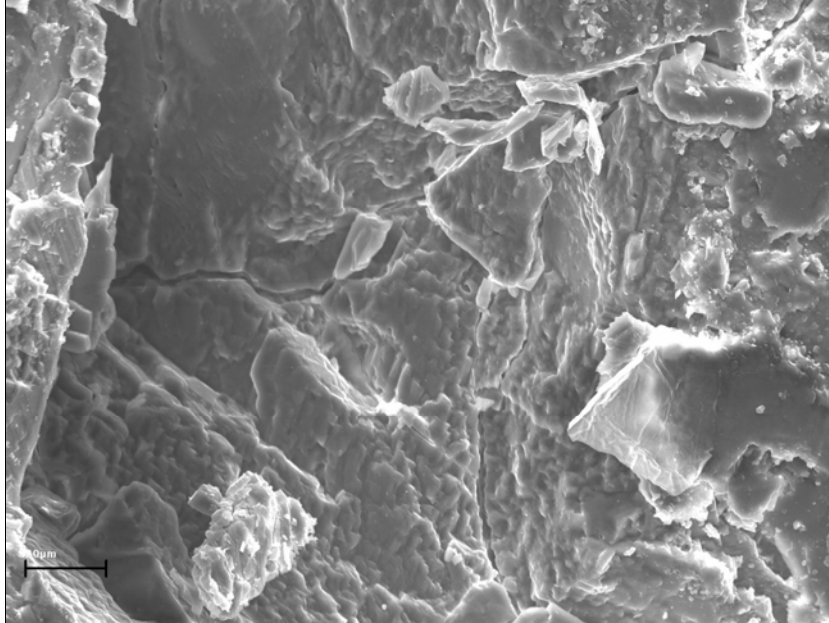


Figura 6.45. Imagen de SEM sobre fragmento de la probeta 21a (grupo A) “200” ciclos. Destaca la microfracturación y desagregación (Longitud de la escala 20  $\mu\text{m}$ ).

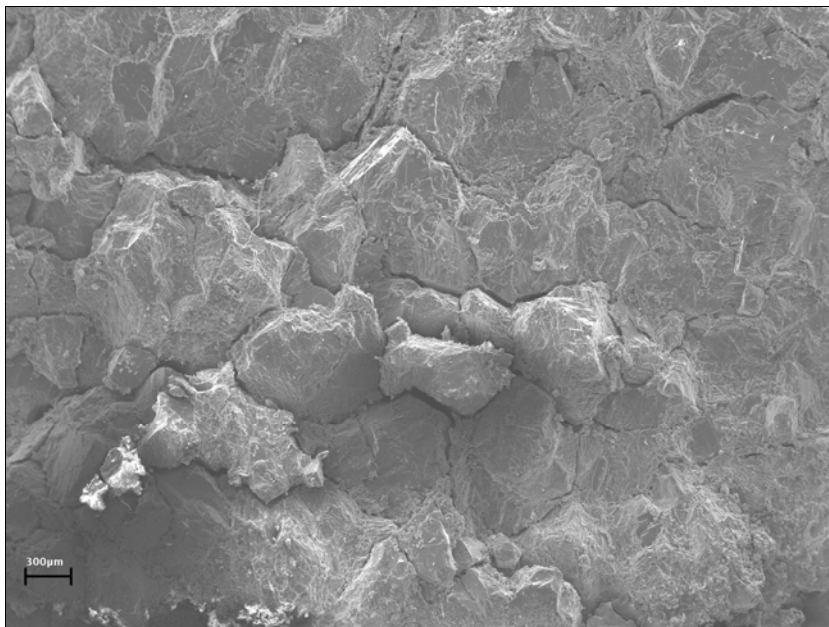


Figura 6.46. Imagen de SEM sobre fragmento de la columna 17. Se aprecia un elevado grado de desagregación de los granos (Longitud de la escala 300  $\mu\text{m}$ ).



# **7 DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES**





# 7 DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

Corresponde aquí una reflexión sintetizadora de cada uno de los apartados desarrollados y una implementación o correlación entre los datos aportados por cada uno de ellos.

Siguiendo el orden expositivo de esta Memoria cabe un primer comentario o conclusión sobre la evolución e intervenciones en el Patio. El seguimiento cronológico de intervenciones en el mismo y estancias anejas hasta la actualidad (año 2003), nos pone de manifiesto que esa característica de restructuración, reedificación, relectura, ... e incluso innovación del Conjunto Monumental, se mantiene, motivada y condicionada ahora por la principal función actual de la Alhambra: un marco turístico-cultural, en el que, en principio, dos objetivos contrapuestos: el de su conservación, y el de la resolución de los aspectos de infraestructura y acomodación a que el ingente número de visitantes obliga, dan respuesta (y no siempre justificación) a la política de intervenciones de los últimos 25 años.

El estudio pormenorizado de las condiciones climáticas de cada zona de la columnata así como de cada columna, y la descripción que del estado de conservación

de cada una de ellas se hace, permite establecer una mayor correlación entre el desarrollo y ubicación de los diversos tipos de deterioro observados, con una mayor exposición a los agentes ambientales determinantes: orientación, gradientes de temperatura, horas de exposición solar, etc., correlación que para algunos elementos no parecería tan evidente, si no se comprueban sus condiciones especiales de asoleo, y que nuestro desarrollo gráfico individualizado en altura y orientación para cada columna resuelve.

Se observan no obstante columnas cuyo estado ostensiblemente no corresponde con su ubicación en el Patio, fundamentalmente las columnas 9, 20, 48 y 74, lo que debe haber implicado su reposición o cambio de ubicación en alguna de las múltiples intervenciones.

El estudio realizado permite, por otra parte, establecer algunas consideraciones sobre la evolución que el deterioro de las columnas ha experimentado en los últimos 13 años. El principal elemento de deterioro, la descamación, no parece presentarse en columnas que antes no la presentaban, pero su extensión en muchas de las columnas se sigue ampliando (aquellas de mayor temperatura y asoleo), lo que nos hace concluir que estas columnas presentan un proceso de descamación “activa”, mientras que otras columnas parecen encontrarse en un estado estacionario o de no desarrollo de nuevas descamaciones. Su ubicación en zonas no asoladas vuelve a confirmar la relación entre deterioro y zonas, y el cambio de ubicación de estas últimas.

En cuanto a los agentes medioambientales que propician el deterioro del material marmóreo de las columnas, es claro el papel determinante que juegan los gradientes térmicos asociados a las variaciones climáticas y condiciones de asoleo, que son agentes de la principal causa de deterioro: la descamación.

Así mismo, debe considerarse la contribución que a estos agentes aportan los considerables valores de humedad en los meses invernales, asociados a temperaturas bajo cero grados lo que evidentemente agravará el proceso disruptor.

Los análisis químicos del material marmóreo desprendido de las columnas ponen de manifiesto pequeñas cantidades de Pb (7 a 24 ppm), que pueden relacionarse con gases procedentes de combustión de carburantes. El nivel es aún afortunadamente escaso, pero cabría la instalación de medidores de gases contaminantes y controlar sus concentraciones sobre todo en condiciones de alta humedad relativa.

No es desdeñable el efecto de deterioro derivado del “mal uso” (visitantes e intervenciones), lo que habría que minimizar.



El estudio constructivo-estructural que bajo los auspicios de la Teoría de la Resistencia de Materiales se ha realizado, en ningún momento ha encontrado contraposiciones con la realidad arquitectónica en la que se ha llevado a cabo. Esta constatación, junto a la acusada sensación de ligereza que emana del conjunto de la obra, confirman que los responsables de su construcción poseían un sólido y vasto conocimiento empírico de este tipo de construcciones, así como un elevado concepto de la sistematización de las soluciones constructivas y de la economía o adecuación a los recursos disponibles.

Se delimitan los elementos constituyentes de la estructura, diferenciándose dos anillos prácticamente independientes: columnata y templete por una parte, y los elementos que conforman las restantes dependencias del Palacio, que constituyen en si mismas una estructura autoportante.

Queda justificada estructuralmente la disposición y agrupación de columnas y vanos, comprobándose que no obedece exclusivamente a cuestiones estéticas. La dimensión del módulo “m” determinado por nosotros (longitud entre dos agrupaciones consecutivas de dos columnas) pensamos viene determinada por las posibilidades del material empleado.

El cálculo, realizado en el supuesto más desfavorable, arroja un resultado de 1,485 T de carga por columna, carga que en principio es análoga para todas.

Se determina la incidencia de posibles excentricidades sobre la resistencia mecánica del material de las columnas, aspecto de suma importancia dada la constancia de algunos desplomes en las cargas que actúan sobre la columnata.

Estos desplomes provocan excentricidades en las cargas que actúan sobre las columnas. La causa de los mismos habrá que buscarla, fundamentalmente, en ligeros movimientos de sus arranques (por reblandecimiento del terreno por fugas o circulación incontrolada de agua). Los tirantes dispuestos de modo irregular advierten que se han debido producir manifestaciones de inestabilidad irregulares, ya que así lo es su actual localización.

En principio, mecánicamente nada justifica que, en condiciones normales, la construcción pueda perder estabilidad con el paso del tiempo. Esta podrá producirse por el deterioro de los materiales que la constituyen. Por tanto, con un mantenimiento adecuado de la construcción, cabe esperar una larga vida para esta unidad arquitectónica. Conviene no obstante una comprobación o control de las posibles excentricidades o desplomes, así como de la estabilidad del sustrato soporte.

Por lo que se refiere a la incidencia de los ciclos de estrés térmico sobre el material de probetas, los ensayos referentes al comportamiento mecánico e hídrico de

dicho material son coincidentes: tras “200” ciclos los datos de resistencia mecánica, velocidad de ultrasonidos, absorción-desorción y esclerométricos indican una disminución apreciable de su resistencia mecánica y compacidad. Como confirmación de lo dicho, puede comprobarse que la variación de valores para las técnicas anteriores entre muestras no sometidas a ciclos y tras “200” ciclos oscila, entre el 20 y el 50%.

En general las muestras desprovistas de mineralización grisácea (grupo A) presentan mejores características que aquellas con abundante mineralización; no obstante, conforme avanza el número de ciclos las características de ambos tipos de material, en bastantes casos, parecen homogeneizarse. En cualquier caso, al menos porcentualmente, los ciclos no parecen afectar más al grupo C que al A (incluso parece que, en general, lo contrario).

Un hecho claramente apreciable es la brusca variación de valores que para los distintos ensayos tiene lugar tras los primeros “50” ciclos; posteriormente la evolución del material hasta “200” ciclos es más paulatina y suave, como si se produjese un “acomodo estructural” del material ensayado.

Por lo que se refiere a los mecanismos del principal deterioro: la descamación, las fotos de microscopía electrónica de material de columnas y de probetas son reveladoras: el proceso de desagregación por pérdida de cohesión intergranular claramente apreciable en las imágenes del material de las columnas, es también claramente apreciable en las imágenes del material de probetas tras ser sometido a “200” ciclos. El que estos rasgos texturales se manifiesten más marcados en el material sometido a ciclos, y en el de las columnas, y que se aprecien separaciones que indican desagregaciones notables, es la expresión de la dilatación residual resultado de la extrema anisotropía del coeficiente de expansión térmica de la calcita, y su localización evidencia que el proceso de degradación y de pérdida de cohesión de la muestra afecta con preferencia a las zonas más externas de la misma.

Esto nos permite concluir y demostrar que el factor ambiental determinante del proceso de descamación de las columnas reside en los elevados y continuados gradientes térmicos a los que las columnas están expuestas, y que su mayor o menor afección depende de su ubicación en el Patio, y por tanto de su mayor o menor exposición a estos gradientes.

Mención especial merece la consideración de la anisotropía en el comportamiento del material marmóreo y la existencia de una posible orientación preferencial de los cristales de calcita.

En nuestro caso, los estudios de orientación cristalográfica, indican una orientación preferencial del eje c de los cristales de calcita según direcciones más

próximas al plano basal de las probetas que a su eje longitudinal, lo que concuerda con los datos de velocidad de propagación de ultrasonidos. En efecto, si tenemos en cuenta que la máxima densidad de enlaces en la estructura de la calcita se sitúa en el plano perpendicular al eje c (Figura 7.1) plano en el que también se sitúan los grupos planares de  $\text{CO}_3^{2-}$ , en los que el enlace C-O es cuatro veces más fuerte que el O-Ca (Brown et al., 1973), y considerando así mismo una relación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia mecánica y compacidad del material, esto explica el que la velocidad de ultrasonidos sea mayor según la dirección longitudinal de las probetas (L) que según las otras dos direcciones laterales (S y P). Y en esta línea discursiva también debemos concluir que el material se deteriorará en mayor grado en estas superficies laterales que en las superficies basales. Un indicio de esto, dentro de sus limitaciones, puede constituirlo el hecho de que los valores de ángulo de contacto medido en las láminas “001” (basales) aumente de la periferia hacia el interior.

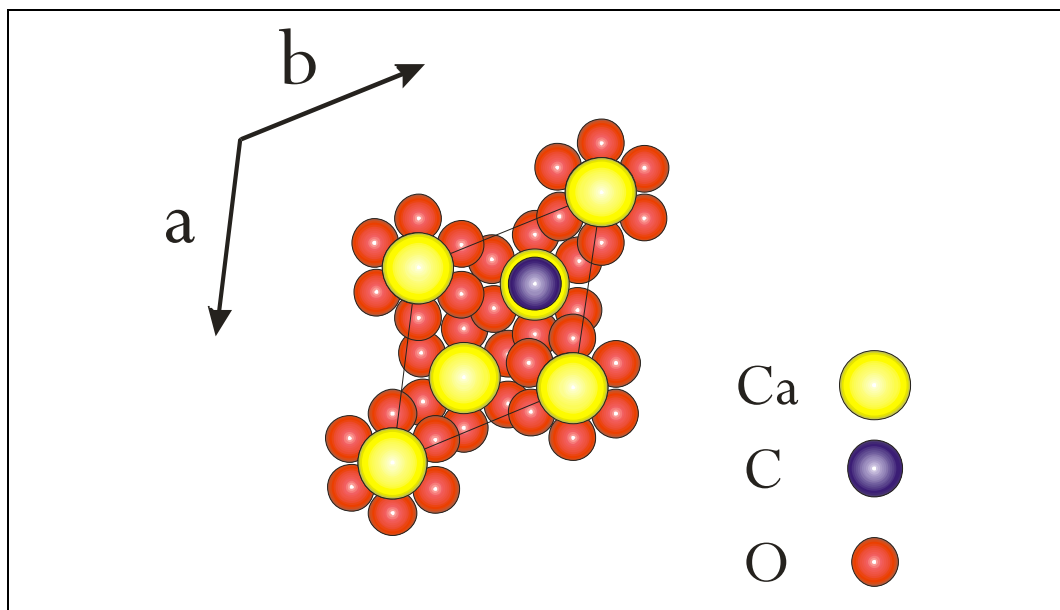


Figura 7.1. Esquema ilustrativo de la estructura de la calcita,  $\text{CaCO}_3$  en proyección según el plano (001).

Evidentemente, esto no debe implicar una extensión directa de lo obtenido en el material de las probetas al material de las columnas, pues conocido es las diferencias que la pertenencia a diversos frentes y niveles de extracción en la cantera implican sobre el material marmóreo. Sirvan en este caso nuestros resultados para concluir en la necesidad de conocer las posibles orientaciones cristalográficas del

material marmóreo para poder así evaluar con mayor precisión su comportamiento y variaciones direccionales del mismo.

En cuanto a la conjunción de factores estructurales y ambientales en el proceso de degradación de la columnata, hemos de partir de la asunción de similitud entre el material de probetas y el de la columnata. A este respecto resaltar las homogeneidades de valores de resistencia mecánica para los mármoles “Blanco Macael”, y la coincidencia de los valores hallados por nosotros con los de la gama mencionada.

Partimos igualmente de un paralelismo entre la evolución o efecto de los “200” ciclos en las probetas respecto al sufrido por las columnas.

Evidentemente los gradientes térmicos a los que el material de las columnas está expuesto es bastante menos acusado (unos 30°C máximo frente a los 120°C de las probetas), pero si consideramos la conjunción de otros factores tales como una acción mucho más prolongada en el tiempo, humedades relativas superiores y variables, etc., pueden permitírnos considerar un grado de afección análogo (e incluso mayor en las columnas según podría deducirse de las imágenes de SEM).

El estudio estructural-constructivo concluía que el material de las columnas estaba sometido a una tensión de carga de 0,58 MPa (5,8 kg/cm<sup>2</sup>). Asumiendo unos valores de resistencia mecánica similares para el material de las columnas y el de las probetas sometidas a “200” ciclos (457 kg/cm<sup>2</sup> como valor medio de los tres grupos), y a este valor le deducimos la carga estructural calculada para las columnas, nos queda una capacidad resistente de 450 kg/cm<sup>2</sup>, margen de garantía en concordancia en cuanto a lo concluido en la estabilidad de la estructura en el estudio estructural-constructivo.

Aún asumiendo límites de comportamiento elástico para el mármol de Macael mucho menores a los hallados por nosotros (p.ej. los 280 kg/cm<sup>2</sup> propuestos por Zezza et al., 1992), y una mayor afección de los ciclos en la resistencia de las columnas (un 32-60% según Zezza et al., 1985 para gradientes entre -40 y 60°C), quedaría un margen de resistencia elástica de unos 150 kg/cm<sup>2</sup>, que es unas 25 veces mayor a la carga estimada sobre cada columna.

Esto pone de manifiesto que a partir de los aspectos estructurales directamente observables y el cálculo de cargas correspondientes sobre el material de las columnas, la contribución de dicha carga sobre las posibilidades o comportamiento del material marmóreo debemos concluir que no es relevante, salvo situaciones especiales o puntuales de excentricidad o desplome, cuya investigación más exhaustiva proponemos. Téngase en cuenta que a partir de una excentricidad o de desplome de 2,25 cm podría esperarse un inicio de fisuración. Mantenemos por ahora el carácter

puntual de contribución de estas posibles excentricidades puesto que a falta de mayores evidencias es difícil concluir que todas las situaciones de elevado deterioro coincidan con dichas anomalías estructurales, y la ausencia de las mismas en las situaciones de escaso deterioro. Por su parte la relación deterioro, orientación y asoleo son palpables y contrastables.

Finalmente, es importante la consideración del fenómeno de microfisuración descrito por nosotros. Estimamos que constituye el proceso previo a la descamación propiamente dicha, y que se observa con un preocupante grado de desarrollo en columnas que aún no presentan descamación (p.ej. 27, 33, 34, 35, 36, 37, 44, 50, 51, 56, 58 y 60).

Entre los múltiples trabajos sobre el comportamiento anisótropo de la calcita en mármoles ante tensiones por variaciones de temperatura (e.g. Bertagnini et al., 1984; Franzini et al., 1984; Zezza et al., 1985; Galán, 1991; Galán et al., 1992; Zezza et al., 1992; Winkler, 1996) investigaciones como las de Battaglia et al. (1993) y Siegesmund et al. (2000) aluden directamente a la formación de microfracturas o microfisuras (microcracks) como consecuencia de la expansión o deformación residual que, incluso moderadas pero continuadas variaciones de temperatura provocan en los mármoles; fenómeno en cuyo inicio juega un papel crítico el tamaño de grano, de manera que, y como es nuestro caso, para tamaños de grano elevados, la microfisuración térmicamente inducida puede tener lugar a temperaturas o gradientes térmicos moderados.

**REFERENCIAS  
BIBLIOGRAFICAS**

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaimo, R.; Deganello, S. & Montana, G. (1986-1987). I marmi del Chiostro del Duomo di Monreale e della Cattedrale di Palermo. Aspetti genetici delle fasi presenti nelle superfici di alterazione. Nota I: Problematica geochimica e descrizione delle superfici di alterazione. *Miner. Petrogr. Acta*, Vol XXX. pp. 271-286.
- Aldrovandi, A.; Lalli, C.; Lanterna, G. & Matteini, M. (2000). Laser cleaning: a study on greyish alteration induced on non-patinated marbles. *Journal of Cultural Heritage*. Vol 1, supplement 1. pp. s55-s60.
- Al-Lahyani, K.; Shehata, W.M. & Sabtan, A. A. (1995). Effect of microfissures on the engineering properties of the marble at Wadi Lisb, Saudi Arabia. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 52. pp. 33-37.
- Alonso, F.J. & Suárez del Río, L.M. (1985). Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas. *Trabajos de Geología*. Universidad de Oviedo, 15. pp. 315-324.
- Alonso, F. J.; Esbert, R.M. & Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Materiales de construcción*, 2. pp. 226-237.
- Alonso, F. J.; Esbert, R.M. & Ordaz, J. (1987). Comportamiento hídrico de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero T.XCVIII-IV*. pp. 555-576.
- Alonso, F. J.; Ordaz, J.; Pérez, A. & Esbert, R. M. (1992). Laboratory study of a treated dolostone subjected to thermal cycles. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisbon. pp. 745-751.

- Álvarez de Buergo Ballester, M. & Fort González, R. (2001). Basic methodology for the assessment and selection of water-repellent treatments applied on carbonatic materials. *Progress in Organic Coatings* 43. pp. 258-266.
- Álvarez, F. & Martín Ramos, J. D. (1988). Análisis cinemático de milonitas mediante estudios de petrofábrica en la zona de cizalla de la unidad de Miñarros. II Congreso Geológico de España. Granada. Vol. 2. pp. 95-98.
- Ardebrant H. & Pugh, R.J. (1991). Wetting studies on silicate minerals and rocks used in bituminous highways. *Colloids and Surfaces*. Vol. 58. 1-2. pp. 111-130.
- Arnold, A. & Zehnder, K. (1989). Salt weathering on monuments. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Atti del 1° Simposio Internazionale. Bari. pp.31-58.
- Audoin, B. (2002). Non-destructive evaluation of composite materials with ultrasonic waves generated and detected by lasers. *Ultrasonics* 40. pp. 735-740.
- Azzoni, A.; Bailo, F.; Rondena, E. & Zaninetti, A. (1992). Mechanical, chemical and petrographical evaluation of stone degradation induced by different laboratory techniques. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisbon. pp. 827-836.
- Badan, B.; Cavaletti, R. & Marchesini, L. (1979). Intervento sulle sculture in marmo del fastigio centrale della basilica di S. Marco in Venecia. 3° Congresso Internazionale sul Deterioramento e la Conservazione della Pietra. Venecia. pp. 623-627.
- Barbosa García, M.V. & Ruiz Ruiz, M. (1992). La Alhambra. Cuaderno Didáctico. Ed. Gabinete Pedagógico de Bellas Artes. Granada.
- Battaglia, S.; Franzini, M. & Mango, F. (1993). High sensitivity apparatus for measuring linear thermal expansion: preliminary results on the response of marbles. *Il Nuovo Cimento* 16. pp. 453-461.
- Bello, M.A.; Martín, L. & Martín, A. (1992). Decay and treatment of macael white marble. *Studies and Conservation*, 37. pp.193-200.
- Benavides y Fernández Navarrete, A. (1971). Album de la Alhambra. La Alhambra vista por un político del S.XIX. Cuadernos de la Alhambra 7. pp. 85-109.
- Bermúdez López, J. (1987). La Alhambra y el Generalife. pp. 96.
- Bermudez Pareja, J & Moreno Olmedo M<sup>a</sup> A.(1966). Documentos de una catástrofe en la Alhambra. Cuadernos de la Alhambra 2. pp. 77-87.
- Bermudez Pareja, J. (1967). La fuente de los leones. Cuadernos de la Alhambra 3. pp. 21-29.
- Bermúdez Pareja, J. (1968). Una peculiaridad de la Arquitectura Nazarí. Crónica de la Alhambra. Cuadernos de la Alhambra 4. pp.160-164.
- Bermúdez Pareja, J. & Maldonado Rodríguez, M. (1970). Informe sobre técnicas, restauraciones y daños sufridos por los techos pintados de la Sala de los Reyes en el Palacio de los Leones de la Alhambra. Cuadernos de la Alhambra 7. pp. 5-20.
- Bertagnini, A.; Franzini, M.; Gratziu, C. & Spampinato, M.; (1984). Il marmo cotto in natura e nei monumenti. *Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 39 (1). pp. 39-46.
- Bestmann, M.; Kunze, Karsten & Matthews, Alan. (2000). Evolution of a calcite marble shear zone complex on Thassos Island Greece: microstructural and textural fabrics and their kinematic significance. *Journal of Structural Geology*, 22. pp. 1789-1807.
- Biscontin, G. & Riva, G. (1981). Study about water vapour permeability in stone materials after protective treatments. The Conservation of Stone II. Prep. of the Cont. to the Int. Symp. Bologna. pp. 689-697.



- Blau, P. J.; Olivert, W. C. & Snead, L. (1997). The scanning micro-sclerometer: a new method for scratch hardness mapping. *Tribology International* Vol. 30, nº 7. pp. 483-490.
- Boucher, E. A. (1976). Porous materials: structure properties and capillary phenomena. *Journal of Materials Science*, 11. pp. 1734-1750.
- Boyarskaya, Y. S.; Grabko, D. Z.; Medinskaya, M. I.; Palistrant, N. A. & Zhitaru, R. P. (1995). Mechanical properties of pure and doped indium phosphide single crystals. *Semiconductor Conference CAS'95 International*. pp 387-390.
- Briscoe, B. J.; Delfino, A. & Pelillo, E. (1999). Single-pass pendulum scratching of poly(styrene) and poly(methylmethacrylate). *WEAR*, 225-229. pp. 319-328.
- Brown, I.D. & Shannon, R.D. (1973). Empirical bond length-bond strength curves for oxides. *Acta Crystallogr. A29*. pp. 266-282.
- Bulut, F.; Boynukalin, S.; Tarhan, F. & Dilek, R. (1996). A new approach to the evaluation of water-pressure test results obtained in bedrock by the US Bureau of Reclamation Method. *Engineering Geology* 44. pp. 235-243.
- Burlini, L. & Kunze, K. (2000). Fabric and seismic properties of Carrara marble mylonite. *Physics and Chemistry of the Earth (Part A: Solid Earth and Geodesy)*, Vol. 25, Nº 2. pp. 133-139.
- Capedri, S.; Venturelli, G.; De Maria, S.; Mantovani Uguzzoni, M. P. & Pancotti, G. (2001). Characterisation and provenance of stones used in the mosaics of the domus dei Coiedii at Roman Suasa (Ancona, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 2. pp. 7-22.
- Capedri, S.; Venturelli, G.; Sandro, D.M.; Mantovani Uguzzoni, M.P. & Pancotti, G. (2001). Characterisation and provenance of stones used in the mosaics of the domus dei Coiedii at Roman Suasa (Ancona, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 2. pp. 7-22.
- Cardell Fernández, C. (1998). *Cristalización de sales en calcarenitas: aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada*. Tesis Doctoral. Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada. 219 p.
- Carretero Gómez, A. (1991). *El sector del mármol en la economía de Almería*. Cuadernos Monográficos 13. Ed. Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería. 71 pp.
- Carretero Gómez, A. (1995). *La industria del mármol en Almería*. Monografías Ciencias Económicas y Jurídicas 5. Ed. Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones e Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería. 383 pp.
- Cartwright, I. & Buick, I.S. (2000). Milimetre-scale variation in metamorphic permeability of marbles during transient fluid flow: an example from the Reynolds Range, central Australia. *Contrib Mineral Petrol* 140. pp. 163-179.
- Castillo Fernández, J. (1998). *Macael y Laroya en la Alta Edad Moderna (1489-1650): Conquista, Época Morisca y Repoblación*. Ed. Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería. 195 pp.
- Cazalla, O.; Sebastián, E.; Cultrone, G.; Nechar, M. & Bagur, M.G. (1999). Three-way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects. *Cement and Concrete Research*, 29. pp. 1749-1752.
- Cazalla-Vázquez, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Tesis Doctoral. Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada. 242 p.
- Cervera Vera, L. & Manzano Martos, R. (1995-1996). *Obras y problemas de conservación del Conjunto Monumental de la Alhambra y el Generalife de Granada y su entorno*. (Informe). Cuadernos de la Alhambra 31-32. pp. 317-321.

- Chabas, A.; Jeannette, D. & Lefèvre, R.A. (2000). Crystallization and dissolution of airborne sea-salts on weathered marble in a coastal environment at Delos (Cyclades-Greece). *Atmospheric Environment*, Vol. 34. pp. 219-224.
- Chen, C.S. & Hsu, S.C. (2001). Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 34 (4). pp. 293-321.
- Cooper, H.W. & Gene Simmons; (1977). The effect of cracks on the thermal expansion of rocks. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 36. Issue 3. pp. 404-412.
- Corral Jam, J. (1987). Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación. Cuadernos de la Alhambra 23. pp. 139-145.
- Crónica de conservación y restauración. (1999). Cuadernos de la Alhambra 35. pp. 163-210.
- Cultrone, G.; Sebastián, E.; Cazalla, O.; de la Torre, M.J. & Rodríguez Navarro, C. (2000). Colorimetric analysis and decay behaviour of bricks. 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Sevilla. pp. 86-87.
- Cultrone, G. (2001). Estudio mineralógico-petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del Patrimonio Histórico. Tesis Doctoral. Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada. 292 p.
- Dalchiele, E.A.; Giorgi, P.; Marotti, R.E.; Martín, F.; Ramos-Barrado, J.R.; Ayouchi, R. & Leinen, D. (2001). Electrodeposition of ZnO thin films on n-Si (100). *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 70. pp. 245-254.
- Davini, P. (2000). Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany. *Fuel*, 79. pp. 1363-1369.
- De Castro, E. (1980). Determination de l'angle de contact eau-pierre. *Doc RILEM* 58 VTP 80/4.
- Díez Jorge, M<sup>a</sup>. E. (1998). El palacio islámico de la Alhambra: Propuestas para una lectura multicultural. Ed. Universidad de Granada. Colección Eirene. 220 p.
- De Castro, E. (1981). Quelques études sur l'efficacité et la durabilité de deux traitements appliqués à un calcaire. *Memória n° 563*. Ministério de Habitação, Obras Públicas e Transportes. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 9 p.
- Durán Suárez, J. A.; García Casco, A.; Sánchez Navas, A. & Rodríguez Gordillo, J. (1992). Estudio de alteración en travertinos (Iglesia del Salvador, Granada). Propuesta restauradora. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Salamanca. Tomo 3. pp. 80-84.
- Durán Suárez, J. & Rodríguez Gordillo, J. (1992). Estudio de consolidantes y protectivos mediante ultrasonidos. IX Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICOM). Sevilla. pp. 728-738.
- Durán-Suárez, J. A. (1995). Estudio de consolidantes y protectivos para restauración de material pétreo. Tesis Doctoral. Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada. 369 p.
- Durán Suárez, J.; García Casco, A. & Rodríguez Gordillo, J. (1996). Alteración pétreo en estación experimental ambiental. VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Granada. Vol. I. Ed. Chacón J. e Irigaray C. pp. 19-34.
- Durán Suárez, J.; García Casco, A. & Rodríguez Gordillo, J. (1998). Evaluación de compuestos protectores para material pétreo poroso. Aplicación a calcarenitas. *Boletín Sociedad Española de Mineralogía*, 21 pp. 61-75.
- Durán Suárez, J.; García Beltrán, A.; Sáez Pérez, M. P. & Rodríguez Gordillo, J. (2000). Evaluation of the chromatic effectiveness of color pigments in restoration materials (lime and portland cement). *Colors*. Vol 25, n° 4. pp. 286-291.

- Esbert, R.M.; Grossi, C.M.; Rojo, A.; Alonso, F.J.; Montoto, M.; Ordaz, J.; Pérez de Andrés, M.C.; Escudero, C.; Barrera, M.; Sebastián, E.; Rodríguez Navarro, C. & Elert, K. (2002). Application limits of Q-switched Nd:Yag laser irradiation for stone cleaning based on colour measurements. *Journal of Cultural Heritage* 4. pp. 50s-55s.
- Evans, I.S. (1970). Salt crystallization and rock weathering: A Review. *Revue de Geomorphologie Dynamique* 19. pp. 155-177.
- Franzini, M.; Gratziu, C. & Spampinato, M.; (1984). Degradazione del marmo per effetto di variazioni di temperatura. *Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 39 (1). pp. 47-58.
- Frediani, P.; Manganeli, C.; Matteoli, U.; Tiano, P. & Piacenti, F. (1980). Perfluoroethers as water repellents in stone conservation. *Journal of Fluorine Chemistry*. Vol. 16, Issue 6. pp. 607-608.
- Freestone, I.C. & Middleton, A.P. (1987). Mineralogical applications of the analytical SEM in archaeology. *Mineralogical Magazine*, 51-1. pp. 21-31.
- Galán Huertos, E. & Martín Pérez, A. (1989). Estudio sobre el estado de alteración de la piedra de las columnas y fuente del "Patio de los Leones" de la Alhambra de Granada y propuestas para su conservación. Informe para el Patronato de la Alhambra y Generalife.
- Galán Huertos, E. & Zezza, F. (1990). Diagnóstico del estado de conservación del "Patio de los Leones" de la Alhambra de Granada mediante técnicas no destructivas. Informe para el Patronato de la Alhambra y Generalife.
- Galán Huertos, E. (1991). Influence of temperature changes on stone decay. In *Weathering and air pollution. Acts. First Course: C.M.U. Univ. School Monument Conservation. Lago di Garda*. pp. 119-129.
- Galán, E.; Guerrero, M.A.; Vázquez, M.A. & Zezza, F. (1992). Progressive deterioration of marble columns by thermal changes in relation to their state of superficial decay. 7th. International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa. Volume 1. pp. 905-913.
- Galán, E.; Carretero, M.I. & Mayoral, E. (1999). A methodology for locating the original quarries used for constructing historical buildings: application to Malaga Cathedral, Spain. *Engineering Geology*, 54. pp. 287-298.
- Gallego y Burín, A. (1963). *La Alhambra*. Ed. Comares, Granada. 317 p.
- Gallego y Burín, A. (1967). *La Alhambra y el arte granadino*. Cuadernos de la Alhambra 3. pp. 3-14.
- García Cuevas, C. (2000). Análisis de la deformación en la Cordillera Ibérica a partir del estudio del maclado de la calcita. Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica. Universidad de Complutense de Madrid. 250 p.
- García-Guinea, J.; Sapalski, C.; Cardenas, V. & Lombardero, M. (2000). Mineral inlays in natural stone slabs: techniques, materials and preservation. *Construction and Building Materials*, 14. pp. 365-373.
- García-Vallès, M.; Vendrell-Saz, M.; Wolfgang, E. & Urzi, C. (1997). Coloured mineral coatings on monument surfaces as a result of biomineralization: the case of the Tarragona cathedral (Catalonia). *Applied Geochemistry*, Vol. 12. pp. 255-266.
- García-Vallès, M.; Urzi, C.; De Leo, F.; Salamone, P. & Vendrell-Saz, M. (2000). Biological weathering and mineral deposits of the Belevi marble quarry (Ephesus, Turkey). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46. pp. 221-227.
- Gómez Moreno, M. (1970). *La Alhambra I*. Cuadernos de la Alhambra 6. pp. 150-154.
- Gómez Moreno, M. (1970). *La Alhambra II*. Cuadernos de la Alhambra 6. pp. 165-169.

- Goudie, A.S. (1986). Laboratory simulation of the wick effect in salt weathering of rock. Earth surface processes and landforms. Vol. II. pp. 275-285.
- Grabar, O. (1980). La Alhambra: Iconografía, formas y valores. Ed. Alianza Editorial. Madrid. 229 p.
- Groshong, R.H.; Teufel, L.W. & Gasteiger C. (1984). Precision and accuracy of the calcite strain-gage technique. Geological Society of America Bulletin, v.95. pp. 357-363.
- Grossi, C.M.; Esbert, R.M.; Díaz-Pache, F. & Alonso, F.J. (2003). Soiling of building stones in urban environments. Building and Environment 38. pp. 147-159.
- Holgado Terriza, J.A. (2002). Medida de magnitudes dinámicas por análisis de interfases curvas. Tesis Doctoral. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada. 514 p.
- IGME 1975. Mapa Geológico 1:50.000, MAGNA, Hoja nº 1013 (Macael).
- Jacobs, P.; Sevens, E. & Kunnen M. (1995). Principles of computerised X-ray tomography and applications to building materials. The Science of The Total Environment. Vol. 167, Issue 1-3. pp. 161-170.
- Katz, A.J. & Thompson, A.H. (1986). Quantitative prediction of permeability in porous rock. Physical Review B Vol. 34. pp. 8179-8181.
- Keller, S. D. & Luner, P. (2000). Surface energetics of calcium carbonates using inverse gas chromatography. Colloids and surfaces. (Part A: Physicochemical and Engineering Aspects), 161. pp. 401-415.
- Klein, S.; Fekrsanati, F.; Hildenhagen, J.; Dickmann, K.; Uphoff, H.; Marcáis, Y. & Zafiroopoulos, V. (2001). Discoloration of marble during laser cleaning by Nd: YAG laser wavelengths. Applied Surface Science, 171. pp. 242-251.
- Klobes, P.; Riesemeier, H.; Meyer, K.; Goebbels, J. & Hellmuth, K.-H. (1997). Rock porosity determination by combination of X-ray computerized tomography with mercury porosimetry. Fresenius J Anal Chem 357. pp. 543-547.
- Klug, H.P. & Alexander, L.E. (1954). X-Ray Difraccion Procedures. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 716 pp.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist Vol. 68. pp. 277-279.
- Kröning, M.; Häußler, F. & Arnold, W. (1997). Surface analysis by nondestructive testing techniques. Fresenius J. Anal Chem. 358 pp. 3-9.
- Krtolica, B. & Crnkovic, B. (1979). Ultrasonic testing of stonequality. 3rd. Int. Cong. on Deterioration and Preservation of Stones. Venezia. pp. 219-225.
- Lahooti, S.; Del Río, O.I.; Neumann, A.W. & Cheng, P. (1996). Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA). pp. 441-507. In Applied surface thermodynamics. Ed. A.W. Neumann & J.K. Spelt. Ontario, Canadá.
- Lanterni, G. & Matteini, M. (2000). Laser cleaning of stone artefacts: a substitute or alternative method. Journal of Cultural Heritage, 1. pp. 29-35.
- Lazzarini, L. & Fascina, V. (1979). Studio científico sullo stato di conservazione delle pietre e dei marmi della Porta della Carta di Venecia. 3° Congresso Internazionale sul Deterioramento e la Conservazione della Pietra. Venecia. pp. 645-660.
- López Mesones, F. (2000). Mármoles de Macael. Diseño y colocación. Ed. Fundación MACAEL. 103 p.
- Lundgren, E. (1969). Album de la Alhambra. Anotaciones de un pintor. Cuadernos de la Alhambra 5. pp. 95-124.
- Luplau Janssen, C. (1968). Dos artistas daneses en la Alhambra: Kormerup y Meldahl. Cuadernos de la Alhambra 4. pp. 39-49.

- Lüttge, A.; Winkler, U. & Lasaga, A. C. (2002). Interferometric study of the dolomite dissolution: a new conceptual model for mineral dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 67, nº 6. pp. 1099-1116.
- Luxenburger, S. & Arnold, W. (2002). Laser ultrasonic absorption measurement in fatigue-damaged materials. *Ultrasonics* 40. pp. 797-801.
- Lyashko, V. A.; Potemkin, M. M. & Klimenko, S.A. (1998). Comparative durability of materials in wear. *WEAR*, 216. pp. 239-243.
- Mapa Topográfico a escala 1:25.000 del Servicio Cartográfico del Ejército, Hoja nº23-41 (Macael).
- Marakis, G.; Pouli, P.; Zafirooulos, V. & Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2002). Comparative study on the application of the 1st and 3rd harmonic of a Q-switched Nd:YAG laser system to clean black encrustation on marble. *Journal of Cultural Heritage* 4. pp.83s-91s.
- Maravelaki, P.V.; Zafirooulos, V.; Kalaitzaki, M. & Fotakis, C. (1997). Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble. *Spectrochimica Acta Part B* 52. pp. 41-53.
- Maravelaki, P.; Kalaitzaki, M.; Anglos, D.; Kilikoglou, V. & Zafirooulos, V. (2001). Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B* 56. pp. 887-903.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Anglos, D.; Kilikoglou, V. & Zafirooulos, V. (2001). Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B* 56. pp. 887-903.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Zafirooulos, V.; Pouli, P.; Anglos, D.; Balas, C.; Salimbeni, R.; Siano, S. & Pini, R. (2002). Short free running Nd: YAG laser to clean different encrustations on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects. *Journal of Cultural Heritage* 4. pp.77s-82s.
- Marinetti Sánchez, P. (1985). La policromía de los Capiteles del Palacio de los Leones. *Cuadernos de la Alhambra* 21. pp. 79-89.
- Martín Calleja, J.; Feliu Ortega, M.J. & Dümler, I. (1992). Study of roman ceramics from Puerto Real (Cádiz) by scanning electron microscopy. *Electron microscopy. Eurem 92*, Granada. Spain. Vol. 2. pp. 789-790.
- Martín Céspedes, M. A. (2000). Intervención en la Sala de los Mocárabes. El mantenimiento de la Alhambra. *Cuadernos de la Alhambra* 36. pp. 191-200
- Martín Ramos, J.D. (1990). Programa de control y análisis del difractorómetro de rayos X. Dep. Legal M-11719.
- Meyer, K. & Klobes, P. (1999). Comparison between different presentations of pore size distribution in porous materials. *Fresenius J Anal Chem* 363. pp. 174-178.
- Molli, G.; Conti, P.; Giorgetti, G.; Meccheri, M. & Oesterling, N. (2000). Microfabric study on the deformational and thermal history of the Alpi Apuane marbles (Carrara marbles), Italy. *Journal of Structural Geology*, 22. pp. 1809-1825.
- Monteiro, P.J.M.; Ostertag, C.P.; Nelson, U. & Cohen, J.; (2001). Fatigue susceptibility of marble. *Materials & Design* Vol. 22, Issue 5. pp. 393-398.
- Montoto, M.; Suárez del Río, L.M.; Khair, A.W. & Hardy, H.R. (1981). Acoustic emission behaviour of sound to weak granites: Petrographic interpretation. *Proc. Int. Symp. Weak Rocks*. Tokio. pp. 285-290.
- Moropoulou, A.; Bisbikou, K.; Torfs, K.; Van Grieken, R.; Zezza, F. & Macri, F. (1998). Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. *Atmospheric Environment*, Vol. 32, Nº 6. pp. 967-982.
- Muñoz Cosme, A. (1991). Cuatro siglos de intervenciones en la Alhambra de Granada 1492-1907. *Cuadernos de la Alhambra* 27. pp. 151-189.

ESTUDIO DE ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES DEL PATIO DE LOS LEONES.  
INTERACCIONES EN SUS CAUSAS DE DETERIORO

---

- Navarrete Aguilera, C. (1992). Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación y restauración. Cuadernos de la Alhambra 28. pp. 383-385.
- Navarrete Aguilera, C. & Cardell Fernández, C. (1995). Restauración de yeserías (rombos calados) en el Patio de los Leones de la Alhambra. Comunicación interna.
- NBE AE-88 Norma Básica de la Edificación. Acciones en la Edificación (1988). Ed. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Newman, A. W. (1995). Micromeritics. Physical characterization of pharmaceutical solids. Ed. H. g. Brittain. Marcel Dekker, N.Y. pp. 253-280.
- Nieto García, F.; López Galindo, A. & Peinado Fenoll, E. (1989). Manual del usuario para los programas de utilización del difractor de rayos X. Universidad de Granada. Dep. Legal GR.132/1989.
- NORMAL 4/80 CNR-ICR (1980). Distribuzione del Volume dei Pori in Funzioni del Loro Diametro. Roma, 10 p.
- NORMAL 7/81 CNR-ICR (1981). Assorbimento D'Acqua per Immersione Totale. Capacità di Imbibizione. Roma. 5 p.
- NORMAL 21/85 CNR-ICR (1985). Permeabilità al Vapor D'Acqua. Roma. 5 p.
- NORMAL 22/86 CNR-ICR (1986). COMPROBAR NUMERACIÓN DE NORMA Misura della Velocità di propagazione del Suono. Roma, 7 p.
- NORMAL 29/88 CNR-ICR (1988). Misura Dell'Indice di Asciugamento (Drying Index). Roma. 9 p.
- NORMAL 33/89 CNR-ICR (1988). Misura Dell'Angolo di Contatto. Roma. 8 p.
- Noury, N.; Chamberod, E.; Benech, Ph.; Kalinin, A.V. & Bleuze, A. (1998). An instrumentation based on the piezopolymer P (VDF-TrFE) for the análisis of the elastic parameters of rocks under stress. Ultrasonics, 36. pp. 257-262.
- Nuere, E. (1986). Sobre el pavimento del Patio de los Leones. Cuadernos de la Alhambra 22. pp. 87-93.
- Nugari, M.P. & Pietrini, A.M. (1997). Trevi Fountain: An evaluation of inhibition effect of water-repellents on cyanobacteria and algae. International Biodeterioration & Biodegradation. Vol. 40, No. 2-4. pp. 247-253.
- Ocaña Jiménez, M. (1989). Torres Balbás y la arqueología medieval hispano-musulmana. Cuadernos de la Alhambra 25. pp. 57-64.
- Pape H.; Clauser, C. & Iffland, J. (2000). Variation of permeability with porosity in sandstone diagenesis interpreted with a fractal pore space model. Pure and Applied Geophysics 157. pp. 603-619.
- Pastor Medina, G. (1990). Macael morisco y cristiano. Ed. Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería. 125 pp.
- Peris Martínez, V.; Gimeno Adelantado, J.V.; Domenech Carbó, M.T. & Bosch Reig, F. (1992). The analytical examination by SEM/EDX of the vault frescoes in the church of the Santos Juanes, Valencia. Electron Microscopy. Eurem 92, Granada. Spain. Vol. 2. pp. 797-798.
- Peruzzi, R. & Bugini, R. (1984). Efficacia di alcuni protettivi per il marmo di Candoglia. Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, 39 (1). Pp. 71-80.
- Pieri, M.; Burlini, L.; Kunze, K.; Stretton, I. & Olgaard, D.L. (2001 a). Rheological and microstructural evolution of Carrara marble with high shear strain: results from high temperature torsion experiments. Journal of Structural Geology 23. pp. 1393-1413.
- Pieri, M.; Kunze, K.; Burlini, L.; Stretton, I.; Olgaard, D.L.; Burg, J.-P. & Wenk H.-R. (2001 b). Texture development of calcite by deformation and dynamic recrystallization at 1000 K during torsion experiments of marble to large strains. Tectonophysics 330. pp. 119-140.

- Prieto Moreno, F. (1967). Obras recientes en la Alhambra y Generalife. Año 1966. Cuadernos de la Alhambra 3. pp.153-157.
- Prieto Moreno, F. (1970). Obras recientes en la Alhambra y Generalife. Año 1969. Cuadernos de la Alhambra 6. pp. 131-135.
- Prieto Moreno, F. (1971). Obras recientes en la Alhambra y Generalife. Año 1970. Cuadernos de la Alhambra 7. pp. 81-83.
- Prieto Moreno, F. (1977). Crónica de la Alhambra. Obras en la Alhambra y Generalife, resumen de los años 1974-75 y 1976. Cuadernos de la Alhambra 13. pp. 175-184.
- Prieto Moreno, F. (1978). Crónica de la Alhambra. Obras en la Alhambra y Generalife, resumen de los años 1977 y 1978. Cuadernos de la Alhambra 14. pp. 157-164.
- Prieto Moreno, J. (1983-1984). Crónica de la Alhambra. Obras en la Alhambra y Generalife. Cuadernos de la Alhambra 19-20. pp. 343-352.
- Prieto-Moreno Ramírez, J. (1979-1981). Crónica de la Alhambra. Obras en la Alhambra y Generalife. Cuadernos de la Alhambra 15-17. pp. 331-336.
- Prieto-Moreno Ramírez, J. (1982). Crónica de la Alhambra. Obras en la Alhambra y Generalife. Cuadernos de la Alhambra 18. pp. 312-314.
- Punuru, A.R.; Chowdhury, A.N.; Kulshreshtha, N.P. & Gauri, K.L. (1990). Control of porosity on durability of limestone at the great sphinx, Egypt. Environ. Geol. Water Sci. 15.3. pp. 225-232.
- Raj, J.K. & Tayib, R. Hj. (1994). Ultrasonic pulse velocities and elastic moduli of marble cores from the Kuala Lumpur limestone. Warta Geologi, 20 (6). pp. 377-386.
- Rallo Gruss, C.; (1998). Los zócalos nazaries, ¿accidente o necesidad?. Anales de Historia del Arte, nº 8. pp. 47-66.
- Ramos Torres, M<sup>a</sup> C. (1972). Album de la Alhambra. Preparativos en la Alhambra ante la venida de Felipe V. Cuadernos de la Alhambra 8. p. 91-98.
- Rapoport, L.; Parkansky, N.; Lapsker, I.; Rayhel, I.; Alterkop, B.; Boxman, R. L.; Goldsmith, S. & Burstain, L. (2001). Effect of transverse current injection on the tribological properties of WC cemented carbide. WEAR, 249. pp. 1-5.
- Ritter, H.L. & Drake, L.C. (1945). Pore-size distribution in porous materials, pressure porosimeter and determination of complete macropore-size distribution. Industrial and Engineering Chemistry. Analytical Edition, 17. pp. 782-786.
- Rivas, T.; Prieto, B. & Silva, B. (2000). Influence of rift and bedding plane on the physico-mechanical properties of granitic rocks. Implications for the deterioration of granitic monuments. Building and Environment 35. pp. 387-396.
- Rivas, T.; Prieto, B. & Silva, B. (2001). Permeability to water vapour in granitic rocks. Application to the study of deleterious effects of conservation treatments. Building and Environment 36. pp. 239-246.
- Rodrigo Marhuenda, L. & Calancha de Passos, J. (1990). Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación y restauración. Cuadernos de la Alhambra 26. pp. 349-408.
- Rodrigo Marhuenda, L. & Calancha de Passos, J. (1991). Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación y restauración. Cuadernos de la Alhambra 27. pp. 385-396.
- Rodrigo Marhuenda, L. & Calancha de Passos, J. (1992). Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación y restauración. Cuadernos de la Alhambra 28. pp. 369-381.
- Rodríguez Domingo, J.M. & Gómez Román, A. M<sup>a</sup>. (1991). En torno a las habitaciones de Carlos V en la Alhambra. Cuadernos de la Alhambra 27. pp. 191-203.

- Rodríguez Gordillo, J.; Durán Suárez, J. & García Casco, A. (2000). Determinación de la penetrabilidad de consolidantes y protectivos en rocas. Un nuevo método. *Materiales de construcción*, vol. 50, nº 260. pp. 15-26.
- Rodríguez Navarro, C. & Sebastián Pardo, E. (1992). Applications of scanning electronic microscopy in the porometric analysis of ornamental calcareous material. *Electron Microscopy*. Eurem 92, Granada. Spain. Vol. 2. pp. 799-800.
- Rodríguez Navarro, C. (1994). Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de las catedrales de Granada y Jaén. Tesis Doctoral. Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada. 412 p.
- Rodríguez Valverde, M.A.; Cabrerizo Vilchez, M.A.; Rosales López, P.; Páez Dueñas, A. & Hidalgo Alvarez, R. (2002). Contact angle measurements on two (wood and stone) non-ideal surfaces. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 206. pp.485-495.
- Rossi Manaresi, R. & Tuci, A. (1983). Ultrasonic test for the evaluation of the effectiveness of sandstone consolidation. *Atti. 1ª Conferenza Internazionale. Le prove non distruttive nella conservazione delle opere d'Arte Roma. III/11*. 15 p.
- Rowe, K. J. & Rutter, E. H. (1990). Palaeostress estimation using calcite twinning: experimental calibration and application to nature. *Journal of Structural Geology*. Vol. 12, Issue 1. pp. 1-17.
- Royer-Carfagni, G.F. (1999). On the thermal degradation of marble. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36. pp. 119-126.
- Sabatini, G.; Giacomello, M.; Pini, R.; Siano, S. & Salimbeni, R. (2000). Laser cleaning methodologies for stone facades and monuments: laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 1. pp. 9-19.
- Seco de Lucena, L. (1919). *La Alhambra. Novísimo Estudio de Historia y Arte*. Imp. y Lib. de M. Vázquez. 2ª Ed. Granada, Impr., "Artes Gráficas Granadinas", 1920. 448 p.
- Servicios Técnicos de la Alhambra. (1997-1998). *Crónica de la Alhambra. Crónica de conservación y restauración*. Cuadernos de la Alhambra 33-34. pp. 191-257.
- Siegesmund, S.; Ullemeyer, K.; Weiss, T. & Tschegg, E.K.; (2000). Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *Int. J. Earth Science*, 89. pp.170-182.
- Simon, S.; Boehm, H.P. & Snelthage, R. (1992). A surface-chemical approach to marble conservation. *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lisbon. pp. 851-859.
- Soria Ortega, A. (1989). Torres Balbás y el ambiente cultural granadino de los años 20. *Cuadernos de la Alhambra* 25. pp. 33-44
- Stanley V. (1989). Autenticidad de las esculturas antiguas de mármol. *Investigación y ciencia*, nº 155. pp. 74-81.
- Suárez del Río, L.M.; Ordaz, J.; Ruiz de Argandoña, V.G. & Calleja, L. (1984). Determinación del umbral de microfisuración en rocas sometidas a esfuerzos compresivos. *I. Cong. Español de Geología, Granada. III*. Pp. 497-508.
- Suárez, D. L. & Wood, J.D. (1996). Short and long term weathering rates of a feldspar fraction isolated from an arid zone soil. *Chemical Geology*. Vol. 132. Issues 1-4. pp. 143-150.
- Tabasso, M.L. & Mecchi, A.M. (1992). Envejecimiento natural y artificial para evaluar los tratamientos para impermeabilización del mármol. *Materiales de construcción*. Vol, 42. nº 226. pp. 5-26.
- Theocaris, P.S. (1999). Failure loci of some igneous and metamorphic rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 32 (4). pp. 267-290.



- Thompson, B.R. & Thompson, D.O. (1985). Ultrasonic in non-destructive evaluation. Proc. IEEE, 73. pp.1716-1755.
- Toniolo, L.; Poli, T.; Castelvetro, V.; Manariti, A.; Chiantore, O. & Lazzari, M. (2002). Tailoring new fluorinated acrylic copolymers as protective coatings for marble. Journal of Cultural Heritage 3. pp. 309-316.
- Torres Balbás, L. (1929) El Patio de los Leones. Arquitectura Año XI. 117. Madrid. pp. 3-11.
- Torres Balbás, L. (1953). La Alhambra y el Generalife de Granada. Los monumentos cardinales de España, VII. Ed. Plus Ultra. Madrid. 158 pp.
- Torres Balbás, L. (1965).Diario de obras en la Alhambra 1923. Cuadernos de la Alhambra 1. pp.75-92.
- Torres Balbás, L. (1966).Diario de obras en la Alhambra 1924. Cuadernos de la Alhambra 2. pp.89-111.
- Torres Balbás, L. (1967). Diario de obras en la Alhambra 1925-1926. Cuadernos de la Alhambra 3. pp. 125-152.
- Torres Balbás, L. (1968). Diario de obras en la Alhambra 1927-1929. Cuadernos de la Alhambra 4. pp. 99-128.
- Torres Balbás, L. (1969). Diario de obras en la Alhambra 1930-1936. Cuadernos de la Alhambra 5. pp.69-94.
- Torres Balbás, L. (1981). Obra dispersa I. Al-Andalus. Crónica de la España Musulmana. Ed. Instituto de España, Madrid. 382 pp.
- Turner, F.J. & Orozco, M. (1976). Crystal bending in metamorphic calcite, and its relations to associated twinning. Contributions to Mineralogy and Petrology, 53. pp. 83-97.
- UNE 22-187-85 (1985). Mármoles y calizas ornamentales. Ensayo de módulo elástico. 2 p.
- UNE 83-307-86 (1986). Ensayos de hormigón. Determinación del índice de rebote. 5 p.
- UNE 83-308-86 (1986). Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos. 12 p.
- Urzi, C.; Krumbein, W.E.; Lyalikova, N.; Petushkova, J.; Wollenzein, U. & Zagari, M. (1994). Microbiological investigations of marbles exposed to natural and anthropogenic influences in northern and southern climates. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Atti del 3° Simposio Internazionale. Venezia. pp. 297-304.
- Valdeón, L.; King, M.S. & De Freitas, M.H. (1992). Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stones. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisbon. pp. 697-704.
- Valle, A.; Driussi, G. & Biscontin, G. (1985). Changes in vapour water transmission of stone materials impregnated with silicon and acrylic resins. Vth. International Congress on Deterioration and Conservation Stone. Lausanne. Vol 2. pp. 899-908.
- Velasco Gómez, J.M. (1992). Estructura original de los elementos ligneos en el Patio de los Leones. Cuadernos de la Alhambra 28. pp 199-229.
- Vílchez Vílchez, C. (1988). La Alhambra de Leopoldo Torres Balbás. Obras de Restauración y Conservación. 1923-1936. Ed. Comares. 559 p.
- Vílchez Vílchez, C. (1990). Vivo la Alhambra. El Palacio de los Leones. Ed. Proyecto Sur de Ediciones S.A.L. Granada. 25 p.
- Wark, D.A. & Bruce-Watson, E. (1998). Grain-scale permeabilities of texturally equilibrated, monomineralic rocks. Earth and Planetary Science Letters 164. pp. 591-605.

- Winkler, E.M. (1996). Properties of marble as building veneer. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 33 (2). pp. 215-218.
- Wright, W.D. (1964). *The measurement of colour*. 3<sup>a</sup> ed. Hilger and Watts.
- Wyszecky, G. & Stiles, W.S. (1982). *Color Science. Concepts and Methods, quantitative data and formulae*. 2<sup>a</sup> ed. Wiley and Sons. New York. 628 p.
- Xie, H.; Wang, J. & Qan, P. (1996). Fractal characters of micropore evolution in marbles. *Physics Letters A* 218. pp. 275-280.
- Yuste Oliete, A.; Subias Pérez, I.; López Ciriano, A.; Orozco Fernández, M. & Fernández Nieto, C. (1998). Estudio estructural y mineralógico del filón Ana: distrito minero de Bielsa-Parzán (Alto Aragón). Datos preliminares. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 21. pp. 29-46.
- Zafropulos, V.; Balas, C.; Manousaki, A.; Marakis, Y.; Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Melesanaki, K.; Pouli, P.; Stratoudaki, T.; Klein, S.; Hildenhagen, J.; Dickmann, K.; Luk'yanchuk, B.S.; Mujat, C. & Dogariu, A. (2002). Yellowing effect and discoloration of pigments: experimental and theoretical studies. *Journal of Cultural Heritage* 4. 249s-256s.
- Zeza, U.; Previde Massara, E.; Massa, V. & Venchiarutti, D.; (1985). Effect of temperature on intergranular decohesion of the marbles. *Vth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lausanne. Vol. 1. pp. 131-140.
- Zeza, U.; Venial, F. & Moggi, G. (1988). Effetti della imbibizione sul decadimento meccanico della pietra leccese. *La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Atti del 1<sup>o</sup> Simposio Internazionale. Bari. pp. 263-269.
- Zeza, U. (1990). Physical-mechanical properties of quarry and building stones. *Advanced Workshop. "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stone"*. Pavia (Italy). 21 p.
- Zeza, U.; Massa, V. & Bortolaso, G. (1992). Non destructive on site spectrometric color testing building stones 3rd Int. Conf. *Non-Destructive Testing, Microanalytical and Environmental Evaluation for Study and Conservation of Work of Art*, Viterbo. pp. 539-553.
- Zeza, U. & Sebastián-Pardo, E. (1992). El mármol macael (Almería) en los monumentos históricos de Granada (España). *I Congreso Internacional Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Islas Canarias. Tomo I. pp. 153-160.
- Zhang, S.; Paterson, M.S. & Cox, S.F. (2001). Microcrack growth and healing in deformed calcite aggregates. *Tectonophysics* 335. pp. 17-36.
- Zhang, Z.X.; Yu, J.; Kou, S.Q. & Lindqvist, P.-A. (2001). Effects of high temperatures on dynamic rock fracture. *Rock Mechanics and Mining Sciences* 38. pp. 211-225.