

TECNICAS NO-DESTRUCTIVAS EN LA CONSOLIDACIÓN ESTRUCTURAL. EL CASO DE LA BASÍLICA DE VALENCIA

Ignacio Bosch Reig, María José Ballester Bordes, Bernardo Perepérez Ventura y Emilio Barberá Ortega
 Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de València
 Análisis e Intervención en la Arquitectura Monumental e Histórica

AUTOR DE CONTACTO: Ignacio Bosch Reig, ibosch@pra.upv.es

RESUMEN: *En el presente artículo se describe el programa de ensayos para determinar las características físico-mecánicas de los materiales a emplear, su comportamiento en condiciones reales, y su proceso de puesta en obra, describiendo, igualmente el método seguido para la consolidación estructural de las cúpulas de la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia. Todo ello, con la utilización de técnicas no-destructivas, de examen y de actuación, como: fotografía específica; colorimetría; técnicas instrumentales de examen físico-químico (MO, AI, SEM/EDX; HPLC; GC/MS; UV-Vis; PH); detección de metales; emisión de rayos multifrecuencia; ultrasonido; termografía; endoscopia; e inspección y ejecución con vehículo móvil robotizado. Estos trabajos han sido realizados desde el Instituto de Restauración del Patrimonio de la UPV, de 1999 al 2003.*

PALABRAS CLAVE: ensayos previos, ensayos de puesta en obra, rigor en el proceso, técnicas no-destructivas, sensibilidad en la actuación, interdisciplinariedad

La Real Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia ha sido objeto, a lo largo de la última década, de un exhaustivo estudio histórico-cultural, gráfico-urbano, y constructivo-tecnológico-medioambiental, para proceder a su rehabilitación integral. El aspecto de mayor relevancia es el conjunto de las cúpulas, tambor y linterna que cubren su espacio elíptico-central, y sobre el que, en 1701, Antonio Palomino, realizó la gran composición pictórica al fresco, que se considera uno de los bienes patrimoniales más relevantes de Valencia. La podemos contemplar en la figura 1.

Cúpulas, Tambor y Linterna

La investigación ha puesto de manifiesto la existencia de dos cúpulas: la exterior realizada en 1662, es semielipsoidal de 15 m x 18,9 m de ejes y 12,7 m de altura, de lámina continua de 30 cm de espesor, con hueco elíptico de 30 cm en la clave, para el paso de la luz desde la linterna. Fue construida en ladrillo, reforzada por ocho nervios meridianos, que se picaron parcialmente en 1701. Dispone de tambor añadido (1,60 x 6,50m de altura), que actúa como zuncho, impidiendo la deformación y disminuyendo su esbeltez a la mitad. Se remata con esbelta linterna de 2,7 m de eje menor y 8,10 m de altura, con ocho huecos de entrada de luz que tuvieron vidrieras hasta 1701. El esquema constructivo de este conjunto se muestra en la imagen 2.

La interior, sobre la que están las pinturas, fue construida en 1701, es semielipsoidal con ejes de 14,6 m x 18,3 m y 11,5 m de altura. Es tabicada de dos roscas de ladrillo, de 8 cm. de espesor total, tomadas con yeso. Antes de nuestra actuación, se encontraba anclada a la exterior, en su mitad superior, a través de 126 anclajes metálicos de forja dispuestos en siete anillos concéntricos, tal como se ve en la figura 3. Y en su mitad inferior, desde su construcción, se encuentra apoyada sobre los ocho nervios de la cúpula exterior.

Daños existentes

La investigación ha puesto de manifiesto que el conjunto cúpula exterior y tambor, ha tenido un comportamiento altamente satisfactorio, no presentando daños significativos.

Sin embargo, la cúpula interior presenta dos importantes niveles de deterioros: fisuración de la superficie pictórica, con fisuras direccionales, radiales “en tela de araña”, y en mapa, con claros síntomas de punzonamiento, abolsamiento y desprendimiento parcial de la capa pictórica.

Y disgregación interna de las dos roscas de ladrillo, produciéndose su separación y rotura, constatándose la inexistencia sistemática del material de relleno de juntas de la segunda rosca. Todo ello se aprecia en las figuras 4 y 5.

Causas de la degradación

El análisis comparativo del sistema constructivo, de los daños existentes y del comportamiento estructural¹ ha puesto de manifiesto las siguientes causas:

- La diferente deformación por fluencia y comportamiento térmico de las cúpulas han propiciado la transmisión de cargas desde la exterior a la interior, a través de los anclajes, produciendo su punzonamiento, con abolsamientos y desprendimientos parciales de la capa pictórica.
- Las altas deformaciones de segundo orden (pandeo de lámina) y las derivadas de las tensiones de membrana, en las zonas inter-nervios, son causa de la disgregación y rotura de las dos roscas, que se presentan como posible síntoma de agotamiento de la fábrica.
- El análisis de las deformaciones debidas al sismo ha puesto de manifiesto el distinto periodo de vibración de ambas cúpulas, con riesgo de posible colapso por fatiga de la cúpula interior, al concentrarse las



Figura 1. Cúpula de la Real Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia. Composición pictórica al fresco, de A. Palomino

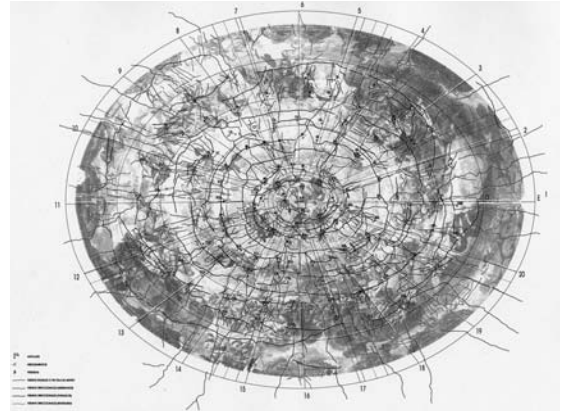


Figura 4. Cuadro fisurativo cúpula interior

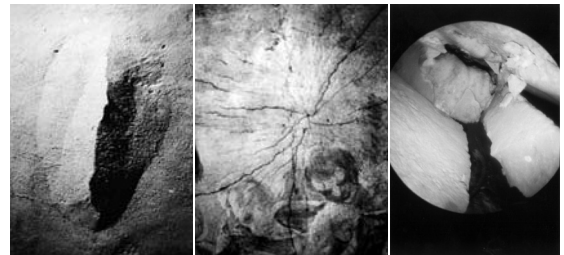


Figura 5. Abolsamiento, fisura radial y disgregación interna de la cúpula interior

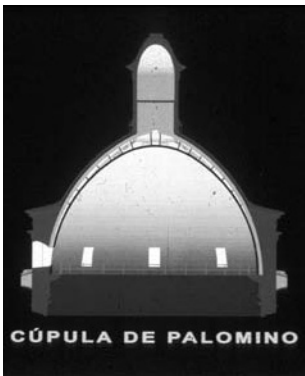


Figura 2. Esquema constructivo del conjunto cúpulas exterior e interior, tambor y linterna

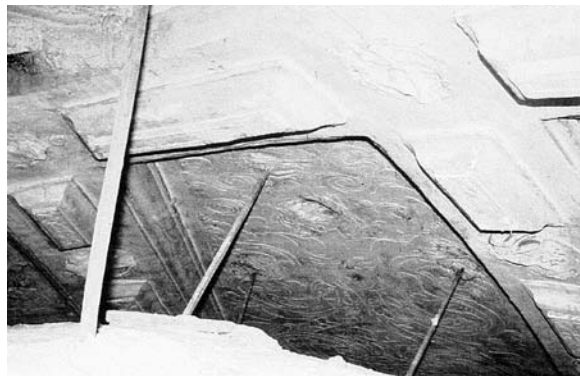


Figura 3. Relación cúpulas exterior - interior, mediante anclajes de forja



Figura 6. Análisis de las deformaciones frente a cargas sísmicas

acciones sísmicas en los puntos de choque con la cúpula exterior. En la figura 6 podemos apreciar un gráfico de dicho análisis.

Actuaciones proyectadas

Siendo que las condiciones de la cúpula interior eran precarias e inadmisibles, se planteó la necesidad de estabilizar la cúpula y evitar la progresión de las lesiones, mediante las siguientes acciones:

- Restituir la unidad constructiva de las dos roscas de la cúpula interior mediante: la disposición de mortero de yeso como material de juntas, así como el refuerzo del trasdós de la cúpula con una malla focal de paralelos y meridianos de bandas de 8 cm. de anchura de tejido de fibras aramídicas.

- Mantener la unión entre ambas cúpulas, asegurándose que no se transmitan compresiones desde la exterior a la interior, mediante la sustitución de los anclajes de forja de la mitad superior, por varillas de 3 mm de diámetro de fibras aramídicas.

- Acomodar los periodos de vibración de las cúpulas mediante su unión con nuevos anclajes en su mitad inferior, y la amortiguación mediante el relleno de la cámara inter-cúpulas con un material transpirable, reversible y de bajo peso específico, como lo es las esferas cerámicas.

- Disminuir las deformaciones por variación térmica, modificando la solución constructiva de la cubierta de la cúpula exterior, con el objeto de aumentar su capacidad aislante.

OBJETO

Desde el principio, se consideró que todas las actuaciones a proyectar solo tenían valor en cuanto que iban a servir para consolidar y mantener la composición pictórica de Palomino. Por lo que su diseño y ejecución se proyectó con un exquisito respeto hacia la obra de arte, estableciendo la no alteración de la pintura como condición imprescindible de actuación, en base a las siguientes cuestiones:

- Utilización del concepto de *mínima intervención*, para todas las actuaciones.



Figura 7. Modelo A



Figura 8. Modelo B

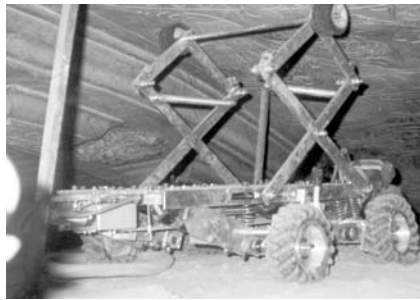


Figura 9. Robot móvil



Figura 10. Ensayo de disposición de material de juntas con el robot móvil

- Realización de ensayos previos de todas las actuaciones, con el objetivo de tener la certeza de que las soluciones no afectan a la estabilidad físico-cromática de las pinturas.

- Corresponsabilidad con el equipo de especialistas en restauración de pintura mural, para todas las actuaciones.

- Colocación de los nuevos anclajes, desde la cubierta y desde la cámara intercúpulas, de forma que no se "tocasen" las pinturas.

- Utilización de materiales, métodos y procesos, avalados por la experiencia en restauraciones modélicas, como La Capilla Sixtina, La Cúpula de Santa María dei Fiore de Florencia, o La Basílica de San Francisco de Asís.

METODOLOGÍA

La extrema complejidad de las actuaciones planteadas, y la trascendencia de la obra a realizar, determinaron la necesidad de, antes de la ejecución, obtener información directa sobre los posibles efectos sobre la superficie pictórica, para lo que se siguió un proceso metodológico de: ensayos preliminares; ensayos de puesta en obra; discusión de resultados con toma de decisiones; y ejecución de la obra.

Para ello, se estableció como estrictamente necesario la construcción de dos modelos a escala 1:1, de parte de las cúpulas, para sobre ellos, realizar todos los ensayos necesarios para obtener dicha información.

Modelo A

Este modelo, como se observa en la figura 7, reproduce fielmente los materiales, dimensiones, tipología, acabados y situación de deterioro de las cúpulas, en una zona de 3,00 m de anchura y 2,20 m de altura, llegando a reproducir los esgrafiados del intradós de la cúpula exterior, la suciedad de la cámara intercúpulas, la disgregación de la segunda rosca de ladrillo de la cúpula interior y la pintura mural al fresco de su intradós².

Modelo B

Este modelo, que vemos en la figura 8, reproduce la materialidad de la cúpula interior, en una zona de 2,00 x 2,40m, reproduciendo específicamente la pérdida del material de juntas. Igualmente reproduce la curvatura y distancia relativa de la traza de la cúpula exterior, a través

de una estructura en metacrilato transparente, para poder realizar observaciones directas.

Medios auxiliares

Dadas las condiciones específicas del entorno de trabajo, con una cámara intercúpulas inaccesible en su mayor parte, se diseñaron dos medios auxiliares de tecnología específica: un robot móvil, que se muestra en la figura 9; y la instalación de un sistema de visión en tiempo real en tres zonas simultáneas: exterior, cámara intercúpulas, y superficie pictórica.

Robot móvil

El vehículo móvil robotizado, desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería Mecánica de la UPV, es capaz de: moverse confinado en la cámara intercúpulas (de 10 a 90 cm de hueco), desplazándose en su superficie con pendiente variable de 0° a 90°, salvando los obstáculos de anclajes, ladrillos de refuerzo, irregularidades, nervios meridianos y casquetes; transmitir en tiempo real visión directa de la realidad existente; y desarrollar las actuaciones de apoyo a la consolidación estructural de:

- Limpieza mediante aspiración e impulsión de aire, abrasión y extracción mecánica con pinzas.
- Humectación, por pulverización controlada, de mezcla de agua desionizada y alcohol al 50%.
- Deposición lineal y puntual por inyección, de yeso, con boquilla orientable en los tres ejes, para el rejuntado de los ladrillos, cuyo ensayo podemos apreciar en la figura 10.
- Corte de anclajes originales de hierro forjado de 1,5 x 1,5 cm de sección, mediante elementos de sujeción al mismo y muela abrasiva de corte.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES Y DE PUESTA EN OBRA:

Para obtener la información se establecieron cinco temas de ensayos: posible afección a las pinturas; rejuntado del trasdós; refuerzo de fibras aramídicas; anclajes; y relleno de la cámara intercúpulas.

El objetivo era reconocer las características físico-mecánicas de los materiales, su comportamiento en condiciones reales, y sus dificultades de puesta en obra.

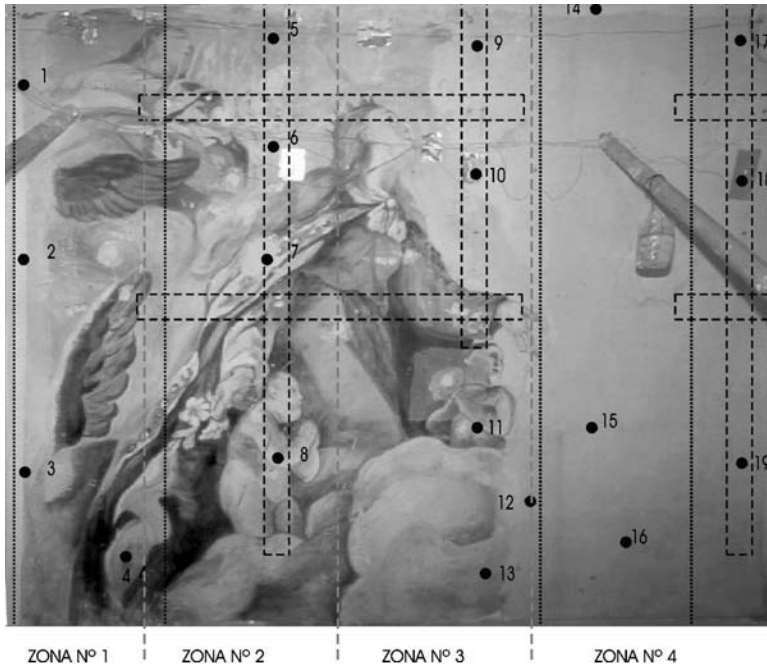


Figura 11. Señalización de los puntos de control del ensayo de afectación a las pinturas, dispuestos sobre el modelo A

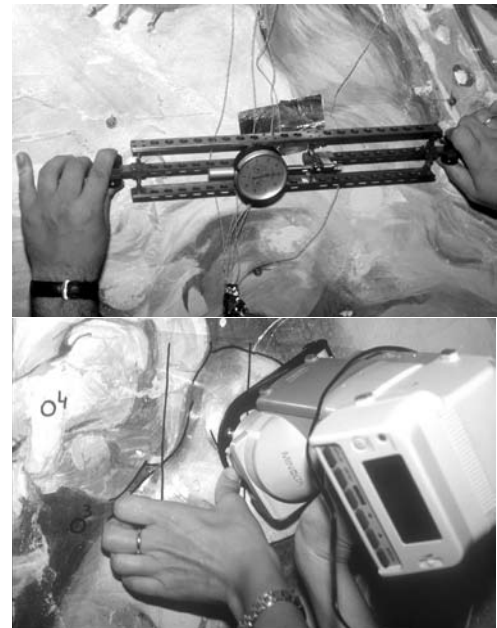


Figura 12. Control extensométrico y control colorimétrico

Ensayos de afección a las pinturas

Objeto: verificar la posible afección cromática o material, en las pinturas, de las actuaciones de refuerzo (tejido cuadriaxial de fibras aramílicas en bandas de 8 cm adherido con resina epoxi, resina acrílica o mortero de cal), y del relleno de la cámara intercúpulas con esferas de arcilla expandida, o espuma de poliuretano. La figura 11 nos permite apreciar la realización de estas verificaciones.

Condiciones: temperatura y humedad interior y exterior extremas, reproduciendo las condiciones más desfavorables.

Controles:

- Detección de humedades de condensación por posible falta de transpiración³.
- Control extensométrico de las posibles variaciones dimensionales⁴, tal como se aprecia en la figura 12.
- Variación de las coordenadas cromáticas: control mediante Espectrofotómetro de contacto Minolta CM-503, expuesto también en la figura 12.
- Existencia de variación morfológica interna, con formación de cristales de sales o eflorescencias, mediante ensayos físico-químicos.

Resultados:

No existe modificación apreciable del comportamiento dimensional, colorimétrico y físico-químico, de la superficie pictórica.

Se desechan los morteros de cal o de yeso, como adhesivos, al reconocerse su fisuración y separación de la cúpula. Se consideran adecuadas las resinas epoxi y acrílica, como adhesivo, eligiéndose la epoxi por seguridad.

Ensayos de puesta en obra del rejuntado

Objeto: concretar el proceso de puesta en obra del rejuntado con mortero de yeso con retardador de fraguado, aplicándolo con medios manuales y robotizados, como se observa en la figura 10.

Reconocer afecciones de la superficie pictórica, por incremento de la humedad, al realizar la puesta en obra y la humectación previa, con una disolución al 50% de alcohol y agua desionizada.

Resultados:

La aplicación del yeso sólo es adecuada con pistola neumática.

El vehículo robotizado actúa correctamente, realizando las operaciones de soplado, humectación y deposición del yeso.

El retardador de fraguado actúa correctamente permitiendo el empleo del yeso durante 20 minutos, con un fraguado correcto, y una buena adhesión al ladrillo cerámico.

No se observa variación del nivel de humedad en el intradós de la cúpula.

Ensayos sobre el tejido de fibras aramílicas

1. Adherencia del tejido-resina epoxi, sobre ladrillo revestido de yeso:

Objeto: determinar la idoneidad del procedimiento de adhesión de la fibra aramílica.

Materiales: tejido cuadriaxial y multidireccional (0°-90°-45°) de fibras aramílicas no interactivas, tipo TWARON HM, KQX de 230 gr/m². Pasta de yeso YG 25. Mezcla de resinas epoxídicas Adexilex PG1 Mapei EpoJet amasadas al 50%. Ladrillos macizos originales del siglo XVII.

Resultados: la adherencia de la resina al yeso es superior a la adherencia del yeso al soporte. El valor característico de la tensión de rotura de adherencia del yeso al material de base puede admitirse como igual o superior a 5 N/mm².

2. Puesta en obra del tejido de fibras aramílicas:

Objeto: reconocer el proceso idóneo de puesta en obra manual del tejido aramídico, cuyo ensayo podemos apreciar en la figura 13.

Materiales: tejido cuadriaxial de fibras aramílicas en tiras de 80 mm de anchura. Resinas epoxídicas Adexilex PG1, EpoJet, y EpoJet HV3 fabricadas por Mapei.

Desarrollo: se ensayaron las dos resinas y sus mezclas en proporción 1:1, 3:1.



Figura 13. Ensayo de puesta en obra del refuerzo de tejido de fibras aramídicas.

Resultados: todas tienen un buen comportamiento resistente, eligiéndose la dosificación 3:1, por su facilidad de aplicación con consistencia blanda.

3. Inflamabilidad del tejido de fibras aramídicas:

Objeto: reconocer la posible combustión del refuerzo de tejido aramídico adherido con resina epoxi.

Resultado: no se produce inflamación.

Ensayo sobre las varillas de fibras aramídicas

1. Ensayo de tracción de la varilla:

Objeto: determinar la resistencia a tracción de las varillas de fibras aramídicas tipo KEVLAR con 50% de resina epoxi, diámetro 3 mm, fabricadas por SACEN s.r.l.

Resultado: el valor medio de la carga de rotura es de 7.413 N, equivalente a una tensión de rotura de 824 N/mm². Ello supone un coeficiente de seguridad de al menos 3,78 a rotura, ya que la carga máxima a soportar por el anclaje es de 2000 N.

2. Ensayo de inestabilidad lateral:

Objeto: determinar la longitud frente a la que se produce la inestabilidad lateral de la varilla de 3 mm de diámetro, sometida a una carga axial de 100 N.

Resultado: se muestra que a partir de una longitud de 150 mm. las varillas, se deforman lateralmente, con la aplicación de una carga de compresión mínima de 100 N.

Ensayos de replanteo de anclajes

Objeto: determinar la idoneidad y precisión de las técnicas de replanteo de un punto desde el interior al exterior de las cúpulas, según una dirección predeterminada.

Técnicas aplicadas: radiografía gamma; y emisión-recepción multifrecuencia, con el posicionador DRILL GUIDE Bohrführungsgerät P801, que vemos en la figura 14.

Resultados:

La técnica de rayos Gamma, se establece como un método de alta precisión y eficacia para el fin perseguido, sin embargo, se descarta por la posible afección a personas, y al medioambiente, así como por la dificultad



Figura 14. Aparato Posicionador, emisor-receptor multifrecuencia.

dad que conlleva la convalidación del protocolo, por la Junta Nacional de Energía Nuclear.

Se demuestra que para el éxito de la aplicación de la técnica multifrecuencia, es imprescindible disponer el emisor y el receptor en planos totalmente paralelos, por lo que se diseñaron los soportes de ambos aparatos, para garantizar dicho paralelismo.

Ensayo de tracción del conjunto varilla-pieza de cabeza

Objeto: determinar la resistencia a tracción del conjunto varilla-pieza de cabeza.

Materiales: varillas de fibra aramídicas de 3mm de diámetro, terminada con una pieza roscada de acero inoxidable AISI 304, con Ø int 8 mm y Ø ext 14 mm y 100 mm de longitud, como se aprecia en la figura 26.

Resultado: la resistencia a tracción del conjunto es de 7668 N., equivalente a una tensión de rotura de 852 N/mm², lo que supone un coeficiente de seguridad de 3.91

Ensayo de resistencia al arrancamiento del anclaje

Objeto: determinar la resistencia a tracción del anclaje de las varillas a la cúpula interior, realizado mediante resina epoxi.

Resultado: la resistencia a tracción reconocida del anclaje, ha sido de 800 kg (7844 N). El ensayo ha verificado la adecuación del diámetro (10 mm), longitud mínima (70 mm), y material (resina epoxi), del anclaje de las varillas a la cúpula interior.

Ensayos de puesta en obra de las perforaciones

1. Ensayo para realizar la perforación desde el interior:

Objeto: determinar las condiciones técnicas para realizar taladros de dentro a fuera, desde la superficie pictórica, con una trayectoria predefinida.

Resultado: el método de taladrar desde el interior al exterior de una sola vez, es viable técnicamente, y supone las operaciones previas de limpieza, consolidación, protección y extracción de la capa pictórica, en una pequeña zona de 3 cm de diámetro, como se puede apreciar en las figuras 15 y 16.

2. Ensayo para realizar la perforación desde el exterior:

Objeto: determinar las condiciones técnicas para realizar los taladros desde fuera a dentro, deteniendo la perforación a 15 mm de la capa pictórica, asegurando una penetración mínima de 70 ± 5 mm en la cúpula interior.

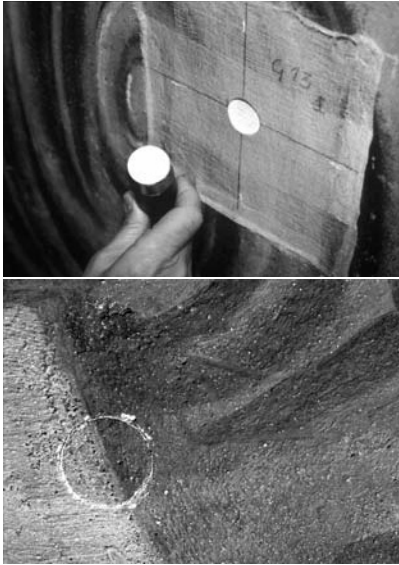


Figura 15. Extracción y reposición de capa pictórica



Figura 16. Ensayo de perforación desde el interior



Figura 17. Ensayo de corte de anclajes

Resultados: la perforación desde el exterior hacia el interior, sin afectar a la superficie pictórica es perfectamente viable. La técnica más adecuada es la de broca helicoidal, que no produce recalentamiento de la superficie pictórica.

3. Ensayo de colocación del anclaje:

Objeto: verificar el proceso de puesta en obra de la realización del anclaje, rellenando la perforación de resina y alojando la varilla sin peligro para la capa pictórica. Comprobar que es posible realizar un correcto tesado de los anclajes hasta alcanzar el 85 % de su carga de rotura.

Resultado: el proceso se realiza con éxito, y con rapidez, gracias al tarado previo de las llaves dinamométricas, que permiten saber con precisión la tensión que se está transmitiendo a la fibra en cada escalón de carga.

4. Ensayo de corte de los anclajes:

Objeto: verificar la puesta en obra del corte de los anclajes, mediante medios manuales y mecánicos robotizados, según se observa en la figura 17.

Resultados: Se ha podido comprobar la adecuación del método y sistema empleado, tanto manualmente como mediante el Robot.

Ensayos sobre el material de relleno

1. Determinación de la densidad de los materiales.

Objeto: determinar la densidad de las esferas de arcilla expandida (arilita), de 16 mm de diámetro, y de la espuma expandida de poliuretano tipo Sika Boom-N.

Resultados: la densidad de cálculo para la arcilla expandida es de 0,29 gr/cm³. Y para la espuma aislante es de 21,9 kg/m³.

2. Determinación del módulo de deformación dinámico de la arlita

Objeto: determinar la idoneidad del material granular para su uso como elemento de acople de deformaciones entre ambas cúpulas frente a deformaciones dinámicas.

Resultado: el orden de magnitud del módulo de deformación dinámico del material granular es de 25 a 30N/mm² para excitaciones de gran amplitud, cerca de la mitad del módulo de deformación estático. Para excitaciones de pequeña amplitud, el módulo de deformación dinámico

es de 2,5 a 3,0 veces superior al que presenta con excitaciones de gran amplitud.

3. Puesta en obra del material de relleno

Objeto: determinación del grado de segregación y nivel de compactación de la arlita de 16mm de diámetro al introducirla en la cámara intercúpulas según condiciones de obra.

Resultados: no se aprecia disgregación. El vertido simple no sólo no incrementa el índice de huecos sino que produce cierta compactación de la arcilla.

CONCLUSIONES DE EJECUCIÓN DE LA OBRA

Para una mejor comprensión de las actuaciones realizadas, la secuencia de exposición se va a corresponder con la secuencia real de ejecución de la obra.

1. Montaje de andamios y medios auxiliares y específicos

El montaje del andamio interior se realizó en cuatro fases: montaje de las tres vigas principales y de la malla espacial base, apoyada en los seis huecos del tambor; montaje de las redes de seguridad y lona protectora inferior; montaje del andamio superior; colocación de los medios de seguridad y de las instalaciones de ventilación forzada, eléctricas, agua destilada y protección fuego. Podemos apreciarlo en la figura 18.

El montaje del andamio exterior, que vemos en la imagen 19, se realizó en las siguientes fases: replanteo topográfico; actuación arqueológica con levantado del pavimento original en las zonas de los apoyos del andamio; colocación de los apoyos e impermeabilización de los mismos; montaje del andamio; montaje de la lona protectora; y montaje de los medios auxiliares específicos.

Los medios auxiliares específicos utilizados han sido: equipo de adquisición y registro de imágenes en tiempo real con tres cámaras con control remoto, grabador reproductor, distribuidor de cuadrantes, y dos puestos de mando; ventilación forzada de la cámara intercúpulas; sistema de aspiración mecánica; vehículo móvil robotizado y su puesto de mando; boroscópio OLIMPUS, sonda rígida de 90 cm, y 9 mm de diámetro; video-endoscópio PROBE XLPRO con sonda flexible de 2,00 metros y 6 mm de diámetro, frontal y lateral, que permite ver, gravar, y capturar las imágenes, señalándolas y reconociendo sus dimensiones relativas; cámara termográfica Varioscam 3021; sonda magnética Kolectric, de la casa Limeted Microcoverneter; posicionador. Podemos observar algunos de ellos en las figuras 20 y 21.

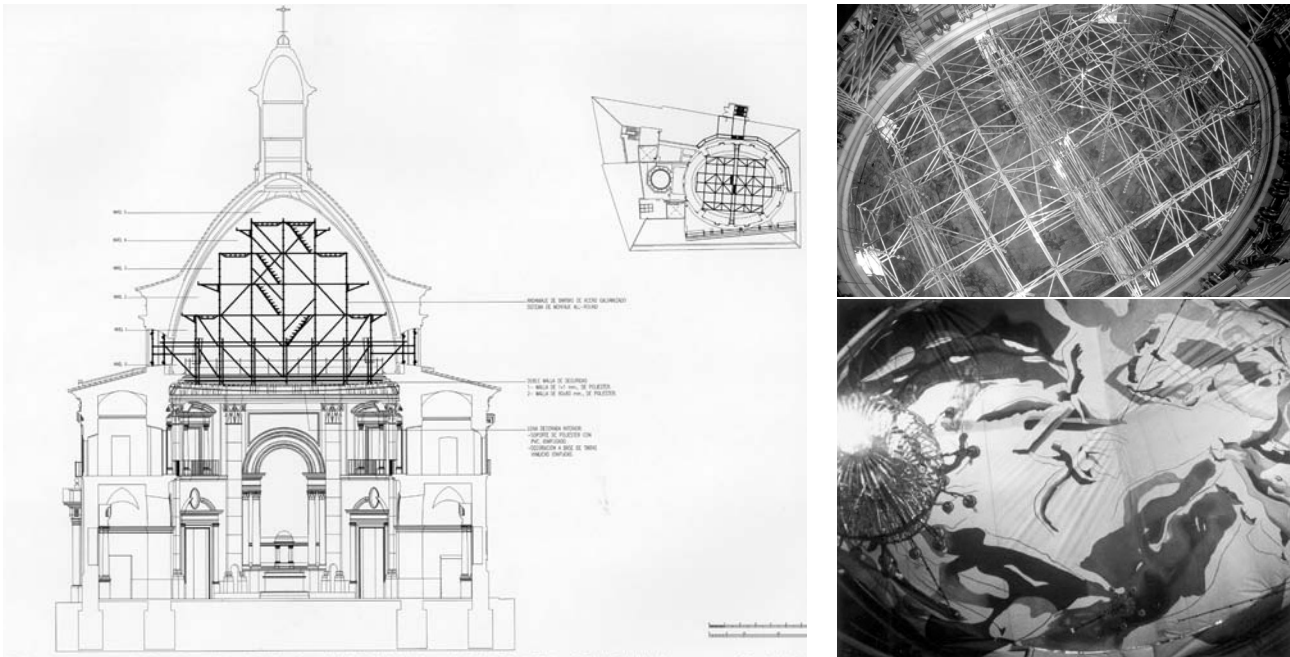


Figura 18. Montaje del andamio interior



Figura 19. Montaje andamio exterior



Figura 20. Cámara termográfica



Figura 21. Video-endoscopio

2. Limpieza cámara intercúpulas

Para la limpieza de la cámara intercúpulas, se procedió a la apertura de jambas de los ocho huecos del tambor y a la apertura de hueco norte, cegado desde 1701.

La limpieza se realizó por eliminación manual y con robot, de cascotes, y con aspiración mecánica.

3. Rejuntado del trasdós de la cúpula interior

El rejuntado del extradós de la cúpula interior, se realizó con pasta de yeso para proyectar con aditivo retardador de fraguado homologado LNEC-PROC° 083/01/12046, previa humectación con agua bidestilada y alcohol al 50%.

Su ejecución se realizó manualmente en el casquete superior hasta una altura de 9,40 m; con ayuda del robot en la zona intermedia, hasta una altura de 7,80m, como vemos en la imagen 22; y hasta la altura de 4,00m, mediante el vertido por gravedad.

Durante la ejecución, se realizaron controles de la posible transmisión de humedad a la superficie pictórica, mediante la Cámara termográfica portátil Varioscán 3021, que trabaja en la longitud de onda de 8 a 12 m, con un rango de medición de temperaturas de -40°C a $+1200^{\circ}\text{C}$, y con una resolución térmica de 0.03°K ; y el Termohigrómetro AQUA-BOYD DBM-1.

4. Refuerzo con tejido de fibras aramílicas

La disposición de las bandas de 8cm de ancho, de tejido de fibras aramílicas, como refuerzo del trasdós de la cúpula interior, se justifica para absorber esfuerzos producidos por tracciones imprevistas importantes, como las derivadas del sismo vertical.

El refuerzo, que podemos observar en la fotografía 23, se desarrolló con el siguiente proceso:

- Replanteo-señalamiento de la malla focal de meridianos y paralelos, haciéndola coincidir en sus puntos de intersección con las perforaciones para los nuevos anclajes.
- Protección de los huecos de los taladros ya realizados, con tapón de madera de 10 mm de diámetro.



Figura 22. Rejuntado en obra con el robot



Figura 23. Refuerzo con tejido de fibras aramidicas



Figura 24. Replanteo de anclajes con la técnica multifrecuencia

- Señalamiento y protección de la banda mediante cinta adhesiva de papel.
- Limpieza de la superficie del trasdós en el ancho de la banda.
- Disposición del refuerzo mediante la deposición secuenciada de: resina + tejido + resina. La resina se extendió con rodillo, y el tejido se desenrolló de una bobina.

El control se realizó mediante el sistema de visión en tiempo real, con la asistencia del robot.

5. Replanteo de anclajes

El replanteo de los 136 nuevos anclajes en la superficie del trasdós de la cúpula exterior, se realizó mediante la siguiente secuencia:

- Replanteo sobre la superficie pictórica de los 122 anclajes originales, mediante sonda magnética.
- Replanteo sobre la superficie pictórica de los 136 nuevos anclajes, disponiéndolos sin interferir con los anclajes originales, y en zonas sin figuraciones pictóricas.
- Protección de la superficie pictórica alrededor de los puntos de anclaje nuevos, mediante gasas de algodón adherida con carboximetilcelulosa.
- Realización de seis perforaciones desde el interior al exterior, situadas en los ejes de la cúpula, en zonas de faltantes pictóricos, para servir de Guía al replanteo topográfico de los 136 anclajes en el exterior de la cúpula.
- Replanteo topográfico de los 136 anclajes en el extradós de la cúpula exterior, mediante Estación Total Láser.
- Ajuste fino del replanteo de los 136 anclajes mediante la técnica de ondas multifrecuencia, según puede apreciarse en la figura 24.

6. Realización de los taladros

Para mantener la condición de proyecto de no afección a la superficie pictórica, el proceso de taladro se realizó desde el exterior al interior, debiéndose quedar la perforación a una distancia de 1,5 cm de la superficie pictórica.

La realización de la perforación desde el exterior al interior, de cada uno de los 136 anclajes nuevos, se ejecutó según las siguientes fases:

- Emplazamiento de la máquina taladradora (por rotación), en la dirección adecuada según el replanteo preciso.
- Perforación de la cúpula exterior.
- Verificación con video-endoscopio, de la adecuación de la superficie del extradós de la cúpula interior.
- Realización de la perforación de la cúpula interior hasta 1,5 cm de su intradós, con cuatro escalones de perforación de 1-0,5-0,02-0,01cm. Durante esta operación, se controló la distancia de la broca a la superficie pictórica mediante sonda magnética. Y el buen funcionamiento del sistema, mediante el sistema de visión en tiempo real, o con el robot.
- Extracción por succión del polvo depositado en el interior de la perforación.

- Verificación de la profundidad y adecuación de la perforación, mediante el video-endoscopio, como vemos en la figura 25.

7. Colocación de los nuevos anclajes

La disposición de los 136 nuevos anclajes en la mitad superior de la cúpula, se ha ejecutado en base a las siguientes actuaciones:

- Extracción del tapón protector de la perforación.
- Limpieza por aspiración de los restos que existían en el interior de la perforación.
- Deposición direccionada y por gravedad de la resina en la perforación, verificando su llenado mediante el sistema de visión con la ayuda del robot.
- Señalamiento en la varilla de la distancia de anclaje mínima necesaria de 7 cm.
- Introducción de la varilla en la perforación verificando su profundidad de anclaje mediante el reconocimiento visual con el video-endoscopio, como se muestra en las figuras 26 y 27.

En el nivel mas bajo, al no poder verificar las actuaciones mediante el sistema de visión, ni con la ayuda del robot, se realizó una perforación de apoyo en la parte superior del anclaje, para realizar el control mediante el video-endoscopio.

8. Colocación de placas de anclaje

Una vez fraguada la resina de los anclajes, se procedió a la disposición de la placa-pieza de cabeza de acero inoxidable, adhiriéndola al trasdós de la cúpula exterior mediante resina epoxi.

9. Proceso de tesado

Se parte de la consideración, avalada por el cálculo y por la realidad de las deformaciones, de que es necesario mantener la función de los anclajes originales en el sentido de transferir parte del peso propio de la cúpula interior a la exterior, pero eliminando la posibilidad de transmitir cargas de la exterior a la interior. Por ello los nuevos anclajes que sustituyen a los originales cumplían las siguientes condiciones:

- No necesitar elevadas deformaciones para entrar en carga, pues podrían generar daños a la superficie pictórica.
- Permitir ligeros movimientos entre ambas cúpulas (inevitables por las condiciones higrotérmicas), sin afectar decisivamente a los esfuerzos transmitidos. Por ello el módulo de elasticidad de los nuevos anclajes (600.000 kg/cm²), es muy inferior al del hierro (1.700.000 kg/cm²)
- No transmitir compresiones.
- Que se pueda controlar su eficacia en el tiempo, por lo que el sistema de tesado se diseñó del tipo roscado.

El tesado, que se observa en la figura 28, se realizó para evitar que la entrada en carga de los nuevos anclajes, se produjera bruscamente al realizar el corte de los anclajes originales, y la cúpula pudiera sufrir fisuraciones indeseadas.

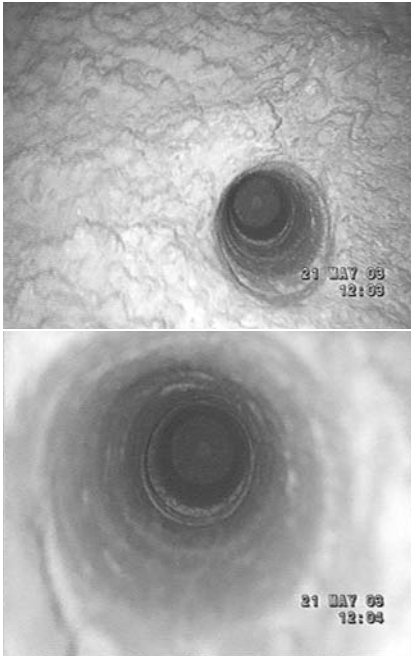


Figura 25. Verificación de la perforación con video-endoscopia

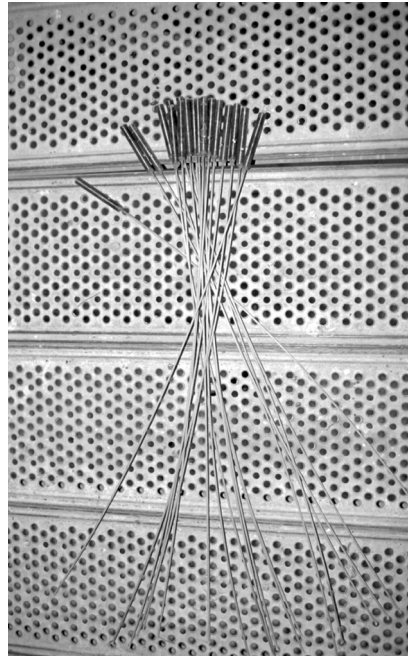


Figura 26. Varilla de fibra arámidica de Ø 3 mm., con cabeza roscada de acero inoxidable



Figura 27. Colocación anclaje de varillas de fibra arámidica.



Figura 28. Proceso de tesado de los nuevos anclajes

El cálculo de la tensión a la que se tesaron cada uno de los anclajes, la realizó INTEMAC, en base a estudios paramétricos de sensibilidad entre ambas cúpulas, asignando una tensión que varió en el intervalo de 4 a 15 KNw.

La puesta en carga siguió la siguiente secuencia:

- Realización de cuatro escalones, distanciando los dos segundos de los dos primeros, una semana.
- Verificación y control del tesado en tres momentos consecutivos distanciados 15 días, antes del corte de los anclajes originales.
- Programa de tesado mensual durante 3 meses de TODOS los anclajes después del Corte.
- Programa de Tesado de los 20 anclajes a controlar permanentemente: 1mes - 1mes - 2 meses - 6 meses - 6 meses -

La realización del tesado y posteriores controles, se realizó con llave dinamométrica previamente tarada en laboratorio de la UPV.

10. Corte de los anclajes

El cálculo permitía partir de la hipótesis de que las barras originales de forja disponían de una tensión prácticamente nula, una vez que se habían tesado los nuevos anclajes, y estos habían entrado en carga.

No obstante lo anterior, y dada la importancia de las operaciones a realizar, antes de proceder al corte de los anclajes, y como medidas de seguridad, se situó el apeo del tercio superior de la cúpula, y se dispuso un sistema de control de los movimientos relativos entre las dos cúpulas.

Apeo

El apeo se realizó a partir del nivel + 7,50 m, en los ejes principales y en una retícula aproximada de 3 x 2 m, vinculada a la estructura del andamio, con disposición de torres de apeo inferior para apeo en el centro del andamio general.

Se utilizó como material de apeo el cartón-yeso, conectado a la superficie pictórica mediante un elastómero del tipo "armaflex". Siendo su longitud de 120 m. Podemos apreciarlo en la figura 29.

Control

Se instaló un sistema de control y adquisición de datos, previamente tarado en el laboratorio de INTEMAC, que disponía de 32 transductores de anillos resistivos con un rango máximo de medida de 25 mm, y una apreciación de 0,001mm; y equipo de adquisición de datos con 32 canales de extensometría, con amplificación de la señal de entrada de 1 a 128.000 veces, y con una velocidad de muestreo comprendida entre 1 lectura cada 850 segundos, y 200.000 lecturas cada segundo, todo ello por canal. En la imagen 30 vemos uno de estos dispositivos.

Se controló la temperatura (26° -27 °) y la humedad relativa (56,8 - 61,4) de la cámara intercúpulas, así como la temperatura (21,5° - 31,1°) y la humedad relativa (38,6 - 79,22) del interior de la cúpula, durante el proceso de corte.

La monitorización se llevó a cabo durante las operaciones de tesado, retesado de los anclajes nuevos, y corte de los anclajes originales.

Corte de los anclajes y control del mismo

Dadas las dimensiones de la cámara intercúpulas y la asimetría de las distancias entre ambas cúpulas (menor distancia en la zona Este), se tomó la decisión de proceder al corte de los anclajes de los cuatro niveles superiores (54 anclajes), y cortar los que fueran accesibles del nivel tercero, siempre que no se rompiera la simetría de sustentación. En este nivel se cortaron tres anclajes, tal como podemos observar en la figura 31.

RESULTADOS

- Se cortaron 57 anclajes de los 126 existentes.
- Los desplazamientos detectados se situaron dentro de las tolerancias admisibles a priori (0,30 mm).
- Las recuperaciones fueron completas e instantáneas.
- Las barras originales estaban en general descargadas, tal y como se esperaba.
- De las doce barras cortadas con un desplazamiento significativo comprendido entre 0,02 y 0,25 mm, 7 barras estaban trabajando a compresión y 5 a tracción. Ello confirma lo acertado de la decisión de anular las tensiones de los anclajes originales.
- No se detectó la aparición de fisuras u otro tipo de daños durante el proceso.



Figura 29. Apeo de la cúpula interior ante el corte de los anclajes

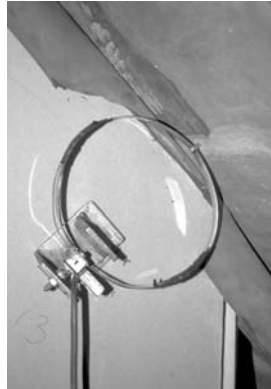


Figura 30. Trasductor de anillos resistentes para el control del corte de anclajes



Figura 31. Corte de anclaje con el robot

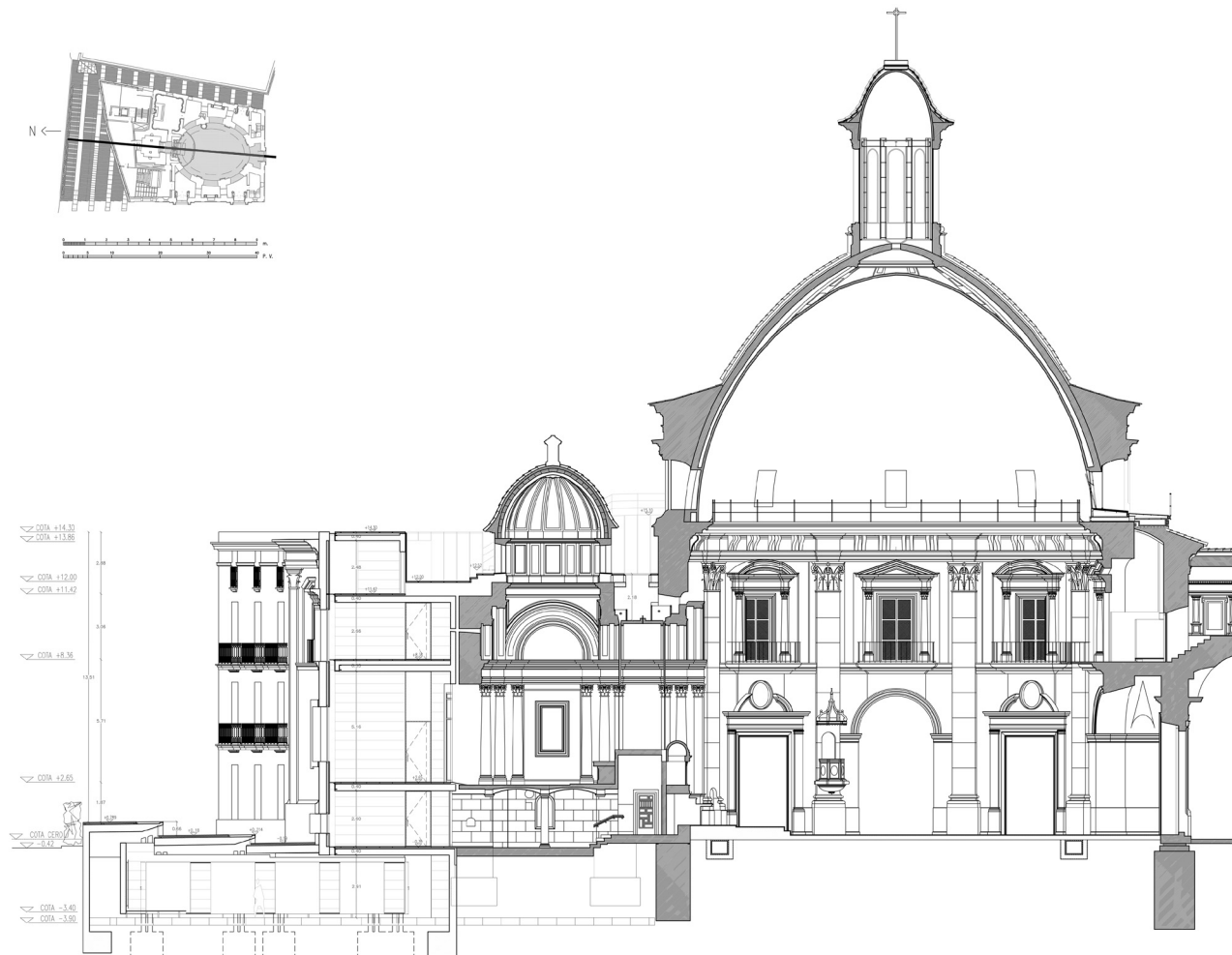


Figura 32. Sección longitudinal de la Basílica de Valencia

- El resultado en su conjunto se considera totalmente satisfactorio, e indicativo de un correcto comportamiento estructural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo desean dejar constancia de su agradecimiento a la Fundación para la Restauración de la Basílica de la Mare de Deu dels Desamparats, por la oportunidad que nos ha brindado al promover esta restauración. Igualmente desean agradecer la ilusión, dedicación y profesionalidad de todos y cada uno de los investigadores y becarios que han colaborado en perfecta conjunción interdisciplinar, sin cuya colaboración, no hubiera sido posible la consecución de los objetivos propuestos.

Cabe nombrar específicamente al Instituto Intemac, y dentro de él, a José M^a Izquierdo, al que le reconocemos su actuación como motor de la investigación. Igualmente deseamos reconocer la labor realizada por los colaboradores directos en la realización de los ensayos y de la obra, como: Antonio Iglesias, Antonio Peña, Antonio Altarriba y Begoña Fuentes en la ejecución de la obra; Juan I. Cuadrado, Vicente Mata y Francisco Valero en el campo de la robótica; Pablo Navarro, José Herraiz y equipo, en el reconocimiento gráfico; Santiago Relanzón, José Madrid, Juan Valcarcel y Lucía Peiró en el campo fotográfico; Mariano Aguilar y Marisa Martínez en el campo colorimétrico; Teresa Doménech y Francisco Bosch, en el campo físico-químico; José M. Pinazo, Pedro Torrero y Enrique Vivó, en el campo medioambiental; y a Pilar Roig, Gianluigi Colalucci, Julia Osca, y José L. Regidor padre e hijo, en el control y restauración de las pinturas murales.



Figura 33. Fachada principal de la Basílica de Valencia

Por último, agradecer la eficiente, respetuosa y profesional actuación de la Empresa Constructora, Lubasa, que ha sido pieza clave en el éxito del resultado.

NOTAS ACLARATORIAS

¹ Para el análisis del comportamiento estructural, con la colaboración de INTEMAC, se ha definido un modelo matemático de cálculo tridimensional por elementos finitos, en base a dos cuestiones:

- Se ha tomado como sistema de comprobación-peritación, con capacidad de simular la realidad, de justificar los daños existentes, y poder aportar una hipótesis razonable del comportamiento estructural.
- Se ha ajustado el modelo a la realidad mediante: la determinación de su geometría como un elipsoide bicuadrático; su definición como modelo tridimensional de 894 bloques para la cúpula exterior, 476 elementos tipo placa, para la cúpula interior, 242 elementos bloque para el tambor, y 268+32 elementos placa para la linterna; y la simulación de los materiales, del proceso constructivo, de los puntos de conexión entre ambas cúpulas, y de los diferentes estados de cargas.

² Los temas relevantes en la realización del Modelo A fueron:

- Construcción de la hoja exterior y dos nervios con ladrillo macizo, con el aparejo original, cuatro hiladas de tizonos y una de sogas, tomadas con mortero de cal y arena de la dosificación del siglo XVI: una parte de cal apagada y tres partes de arena, a la que antes de su uso, se le añade una séptima parte de cal viva, que le confiere mayor plasticidad y, por tanto, más facilidad de manejo, según lo describe J. Casinillo (1994), en su tesis doctoral.
- Terminación de su intradós con doble capa de yeso de 1cm, con reproducción de los esgrafiados originales de ángeles niños.
- Simulación de la capa de suciedad mediante el espolvoreado de limo seco y tamizado mezclado con negro de humo.
- Construcción de la hoja interior tabicada, de dos roscas de ladrillo macizo, de 3,50 cm. y 2,5 cm, de espesor, tomadas con yeso, terminando el extradós con yeso a resregón y el intradós con dos capas de yeso de 1,5 cm. y 1,2 cm, rugosa y rallada.
- Simulación de la disgregación entre roscas, produciendo su separación de forma controlada.
- Terminación del intradós con la técnica al fresco, simulando el motivo central de la composición pictórica de la cúpula: la Virgen de los Desamparados.

-Simulación del cuadro fisurativo, aplicando fuerzas de compresión controladas y progresivas.

³ Para la detección de la posible formación de humedades se dispuso del control de temperatura y humedad superficial, ambiental (interior y exterior), y a 4 mm de profundidad del fresco, mediante sistema informático de captación de datos con 20 canales conectados a 20 sondas de temperatura húmeda y seca.

⁴ Este control se realizó mediante extensómetro mecánico de 40 cm, con precisión de 1 micra, del Instituto Politécnico de Lisboa, diseño del profesor Julio Ferry Borges.

BIBLIOGRAFÍA

- Bosch, I. et al. (1994): *Recuperación integral de la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia. Primera parte: metodología. Inventario descriptivo. Registro de daños.* Tomos I y II, Valencia.
- Bosch Reig, I. (2005): *Intervención en el Patrimonio: análisis tipológico y constructivo*, ed. UPV, Valencia.
- Brandi, C. (1988-1989): *Teoría de la Restauración*, Alianza Editorial, Madrid.
- Capitel, A. (1988): *Metamorfosis de Monumentos y teorías de la restauración*, Alianza Forma, Madrid.
- Casinillo, J. (1994): *Estudio comparativo de las naves de las Catedrales Góticas*, Tesis Doctoral.
- Esteban Chapapría, J. ([1987] 1990): *Estudio previo a la intervención en el patrimonio arquitectónico*, Publicación del Ministerio de Cultura, Madrid.
- Fierro, F. (1994): *El color en Sta. Cruz de la Palma 500 años*, Gobierno Canario, Sta. Cruz de la Palma.

García, Á. et al. (2000): *El color. En el barrio de Velluters*, Valencia.

Gonzalez, A. (1999): *La restauración objetiva*, Memoria SPAL 1993-1998, Barcelona.

Grassi, G. (1979): *La arquitectura como oficio y otros escritos*, Barcelona.

Moneo, R. y Sola-Morales, I. (1975): *Apuntes sobre Pugin, Ruskin y Viollet-le-Duc*, Barcelona.

Paricio, I. (1985 / 1986 / 1994): *La Construcción Arquitectónica. 1. Las Técnicas. / 2. Los Elementos. / 3. La Composición*, I.T.C. de Catalunya, Barcelona.

Roig, P. (2005): *Estudio técnico, analítico y estilístico de obras de arte*, Ed. UPV, Valencia.

Scholfield, P.H. (1971): *Teoría de la proporción en arquitectura*, Biblioteca Universitaria labor, Barcelona.

Solá-Morales, I. (1982): "Teorías de la intervención arquitectónica", en *Quaderns* nº 155, Barcelona.

Solá-Morales, I. (1985): "Del contraste a la analogía. Transformaciones en la concepción de la intervención arquitectónica", *VIII Curset sobre la intervenció en el Patrimoni Arquitectònic*, Barcelona.

Torres Cueco, J. (1995): *Sobre la intervención en el patrimonio arquitectónico*. S.P.U.P.V., Valencia.

Valeri, J.M. (1990): *Fichas de rehabilitación*, I.T.E.C. 1985, Barcelona.

Revista LOGGIA

Revista R&R Restauración y Rehabilitación

AUTORES

Ignacio Bosch Reig: Dr. Arquitecto, Catedrático de Universidad, Dpto. Proyectos Arquitectónicos, ETSAV, UPV.

María José Ballester Bordes: Arquitecta, Profesora Asociada de Universidad. Dpto. Proyectos Arquitectónicos, ETSAV, UPV.

Bernardo Perepérez Ventura: Dr. Arquitecto, Catedrático de Universidad, Dpto. Construcciones Arquitectónicas, ETSAV, UPV.

Emilio Barberá Ortega: Dr. Arquitecto, Catedrático de Universidad, Dpto. Construcciones Arquitectónicas, ETSAV, UPV.

English version

TITLE: *Non-destructive techniques for structural consolidation: the case of the Basilica of Valencia.*

ABSTRACT: *In the present article we describe the testing programme used to determine several characteristics of the materials applied in the consolidation of the domes of the 'Basilica de la Virgen de los Desamparados', in Valencia, such as the physical-mechanical characteristics under real conditions and the application processes. Likewise the methods followed for this structural consolidation are described.*

The whole process was achieved with the use of non-destructive methods of characterisation and intervention, including: specialised photography, colorimetry, analytical techniques (MO, AI, SEM/EDX, HPLC, GC/MS, UV-Vis, PH), metal detection, multi-frequency ray emission, ultrasounds, thermography, endoscopy, and robotised inspection. These studies have been undertaken by the Instituto de Restauración del Patrimonio at the UPV from 1999 to 2003.

KEYWORDS: *laboratory tests, in situ tests, rigour in the process, non-destructive techniques, sensitivity during intervention, interdisciplinarity*