

**Informe sobre la estabilidad de la cúpula
interior de la Basílica de los Desamparados (Valencia)**

por:

Santiago Huerta Fernández

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

con la colaboración de:

José Antonio García Ares

Generalitat Valenciana
Conselleria de Cultura, Educació i Ciència
Direcció General de Promoció Cultural y Patrimonio Artístico

Madrid, mayo de 2002

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivo del informe	1
2.1 Información recibida	2
3. Marco teórico del análisis de las estructuras de fábrica. Aplicación a las bóvedas tabicadas	2
3.1 El material: principios del análisis límite	2
3.2 Teoremas fundamentales del análisis límite: Teorema de la seguridad	3
3.3 Agrietamientos	3
3.4 Las bóvedas tabicadas como bóvedas de fábrica	4
4. Sobre la construcción de cúpulas tabicadas	4
4.1 Empleo de rellenos y "lengüetas"	5
4.2 Construcción sin cimbra	6
4.3 Construcción de cúpulas ovales: aspectos estructurales	6
5. Sobre la construcción de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados	7
5.1 Relleno y "lengüetas" o tabiques de estribo	7
5.2 Empleo de hierros en la mitad superior	8
5.3 Estudio de la forma geométrica	10
6. Sobre la seguridad de la cúpula interior	15
6.1 Seguridad geométrica	15
6.2 Resistencia, niveles de tensiones	16
6.3 Pandeo	17
7. Conclusiones	18
8. Bibliografía	20

1. Introducción

La Basílica de los Desamparados de Valencia está en curso de restauración. La intervención sobre la cúpula reviste especial importancia porque sobre la cáscara interior pintó Palomino sus famosos frescos, que se han convertido en símbolo de la ciudad de Valencia. Si el fresco de Palomino ha pasado a la historia de la pintura, la cúpula construida para su soporte, una cúpula tabicada, es un ejemplo único de este tipo de construcción y por su audacia y perfección en la ejecución merece pasar a la Historia de la Construcción. No en vano, el arquitecto valenciano Rafael Guastavino la cita en su ensayo sobre la construcción tabicada, publicado en Nueva York en 1893. Así, no sólo hay que preservar el fresco de Palomino; también la cúpula interior merece una protección integral.

Existe una propuesta de intervención que parte de la premisa de que la citada cúpula interior no tiene carácter autoportante (se la denomina "falsa"), que ha estado colgada de unos hierros que conectan ambas cúpulas, que ha sufrido daños por problemas de inestabilidad y que es preciso devolver la cúpula a su inicial condición de "cúpula colgada" insertando más de cuatrocientos tirantes tensados anclados en la cúpula exterior.

El carácter inusual e irreversible de la actuación ha suscitado dudas sobre su validez y, para garantizar la seguridad de las actuaciones sobre la cúpula, la Generalitat Valenciana ha formado una Comisión de Expertos que deben emitir juicios sobre las posibles intervenciones sobre la cúpula. Este informe se emite en calidad de miembro de dicha Comisión.

2. Objetivo del informe

El presente informe trata de responder a las siguientes preguntas:

- 1) si la cúpula en su estado actual es segura.
- 2) en caso de ser insegura, qué medidas de consolidación serían recomendables.
- 3) en caso de duda, recomendar los estudios precisos para dilucidar el problema.

Aunque el informe tiene su origen en un Proyecto de Intervención, no pretende juzgar el citado proyecto, sino realizar consideraciones y establecer premisas que ayuden a emitir dicho juicio a las autoridades competentes.

El autor, en la medida de lo posible, ha tratado de colocarse en una situación anterior al inicio de las actuaciones, emitiendo su opinión de manera independiente, como experto que visita un edificio ("visitación" se llamaban en Castilla en el Renacimiento a los exámenes periciales) y emite su parecer sobre su estado actual y la necesidad, en su caso, de reforzar su estructura.

2.1 Información recibida

Para elaborar este informe se ha utilizado la información sobre forma, construcción y materiales que aparece en los documentos del Proyecto de intervención dirigido por D. Ignacio Bosch. Se ha realizado una visita de inspección, y se ha asistido a una reunión en la que D. Ignacio Bosch y D. José María Izquierdo han explicado y expuesto la intervención prevista.

Con posterioridad, se pidió la fotogrametría completa de la cúpula interior, que D. Ignacio Bosch me envió amablemente, y se expresó la necesidad de realizar una verificación sobre el, más que probable y fundamental, contacto con la cúpula exterior, a través de los nervios, en la mitad inferior. En el momento de escribir no se ha recibido esta última información.

3. Marco teórico del análisis de las estructuras de fábrica. Aplicación a las bóvedas tabicadas

Al realizar los estudios se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años —véase Heyman (1995, 1999). En realidad, el profesor Heyman ha dado rigor teórico a la llamada "antigua teoría de bóvedas" que se aplicó con éxito durante los siglos XVIII, XIX y principios del XX, momento en que este tipo de estructuras dejaron prácticamente de construirse.

En este apartado se resumirán los principios e ideas fundamentales.

3.1 El material: principios del análisis límite

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las

piedras o ladrillos es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres suposiciones dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas enunciados por Heyman (1966, 1995):

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, pero los casos de deslizamiento entre piedras o ladrillos son extremadamente raros.

3.2 Teoremas fundamentales del análisis límite: Teorema de la seguridad

Si se cumplen las anteriores condiciones los Teoremas Fundamentales del Análisis Límite, demostrados originalmente para pórticos metálicos o de hormigón se pueden aplicar a las estructuras de fábrica (Heyman, 1966, 1999). De particular importancia es el Teorema de la Seguridad que afirma: *si es posible encontrar una distribución de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas que no viole las condiciones de límite del material la estructura no colapsará, es segura.*

La potencia del Teorema radica en que esta distribución de esfuerzos internos no tiene que ser "real", basta con que sea posible. Esto es, si el analista descubre una manera, entre las infinitamente muchas posibles en una estructura hiperestática, en la que la estructura soporte las cargas a compresión, la estructura también será capaz de encontrarla.

Así, para que una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores sea segura la trayectoria de los esfuerzos internos, las «líneas o superficies de empujes», deben estar contenidas dentro de la estructura. La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección (Heyman,

3.3 Agrietamientos

Las grietas son algo natural en un material que no resiste tracciones. De hecho, los agrietamientos son la única forma de adaptarse a pequeñas variaciones en las

condiciones de contorno (por ejemplo, a un pequeño desplazamiento de los estribos, etc.). Las grietas dividen la estructura en un conjunto «articulado» de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones de contorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes (distintas soluciones de las ecuaciones de equilibrio). Sin embargo, el Teorema Fundamental nos asegura que, si encontramos «un sistema de líneas de empujes» (esto es una cierta situación de equilibrio) dentro de la fábrica, aunque pueden moverse bruscamente, éstas nunca se saldrán de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad está asegurada.

Un corolario del Teorema de la Seguridad es que cualquier pequeña variación de las condiciones de contorno, aunque puede ocasionar agrietamientos muy visibles, no afecta la seguridad de la estructura. La forma geométrica ha cambiado y la misma solución de equilibrio a compresión de la estructura original intacta, es posible para la ligeramente deformada y agrietada (Heyman 1995).

3.4 Las bóvedas tabicadas como bóvedas de fábrica

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica. Desde el siglo XVIII han sido consideradas, con frecuencia, como esencialmente distintas: son supuestamente monolíticas, no empujan y resisten tracciones y flexiones. Estas ideas, que se remontan a la primera mitad del siglo XVIII francés, se han demostrado falsas tanto en la teoría como en la práctica. Las bóvedas tabicadas empujan y se agrietan, como puede verse en cualquier iglesia cuyas bóvedas estén así construidas, y como lo afirman los grandes constructores de bóvedas tabicadas: Fray Lorenzo de San Nicolás y Ventura Rodríguez. Así, la misma teoría puede aplicarse a este singular tipo constructivo (Huerta 2001b, 2001d).

4. Sobre la construcción de cúpulas tabicadas

No se puede, no se debe, realizar una intervención sobre una estructura histórica sin antes conocer algo de la tradición constructiva a la que pertenece. Los siguientes párrafos sólo pretenden dar de una manera muy breve este contexto; para una bibliografía detallada véase González (1999) y Huerta et al. (2001c).

La construcción de bóvedas y cúpulas tabicadas es típicamente mediterránea: aparece en España, Francia (voûtes plates), Italia (volte alla volterrana) y norte de África (Argelia,

rhorfes). A finales del siglo XIX se exporta a América (timber vaults), donde los Guastavino construyen millares de bóvedas y cúpulas. En Cataluña (voltes de maó de pla) se convierten en un símbolo nacional, desde finales del siglo XIX). En España, se emplean en la reconstrucción y en obra nueva tras la guerra civil, debido a la escasez de hierro. Tras la segunda guerra mundial se emplean en la reconstrucción de algunas bóvedas de iglesia en Alemania (Flachenziegelgewölbe). En España las primeras fuentes documentales se remontan al siglo XIV, pero es muy probable que puedan encontrarse ejemplos anteriores en la arquitectura árabe.

La primera descripción completa de este modo de construcción se encuentra en el tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639), publicado en Madrid. Posteriormente Bails (1787) recoge las indicaciones de Fray Lorenzo; otra fuente fundamental son los tratados de Fornés y Gurrea (1841), publicados en Valencia. Hay, pues, en España una antigua tradición de la construcción de bóvedas y cúpulas tabicadas que debe ser estudiada y tenida en cuenta a la hora de juzgar cualquier construcción de este tipo.

4.1 Empleo de rellenos y "lengüetas"

Las cúpulas tabicadas son muy delgadas; un espesor típico de 10 cm para luces habituales de 10 m (por ej. en iglesias parroquiales), nos da una esbeltez, relación entre luz y espesor, $l/e = 100$, del mismo orden que la cáscara de un huevo de gallina.

Es bien sabido que para que estructuras tan delgadas trabajen a compresión es preciso disponer de rellenos y refuerzos (en general, cualquier bóveda de fábrica los tiene, para poder reducir el espesor a una cantidad razonable). Así, Fray Lorenzo, insiste en que se macicen los arranques el primer tercio y se dispongan "lengüetas" (muros o tabiques transversales) hasta alcanzar el segundo tercio de la altura de la bóveda. Relleno y lengüetas son estructurales aunque no precisan estar contruidos con materiales de gran calidad. Así, puede verse en cualquier bóveda o cúpula de rosca de ladrillo o tabicada la existencia de este relleno (aunque sea difícil estimar su altura a simple vista) y, siempre, la disposición de lengüetas o muros de estribo. Cuando se trata de una cúpula de media naranja (semiesférica), lo usual es disponer ocho lengüetas: según los ejes y las diagonales.

Los rellenos y lengüetas suponen una "vía de escape" para los empujes en la zona en que, de no existir, la fábrica debería trabajar a tracción. Para una cúpula semiesférica de espesor constante las tracciones aparecen a unos 52° de la clave, esto es a $0,78R$; en cáscaras peraltadas la zona traccionada en estado de membrana desciende; un estudio

de ordenador sobre una cúpula elipsoidal análoga a la de los Desamparados reduce la altura $0,6R-0,5R$.

Debe insistirse en la incapacidad de la fábrica tabicada para resistir tracciones. Es cierto que los ensayos de laboratorio dan valores apreciables (Guastavino, 1893) del orden de $1,4 \text{ N/mm}^2$, y que pero el material es frágil y, como se ha dicho, cualquier variación de las condiciones de contorno sólo puede ser admitida por la estructura agrietándose: ningún constructor sensato se arriesgaría a usar esta precaria resistencia para asegurar su obra y de ahí que todas las construcciones de fábrica presenten dispositivos que permitan un estado de equilibrio en compresión. Desde luego, históricamente nunca se hizo y la evidencia histórica que se encuentra en los Tratados de arquitectura y construcción en cuanto a la incapacidad de resistir tracciones es irrefutable (Huerta 2001b).

4.2 Construcción sin cimbra

Las bóvedas y cúpulas tabicadas se construían sin cimbra. Esta ventaja y su reducido peso las hicieron enormemente populares en los siglos XVII al XIX. El sistema de contrarresto, el 90% del material de la estructura, podía reducirse casi a la mitad (véanse las reglas de Fray Lorenzo para estribos: Fray Lorenzo 1639; Huerta 1990), y los andamios y medios auxiliares se limitaban a medios para controlar la forma de la bóveda.

La construcción de una cúpula de revolución es uno de los casos más sencillos. Basta con disponer un "cintrel" (palo o cuerda) que, unido a un punto fijo, nos da la posición de cada hilada. En el caso de las medias naranjas la longitud es fija; si la cúpula es rebajada o peraltada se varía su longitud para cada hilada horizontal. De nuevo la descripción del procedimiento puede encontrarse en Fray Lorenzo y Fornés y Gurrea.

4.3 Construcción de cúpulas ovales: aspectos estructurales

La construcción de cúpulas de planta oval presenta muchas más dificultades (a no ser que sean de revolución respecto a uno de los ejes de la planta, en cuyo caso presenta secciones circulares en una dirección; la forma elíptica presenta problemas y este tipo de cúpulas es infrecuente).

De nuevo, Fray Lorenzo y Fornés discuten el tema del replanteo geométrico, pero en este caso nos interesa el aspecto estructural. Una cúpula de revolución puede construirse sin cimbra, dejando un "óculo" abierto que se va cerrando a medida que se construye la

cúpula. El anillo del óculo debe trabajar a compresión y, dada la simetría, la forma es perfectamente circular por lo las compresiones están contenidas dentro del anillo del óculo, por lo que no se producen flexiones ni tracciones.

La construcción puede proceder desde dentro, para cúpulas pequeñas, o, desde fuera, apoyándose sobre el trasdós de la bóveda, para grandes cúpulas (por ejemplo, la cúpula de San Juan el Divino de Nueva York (Ramazzotti, 1997)). Por supuesto, a medida que se construye la cúpula hay que ir macizando y disponiendo lengüetas.

La situación cambia radicalmente cuando la cúpula es oval. La forma del anillo de compresiones no tiene por qué coincidir con la forma del óculo y esto hace que aparezcan, inevitablemente, flexiones y tracciones si la cáscara es delgada. Es preciso un cierto grosor de la fábrica que permita acomodar al anillo de compresiones, particularmente cuando la superficie pierde verticalidad.

En cúpulas de fábrica normales con espesores típicos de //12 (regla de Fontana; Huerta 1990) es probable que el anillo de compresiones pueda acomodarse sin problemas dentro de la fábrica a medida que progresa la construcción. En el caso de una cúpula tabicada esto no es así; la gran delgadez de las paredes obliga a buscar casi una solución de membrana, que precisaría de un zuncho de borde. La cúpula no puede "construir" este zuncho por su delgadez y aparecerían flexiones. Habría pues que disponer de algún tipo de cimbra auxiliar mientras se cierra la cúpula. Una vez cerrada, habría un estado de compresiones en el casquete y se podría retirar el dispositivo de cimbrado.

5. Sobre la construcción de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados

La cúpula interior de la Basílica de los Desamparados presentaba un problema inusual. Existe una cúpula construida con anterioridad y la cúpula debía construirse desde dentro. Por otro lado, la cúpula interior está protegida por la cúpula exterior y sólo debe sostenerse a sí misma.

5.1 Relleno y "lengüetas" o tabiques de estribo

No obstante, la cúpula, para ser estable precisará de elementos de estribo: rellenos y lengüetas. En el caso de la cúpula de los Desamparados, sabemos que no existe el relleno. La razón es obvia: se trata de dejar una cámara de aire para que el fresco pueda "respirar" y, además, evitar una posible transmisión de humedades desde el exterior.

¿Cómo conseguir, entonces, el contrarresto necesario? Podrían haberse construido lengüetas pero eso hubiera exigido, constructivamente, una mayor separación entre las cáscaras. La solución obvia es usar los nervios interiores de resalto de la primera cúpula como lengüetas. De esta manera, es posible apoyarse en ocho zonas siguiendo la regla habitual en este tipo de cúpulas, con la ventaja añadida de que los nervios presentan un ancho muy superior al que podría obtenerse con un muro normal. Además, las jambas y dinteles de las ventanas sirven de "luneto de contrarresto". Finalmente, hay que decir que la necesidad del relleno disminuye debido a la gran verticalidad de los arranques de la cúpula.

Por tanto, la lógica de la construcción tabicada implica construir apoyándose contra la cúpula exterior a través de los nervios, principalmente, y también de las ventanas. De esta manera puede construirse una cáscara de extrema delgadez, pero sólidamente estribada en su mitad inferior.

Debo insistir de nuevo en que este contacto entre ambas cúpulas, muy probable en base a los argumentos anteriores, y fundamental para explicar la estabilidad de la cáscara interior, no ha sido investigado. (Por otro lado, cualquier análisis estructural realizado considerando la cúpula exenta quedaría automáticamente invalidado de existir este contacto.)

5.2 Empleo de hierros en la mitad superior

En la parte superior del espacio intercúpulas aparece un elemento inusual: existen numerosos hierros que, dispuestos inclinados con simetría "radial", conectan ambas cúpulas. En particular, parecen estar destinados a resistir una cierta tracción, como puede verse por el cuidadoso anclaje en la cúpula exterior y la terminación en "T", recibida con dos ladrillos y yeso en la cúpula inferior.

Estos hierros han sido interpretados por los autores del Proyecto de intervención como fundamentales para la estabilidad de la "falsa cúpula" que, supuestamente, estaría colgada de ellos. Es cierto que, como se ha dicho, los hierros parecen haber sido dispuestos para resistir una cierta tracción, pero es más que dudoso que, dada la naturaleza imperfecta de los anclajes y, sobre todo, su falta de verticalidad, pudieran haber resistido el peso de las, aproximadamente, 70 toneladas que pesa la cúpula interior. Dado que hay 127 hierros, cada uno debería soportar del orden de 0,5-1 toneladas, dependiendo de su inclinación. Es evidente, que los anclajes existentes no podrían resistir esta carga, pero, aunque lo hicieran, en modo alguna una delgada cúpula

tabicada de apenas 8 cm de espesor podría resistir las flexiones y "punzonamiento de tracción" asociados.

Por otra parte, el pensar el maestro de obras o arquitecto de la cúpula pensó en que los hierros "colgaran" la cúpula carece de sentido, pues contradice toda la tradición y la lógica de la construcción de fábrica, no existiendo ningún caso de este tipo. Finalmente, hay una objeción evidente que hace ver lo disparatado de esta hipótesis: la cúpula debiera haberse construido de arriba a abajo, para que quedara efectivamente colgada, aún cuando los anclajes y la propia fábrica hubiera podido soportar las tracciones y flexiones

De hecho, los hierros que aparecen en la mitad superior resuelven el problema antes citado de construcción de cúpulas ovales sin cimbra, y su inclinación variable en función de la altura, tratando de atar las sucesivas hiladas tabicadas, parece confirmar esta hipótesis. En efecto, dada la gran verticalidad de los arranques la construcción podría haber progresado sin cimbra hasta, digamos, la mitad de la altura. Al crecer la inclinación, las compresiones en el anillo de borde empezarían a ser significativas y, dado que no podrían estar contenidas dentro del delgado espesor de la cúpula aparecerían flexiones: los hierros "atan" cada anillo sucesivo impidiendo las flexiones al suministrar en cada caso las pequeñas fuerzas de tracción o compresión necesarias.

Completada la cúpula los hierros pierden su función de "cimbra" provisional y podrían ser retirados. No obstante, hay que decir, que la eliminación de una disposición constructiva tan original supondría una inaceptable mutilación de nuestro patrimonio técnico-constructivo.

Además, conviene ser prudentes. Es un hecho que, en este momento, salvo algún daño local fácilmente reparable, los hierros no afectan a la cúpula (si lo hubieran hecho a lo largo de un periodo de 300 años ésta lo habría acusado), pero no podemos estar completamente seguros de que sean innecesarios. Baste un ejemplo: los tirantes de hierro que ataban la cabeza de los estribos exteriores de la catedral de Beauvais. Llevaban colocados más de 5 siglos cuando, durante los años 1990, un estudio técnico los consideró superfluos y se eliminaron. Inmediatamente, los sensores colocados en los estribos empezaron a detectar unos movimientos, antes inexistentes, completamente imprevistos y que produjeron alarma por su magnitud. Desconozco el estado actual del problema, pero cabe preguntarse qué objetivo puede tener eliminar un antiguo elemento estructural, aunque parezca superfluo, si no hay evidencia alguna de que sea perjudicial.

5.3 Estudio de la forma geométrica

La forma geométrica de las cúpulas ovales depende de la forma de construcción seguida y, rara vez se corresponden con superficies que puedan definirse con una fórmula matemática (una excepción es, por ejemplo, la sala capitular de la Catedral de Sevilla, donde la superficie de intradós es un elipsoide de revolución perfecto). Cuando la cúpula apoya sobre un tambor, es muy improbable que las curvas de intradós y trasdós del muro sean ambas elipses, pues esto llevaría a un tambor de espesor variable, que es un sin sentido constructivo.

El levantamiento fotogramétrico, Figura 1, permite ver que, sin lugar a dudas, la planta de la cúpula y del tambor son óvalos, formados por arcos de circunferencia. En cuanto a la forma de la superficie de intradós, la fotogrametría suministra una "nube" de puntos, en la que aparece algún hueco, pero, sobre todo, en la que falta toda la zona del arranque (aproximadamente 1/4 de la altura), sin duda debido al efecto de "sombra" de la cornisa.

Para analizar los datos se ha empleado el programa *Rhinoceros*. Este programa de ordenador permite ajustar distintas superficies a los puntos, con ciertas tolerancias e hipótesis en cuanto a la forma de interpolación. La solución varía con el margen de desviación admitido.

En este caso, hay que decir que no son infrecuentes desviaciones del orden de 5 cm (esto es del mismo orden que el espesor de la cáscara) y que, además, ha habido que interpolar en toda la zona inferior de la que no se disponen puntos, como puede verse en la Figura. Por tanto, el estudio es aproximado.

De las secciones y perspectivas que suministra el programa, incluso de la inspección de la propia nube de puntos, Figura 1, resulta evidente que hay un cambio brusco de la curvatura un poco por encima de la mitad de la altura de la cúpula (así se ha dibujado, además, en algunas secciones del proyecto de intervención, Figura 2). Este hecho parece confirmar la hipótesis antes expuesta de que la cúpula interior arranca siguiendo la forma de la exterior, apoyándose contra los resaltos interiores de los nervios, para separarse a suficiente altura, de manera que todo el casquete superior esté trabajando a compresión, tanto en sentido de los meridianos como en el de los paralelos.

En la superficie interpolada por el programa se observan también "abolladuras", zonas de curvatura gaussiana negativa, pero estos defectos locales son más sensibles a los

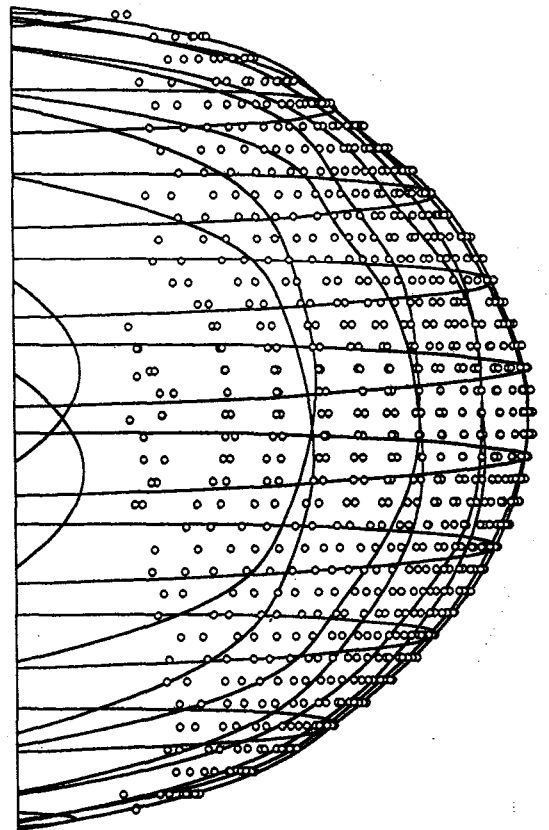
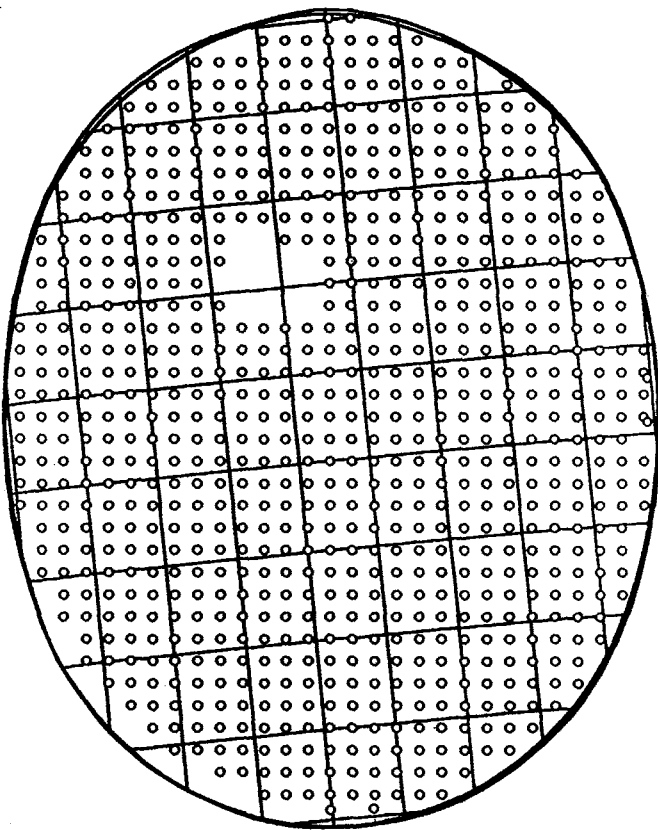
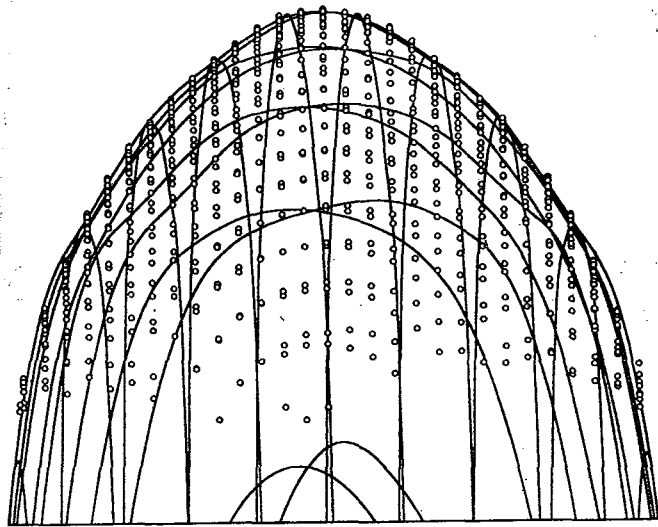


Figura 1. Representación gráfica de los puntos de la fotogrametría, con curvas de ajuste generadas por el programa *Rhinoceros*

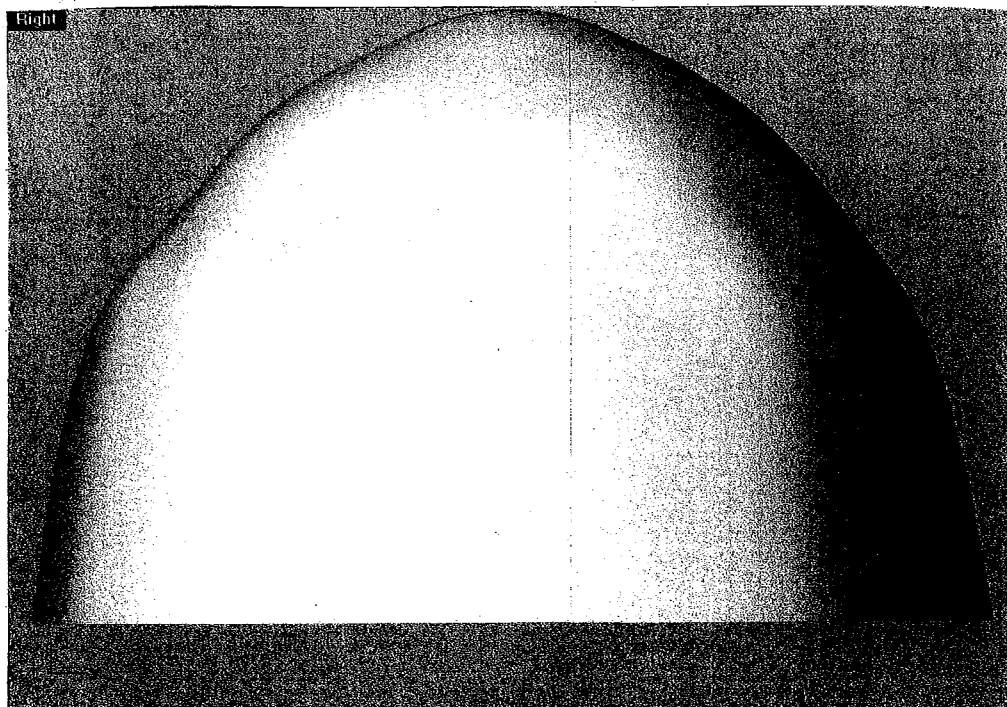
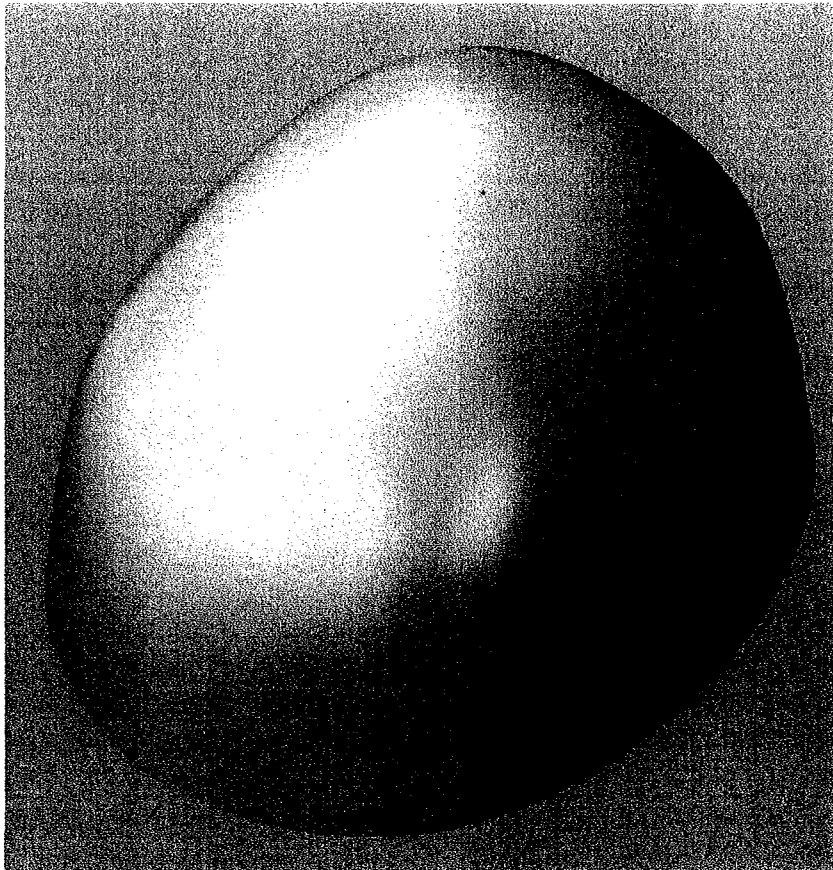


Figura 2. Perspectiva de una de las superficies de ajuste generadas por el programa *Rhinoceros*. Nótese que las abolladuras locales pueden no ser reales

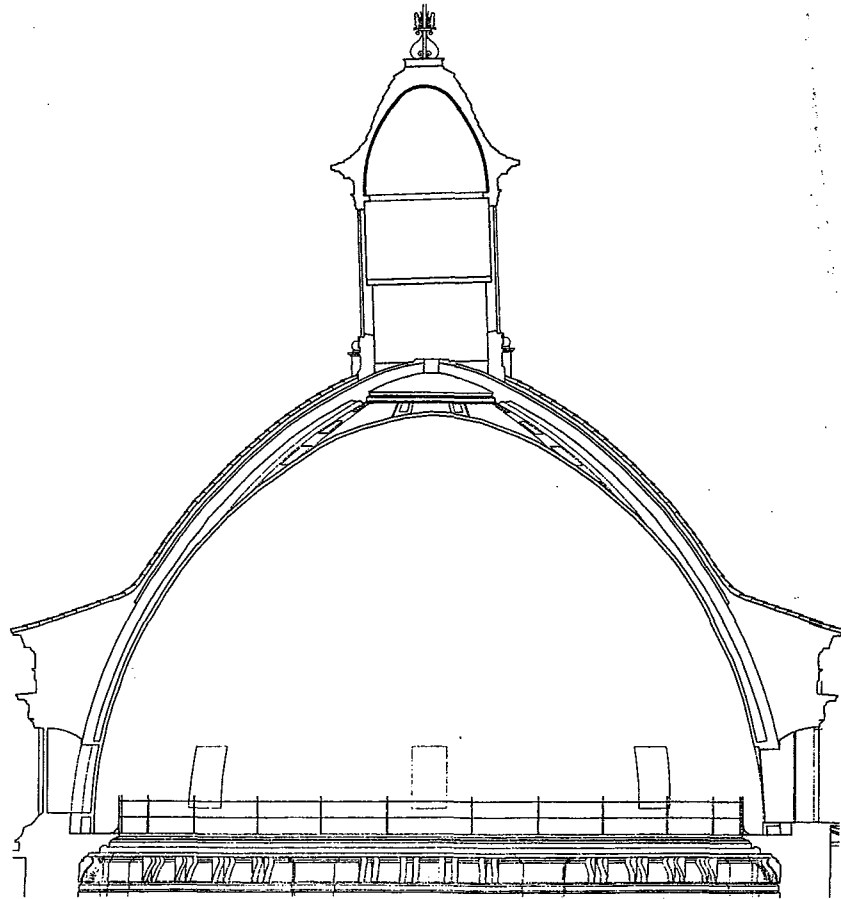
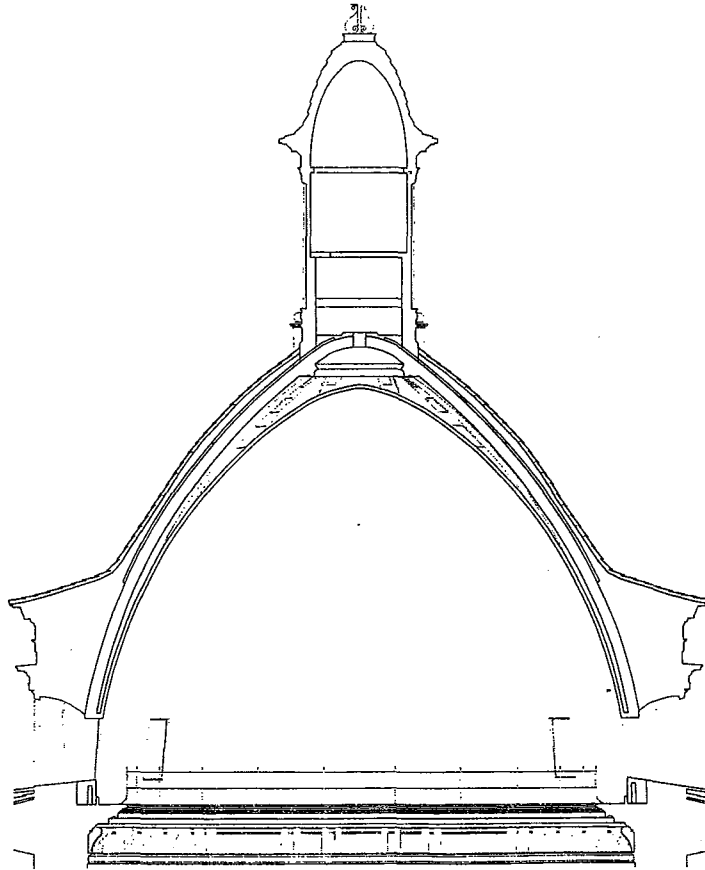


Figura 3. Levantamiento planimétrico (tomado del proyecto de D. Ignacio Bosch). Secciones según los ejes principales del óvalo de planta. Nótese el marcada paralelismo entre las cúpulas exterior e interior en la mitad inferior.

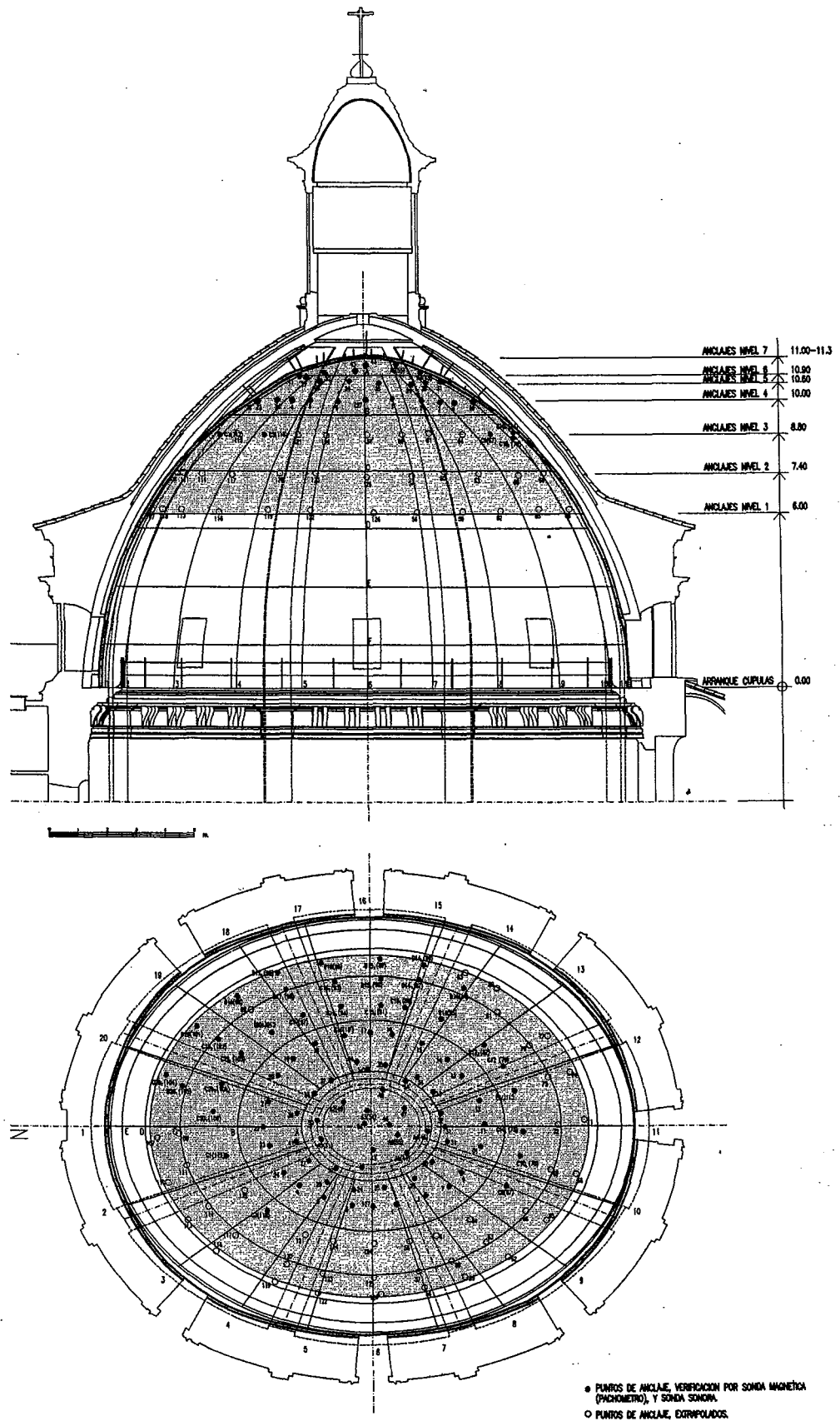


Figura 4. Localización de los puntos de anclaje de los hierros a la cúpula interior. Nótese su disposición aproximada según anillos horizontales (tomado de los estudios dirigidos por D. Ignacio Bosch)

posibles errores de medición y a la tolerancia que se adjudique en el programa. No se ha realizado un estudio exhaustivo de las curvaturas a nivel local y sería recomendable hacerlo, para verificar que en todos los puntos de esas zonas es posible un estado de equilibrio en compresiones.

Por otra lado, la existencia de curvaturas gaussianas negativas no tiene por qué ser necesariamente peligroso. En realidad esta curvatura da siempre un posible arco de compresiones, aunque el efecto visual sea de abombamiento hacia abajo (Gaudí utilizó este recurso, y la sensación de tensión espacial que produce, en las bóvedas del pórtico de la iglesia de la Colonia Güell). Si se encontraran zonas con curvatura gaussiana positiva hacia abajo, esto sí podría resultar peligroso, pues la fábrica estaría colgada a tracción, lo que sería imposible. No se hundiría toda la cúpula, pero sí, quizá, una zona de varios metros cuadrados. No obstante, en un examen rápido de las curvaturas de estas zonas, no se ha encontrado ninguna zona con curvatura gaussiana positiva "hacia abajo", si bien este extremo debería ser verificado con estudios más detenidos.

6. Sobre la seguridad de la cúpula interior

6.1 Seguridad geométrica

La cúpula interior de la Basílica de los Desamparados es "segura" (en el sentido que se da a la palabra dentro del marco del análisis límite: una estructura es segura cuando no colapsa) y en grado "suficiente", pues ha estado en pie durante 300 años. Una estructura no puede permanecer en precario durante tanto tiempo y es un hecho incuestionable que la cúpula ha sido suficientemente segura durante 3 siglos.

Cabría considerar la posibilidad de que hubiera dejado de serlo. Las causas principales que pueden hacer que una estructura de fábrica pierda seguridad son dos:

- cambio importante de la forma geométrica hasta adoptar una forma inestable (esto se suele producir en la mayoría de los casos por variaciones en las condiciones de contorno; cedimientos del sistema de contrarresto y/o de la cimentación).
- degradación del material hasta que pierde su resistencia

La forma geométrica de la estructura no ha cambiado sensiblemente, pues, los inevitables agrietamientos deberían manifestarse con claridad en el recubrimiento de cal y yeso del fresco. En el examen del trasdós realizado durante la visita de inspección no se observó ninguna grieta o fisura de importancia y, además, el agrietamiento no presenta ninguna

dirección predominante, siendo todas las fisuras, independientemente de su dirección, del mismo orden. Más que deberse a causas estructurales, parecen las típicas fisuras que se observan en la mayoría de los frescos, a veces consecuencia de la retracción o de los tajos de trabajo diario.

El material no se ha degradado. Las juntas de la segunda hoja del tabicado no están siempre bien rellenas pero es evidente que se trata de la ejecución original. No hay ningún mecanismo o proceso que pueda explicar la "expulsión" del mortero de relleno sin enormes deformaciones, que se hubieran manifestado en grandes grietas y, finalmente, en el hundimiento de la cúpula. El profesor Soler me ha dicho que la ejecución de esta última capa de esta manera imperfecta no es inusual en la construcción tabicada valenciana.

6.2 Resistencia, niveles de tensiones

La resistencia casi nunca es un problema en estructuras de fábrica o en cáscaras de doble curvatura. No obstante se discutirá brevemente el asunto. Las tensiones en las cáscaras delgadas de doble curvatura son siempre muy bajas y del orden, para peso propio de γR , donde γ es el peso específico del material y R es el radio de curvatura (Heyman, 1972). En el caso que nos ocupa el radio de curvatura puede andar alrededor de los 18 m (considerando un punto cerca de la base y que las secciones son elipses), y el peso específico puede ser de 1.600 kg/m^3 . La tensión máxima será del orden de 3 kg/cm^2 . Este valor tan bajo es típico de las cáscaras delgadas a peso propio

Las altas tensiones que en ocasiones aparecen en análisis de estructuras complejas de fábrica por el Método de Elementos Finitos elástico-lineales obedecen, normalmente, a problemas de incompatibilidad de deformaciones que no son reales. La fábrica es un material unilateral que no resiste tracciones y podemos imaginar como un conjunto de bloques en contacto seco y directo. La asimilación a un continuo, esencial en el planteamiento de MEF, es más que discutible. La existencia de fisuras hace inaplicable cualquier programa de ordenador que considere las ecuaciones de compatibilidad y constitutivas al modo clásico: deberíamos suministrar al programa una información que es imposible de obtener (¿cómo saber el agrietamiento interno de una fábrica tabicada o de cualquier tipo? ¿cómo modelizar el apoyo esencialmente irregular sobre la estructura de soporte? etc., etc.).

Las tensiones de tracción son muy bajas pero la fábrica tabicada no puede resistirlas

durante mucho tiempo. De hecho, todas las disposiciones construcciones adicionales en la construcción tabicada van encaminadas a asegurar un estado de equilibrio en compresiones (Huerta 2001a y 2001b).

6.3 Pandeo

La cúpula es, desde luego, una "cáscara delgada". El parámetro que se utiliza para medir la delgadez o esbeltez de las cáscaras es la relación entre su espesor (e) y su radio de curvatura (R). En el caso que nos ocupa y considerando un espesor eficaz entre 5 y 8 cm (dada la irregular ejecución), para el radio de curvatura máximo de 18 m, e/R estará entre 1/360 y 1/225. (Por supuesto, si existe contacto entre la cúpula y los nervios habría que considerar el pandeo en la parte libre de la cáscara donde el radio de curvatura será menor, y las cifras anteriores se reducirían a la mitad o menos.)

El pandeo de cáscaras delgadas es un tema extraordinariamente complejo (Lundgren, 1951); como consecuencia de ello las fórmulas se han deducido principalmente a partir de ensayos y se aplican coeficientes de seguridad muy altos (por ejemplo, la norma española estipula un mínimo de 4 para cáscaras de hormigón).

Una de las fórmulas más utilizadas para cáscaras de doble curvatura es la siguiente:

$$\sigma_{cri} = 0,25 E (e/R)$$

donde E = módulo de Young

Para $E = 50.000 \text{ kg/cm}^2$, se obtiene, considerando la cúpula sin contacto para los valores extremos de esbeltez citados: 35 kg/cm^2 y 55 kg/cm^2 , respectivamente. El coeficiente de seguridad se oscila, pues, entre 11 y 18. Obviamente, se considera que la cúpula apoya contra la exterior, que es lo más probable, la tensión crítica crece y aumenta todavía más el valor del coeficiente de seguridad.

Hay que hacer notar que los hierros apuntalan (pueden resistir compresiones y limitadas tracciones) la parte superior de la cúpula y limitan, así mismo la posibilidad de un pandeo global. Desde este punto de vista, su eliminación (o sustitución por elementos delgados que nos resistan compresiones disminuiría la seguridad de la estructura).

No obstante, la consideración de imperfecciones en la curvatura (por ejemplo, zonas casi planas de mayor radio de curvatura) podría reducir el valor de la tensión crítica. En este caso sería importante trabajar con los datos de una fotogrametría más precisa. Quizá,

los estudios teóricos podría n completarse con ensayos sobre modelos, pero conviene recordar de nuevo que se ha realizado ya un "ensayo a escala real" durante tres siglos. De haber peligro de inestabilidad ya se habría producido.

Finalmente, hay que mencionar otros casos de cúpulas tabicadas construidas con valores valores parecidos de esbeltez en distintas épocas. He inspeccionado personalmente dos casos:

- bóveda de cañón con lunetos de perfil rebajado en la iglesia de Castroverde de Campos (s. XVII-XVIII ?): $R = 10 \text{ m}$ $e = 8 \text{ cm}$ $e/R = 1/125$.

- Cúpula (media naranja) de la iglesia del convento de San Francisco: $R = 5 \text{ m}$; $e = 5 \text{ cm}$; $e/R = 1/100$;

y numerosas cúpulas construidas por el arquitecto Rafael Guastavino en América (Huerta, 2001b):

- Cúpula sobre el crucero de la catedral de San Juan el Divino (Rafael Guastavino): $R = 21 \text{ m}$; $e = 9,5 \text{ cm}$; $e/R = 1/220$

- Cúpula de la Grace Universalist Church (Rafael Guastavino): $R = 10,50 \text{ m}$; $e = 10 \text{ cm}$; $e/R = 1/100$.

Etc. etc.

Todas ellas en pie y sin problemas particulares.

7. Conclusiones

1) La cúpula está en buen estado y no se aprecian daños o deformaciones que hagan temer por su seguridad, si ésta apoya contra los nervios interiores de resalto en su mitad inferior. Éste último extremo debería ser verificado realizando las catas necesarias.

2) La cúpula es, en sí misma, una obra maestra de la ingeniería de la construcción y debería ser preservada en su integridad estructural y constructiva. Los hierros no deben ser eliminados ni debe realizarse ninguna intervención de consolidación que altere su funcionamiento estructural de cúpula de fábrica trabajando a compresión.

3) Se debería realizar un estudio detallado de las curvaturas, quizá realizando una nueva fotogrametría, para descartar la posibilidad de un fallo local por curvatura positiva hacia abajo.

4) Creo que la intervención, con las precisiones anteriores, se debe reducir a reparar los inevitables daños "cosméticos" que una estructura de tres siglos de antigüedad es normal

que presente: sellado de fisuras, abolsamientos bajo algún hierro, etc.

5) Finalmente, me gustaría señalar que, tapadas las fisuras durante la restauración del fresco, toda la cúpula es un enorme "testigo de yeso" que, dada su enorme rigidez, registraría cualquier pequeño movimiento formando grietas estructurales que se dibujarían con nitidez sobre el fresco. La inspección periódica de la superficie del fresco (mediante fotos o, incluso con prismáticos), permitiría saber, con un mínimo de coste y un máximo de fiabilidad, si ha habido movimientos o no.

En cuanto a algunos aspectos de la intervención propuesta:

4) La idea de "colgar" la cúpula interior de más de 400 tirantes tensados destruiría su esencia constructiva. Es, además, desde el punto de vista de la construcción de fábrica una intervención "contra natura", sin sentido alguno, que sólo puede acarrear problemas. En mi opinión, es incluso peligrosa para la integridad de la cúpula si los tirantes se llegan a tensar.

4) El colocar bandas de refuerzo o rellenar las juntas me parece innecesario dado que la actuación se limitaría, por imposibilidad física, a la zona superior de la cúpula que es la que menos necesitaría, en su caso, estos refuerzos. Además, si las bandas se reciben con resina o cualquier adhesivo impermeable al vapor de agua, es posible que se produjeran condensaciones en esas zonas, o alguna alteración no prevista. Lo considero un gasto inútil y un riesgo innecesario.

5) El disponer un relleno es estructuralmente bueno, aunque la cúpula no parece haberlo necesitado durante 300 años. Pero debe tenerse en cuenta que el relleno no se dispuso de forma intencionada, seguramente para que el fresco "respirase" por el trasdós, o para evitar la transmisión de humedades desde la cúpula exterior. Como antes, lo considero un gasto inútil y un riesgo innecesario.

Todo lo cual afirmo y rubrico según mi leal saber y entender en Madrid, a 30 de mayo de 2002.

Firmado:

Santiago Huerta Fernández

Profesor Titular del Departamento de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

8. Bibliografía

- Flügge, W. (1973). *Stresses in Shells*. 2nd Ed. Berlin: Springer Verlag.
- Fornes y Gurrea, Manuel. (1841). *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Imprenta de Cabrerizo.
- González Moreno-Navarro, JoséLuis (1999). «La bóveda tabicada. Su historia y su futuro». En *Teoría e historia de la rehabilitación*, Madrid: Departamento de Construcción de la ETS Arquitectura de Madrid, 1999, pp. 237-259.
- Guastavino, R. (1893). *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timbrel vault*. Boston: Ticknor and Company.
- Heyman, Jacques. (1966). "The Stone Skeleton." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 2, pp.249-79.
- Heyman, Jacques. (1969). "The Safety of Masonry Arches." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 11, pp. 363-385.
- Heyman, J. (1977). *Equilibrium of Shell Structures*. Oxford : Clarendon Press.
- Heyman, J. (1995). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. (ed. por S. Huerta). Madrid : Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, Jacques (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid : Instituto Juan de Herrera / CEHOPU.
- Huerta Fernández, S. (ed.) (2001a). *Las bóvedas de Guastavino en América* (Libro Catálogo de la Exposición «Guastavino Co. La reinención de la bóveda» . Madrid, octubre de 2001). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, COAC, UPV, Avery Library.
- Huerta, Fernández, S. (2001b). «La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino». *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU. pp. 87-112.
- Huerta Fernández, S.; G. López Manzanares y E. Redondo. (2001c). «Bibliografía seleccionada y comentada sobre Guastavino y la construcción tabicada». *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Inst. Juan de Herrera, CEHOPU. pp. 373-393.
- Huerta Fernández, S. (2001d). «Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach» *Historical Constructions 2001. Proceedings of the 3rd. International Seminar. Guimarães 7-9, November*, P. B. Lourenço and P. Roca, eds. Guimarães: Universidade do Minho, pp. 47-69.
- Huerta Fernández, S. (2001e). "The Mechanics of timbrel vaults: a historical outline." *Between Mechanics and Architecture. The Work of Clifford Ambrose Truesdell and Edoardo Benvenuto*. Genoa, November 30- December 1, 2001 (en prensa por Birkhäuser).
- Lorenzo de San Nicolás, Fray. (1639). *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i.
- Lundgren, H. (1951). *Cylindrical Shells. Volume 1: Cylindrical Roofs*. Copenhagen: The Danish Technical Press. The Institution of Danish Civil Engineers.
- Ramazzotti, L. (1997). «La cupola per St. John the Divine di Rafael Guastavino». En *Lo specchio del cielo*, editado por Claudia Conforti. Roma: Electa, pp. 277-291. (Traducción castellana en Huerta 2001a).
- Zarghamee, Mehdi S. y Heger, Frank J. (1983). "Buckling of Thin Concrete Domes." *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, Vol. 80, nº 6, pp. 487-500.