

Anteproyecto de Restauración Interior de la cúpula de la Basílica de Loyola: aspectos estructurales

(Draft project of the Interior Restoration of the dome of the
Basilica of Loyola: structural aspects)

Casas López-Amor, Luis
Diputación Foral de Gipuzkoa
Servicio de Arquitectura
Pl. de Gipuzkoa, 1
20004 Donostia

BIBLID [1137-4403 (2000), 19; 227-234]

En la comunicación se describen los problemas estructurales que ha padecido la cúpula de la Basílica de Loyola desde su construcción y se analiza el origen de los mismos, en relación con los criterios empíricos de diseño utilizados en la época y con la teoría moderna de estructuras.

Palabras Clave: Barroco. Basílica de Loyola. Anteproyecto de Restauración. Cúpula. Diputación Foral de Gipuzkoa. Aspectos estructurales.

Loiolako Basilikako kupulak eraiki zenetik jasan dituen egitura-arazoak deskribatzen dira komunikazio honetan, eta horien sorburua aztertzen da garai hartan erabilitako irizpide enpirikoen arabera eta egituren teoria modernoa erabiliz.

Giltz-Hitzak: Barrokoa. Loiolako Basilika. Zahaberritzeko aurreproiektua. Kupula. Gipuzkoako Foru Aldundia. Egitura-alderdiak.

Dans le communiqué on décrit les problèmes de structure dont a souffert la coupole de la Basilique de Loyola depuis sa construction, et l'on analyse leur origine, en relation avec les critères empiriques de dessin utilisés à l'époque, et avec la théorie moderne de structures.

Mots Clés: Baroque. Basilique de Loyola. Avant-projet de Restauration. Coupole. Diputación Foral de Gipuzkoa. Aspectos estructurales.

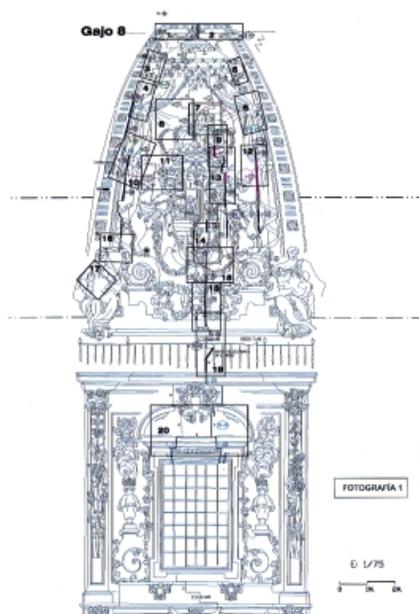
La cúpula de la Basílica de Loidi ha presentado, desde poco después de su construcción, un agrietamiento importante y bien documentado; ya en consulta tenida el 18 de Mayo de 1735, propuso el Padre Rector "como el Maestro de la Obra avia reparado que la media naranja de la Iglesia avia hecho algún vicio, y que para evitar algún otro mayor daño, era de parecer el Maestro se le echasen a la media naranja dos Arcos de Yerro, que ambos abrazasen toda la media naranja, y que con esto se evitaría que pasase adelante el daño; los consultores fueron del sentir que se ejecutase luego lo que el Maestro decía". Para ello se utilizaron 57 quintales de hierro "que pesaron los dos cellos puestos a la media naranja en su anillo por la parte exterior".

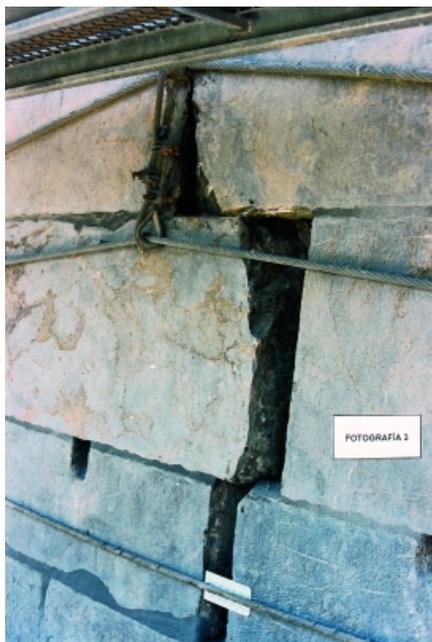
A lo largo de 1842-1844, el capellán de Loidi Fray Francisco de Abásole dirige varios escritos a la Diputación de Guipúzcoa, haciendo referencia a las filtraciones de agua por las grietas de la media naranja, y a la necesidad de taparlas con betún, como se hacía con cierta periodicidad. Ante las peticiones de Fray Francisco, la Diputación comisiona al diputado en ejercicio D. Valentín de Olano, que con fecha 23 de Octubre de 1844, redacta un informe sobre el estado del edificio Santuario de Loidi, en el que se dice textualmente: "Lo que principalmente llama la atención son dos grietas que tendrán próximamente una pulgada de caída, las cuales corren desde la cornisa en que apoya la media naranja, hasta terminar en la linterna. Corresponden al sitio en que se hallan colocados los dos púlpitos, cayendo por consecuencia la una a la derecha y la otra a la izquierda del altar mayor, y proceden del movimiento que hizo la fábrica cuando tomó su asiento. Constantemente suelen rellenarse con betún y aceite de linaza, cuya operación verifican ciertos labradores próximos al edificio, prácticos en este trabajo". El informe de D. Valentín de Olano tiene un interés ingenieril evidente, por que cuantifica el espesor de las grietas mayores un siglo después de la terminación de la cúpula.

De nuevo en 1884, en escrito interno de la comunidad, se dice "Algunos hermanos están tapando las hendiduras de la cúpula por fuera ...".

En las fotografías 1 y 2 pueden verse grietas existentes en la actualidad en ambas cáscaras de la cúpula, y en la fotografía 3, un levantamiento de las grietas en uno de los gajos (el más afectado) de la cáscara interior. Las grietas alcanzan espesores importantes, superiores incluso a seis centímetros, lo que pone de manifiesto la progresión de las lesiones.

En 1990, por encargo de la Diputación de Guipúzcoa, el Profesor italiano Giorgio Croci, figura prestigiosa de la especialidad, emprende el estudio de la situación estructural de la cúpula. Tras una detallada toma de datos de la geometría, materiales y lesiones de la cúpula y después de un periodo de auscultación y de la realización de los cálculos estructurales necesarios, el Profesor Croci concluyó que las grietas no se habían estabilizado y que la seguridad estructural de la cúpula era precaria, por lo que se consideraba necesario su refuerzo inmediato.





Primeramente, y con carácter de urgencia, se realizó en 1991 un refuerzo provisional, para posteriormente realizarse el definitivo en 1993, al tiempo que se procedía a la limpieza y aplicación de tratamientos protectores de la superficie exterior de la cúpula.

El refuerzo definitivo consistió en la colocación de un anillo circular de acero inoxidable en la base exterior de la cúpula, y de un haz de cables perimetrales, también de acero inoxidable.

Tras esta introducción histórica, trataremos a continuación de los aspectos estructurales de la cúpula.

Geoméricamente, la cúpula de la Basílica de Loiola consiste en una doble cáscara de piedra aproximadamente semiesférica, cuyo diámetro interior es de 21 metros y el exterior de 24 m., con un óculo en la clave de 6,5 m. de diámetro, sobre cuyo contorno apoya una pesada linterna. Ambas cáscaras se unen en la base de la cúpula, y en el anillo sobre el que arranca la linterna.

La cáscara exterior es de piedra caliza, de 0,60 m. de espesor, y la interior de arenisca, de 0,40 m.

La cúpula nace en un tambor cilíndrico, todo él de piedra caliza, cuya altura sobre los arcos de la girola de la iglesia es de 13 m. y cuyo grosor medio está alrededor de dos metros.

De los ensayos realizados sobre muestras de ambas piedras, se concluye que sus resistencias a compresión son del orden de 1.000 Kg/cm² (caliza) y 500 Kg/cm² (arenisca), (un hormigón de buena calidad, de los que se utilizan actualmente, soporta unos 250 Kg/cm²).

El módulo de elasticidad de la caliza es mucho mayor que el de la arenisca (del orden de ocho veces). Esto quiere decir que al colocar el mismo peso sobre dos muestras iguales de ambas, la caliza se deforma ocho veces menos que la arenisca. Este dato es importante, ya que implica que el elemento verdaderamente resistente es la cáscara exterior (más o menos ocurre como cuando dos personas de diferente fortaleza llevan un peso entre ambas: la mayor parte la lleva la más fuerte).

Desde un punto de vista estructural, existe en la naturaleza una, llamémosla construcción, similar a la Cúpula de Loiola: un huevo de gallina. En efecto, en ambos casos se trata de superficies de doble curvatura, que tienen que soportar cargas. Aparte de que en un caso (Loiola), la superficie es abierta y esférica, mientras que en el otro (huevo), es cerrada y ovooidal, existen otras diferencias estructurales, que se irán poniendo de manifiesto al profundizar en su comportamiento resistente.

Consideremos que la cúpula sólo soporta su peso propio (situación mucho mejor para Loiola que para el huevo), y aislemos un trozo comprendido entre dos meridianos y dos paralelos (los que limitan un sillar, por ejemplo, fig. 4).

El sillar está sometido a dos fuerzas, una según el meridiano, y otra según el paralelo; según la moderna teoría de estructuras, para una cúpula semiesférica abierta, la fuerza que sigue el meridiano (M) es de compresión siempre, mientras que la que sigue el paralelo (P), es de tracción en todos aquellos puntos que se sitúan por debajo del punto A. Es decir, por

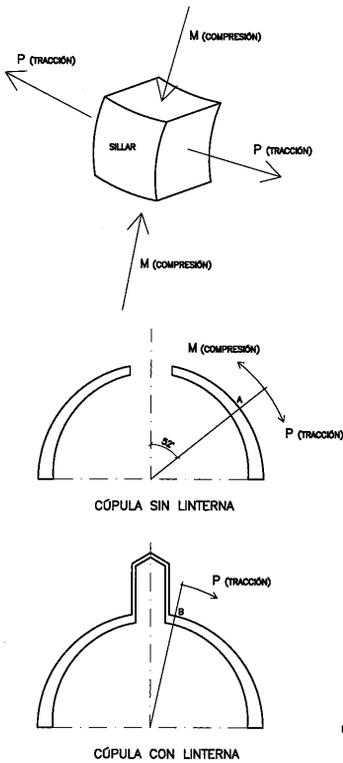


FIGURA 4

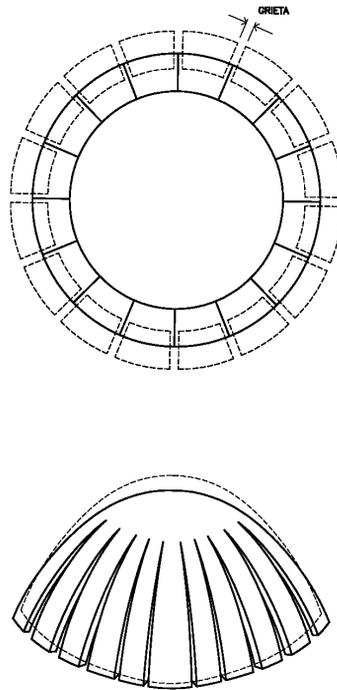


FIGURA 5A

FIGURA 5B

debajo de este punto, los sillares situados en el mismo paralelo tienden a separarse, para lo que es necesario que se muevan hacia afuera, produciéndose en teoría una grieta (figura 5A) entre cada dos sillares adyacentes. En la práctica, las grietas son menos numerosas, pero más gruesas.

La situación empeora notablemente si se considera el peso de la linterna. Para el caso de Loyola, la teoría nos dice que el peso de aquella hace subir el punto A hasta un punto B situado prácticamente junto a su arranque. El resultado final es que la cúpula se agrieta de la forma indicada en la figura 5B, y que las grietas son de mayor dimensión que si la linterna fuera más moderada.

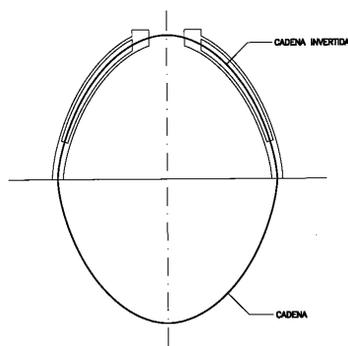
De nuevo, la cúpula sale malparada estructuralmente frente al huevo: la cáscara de éste es una masa continua, que le permite soportar tracciones, cosa que no pueden hacer las juntas entre sillares. Este agrietamiento no ocurriría si los sillares de un mismo paralelo estuvieran sujetos todos entre sí, o bien, si se hubiera dispuesto un anillo exterior (como una duela de barril) suficientemente fuerte. La necesidad de colocar cadenas o zunchos anulares de hierro era bien conocida, y de hecho Domenico Fontana y Della Porta las colocaron en la cúpula del Vaticano, a finales del siglo XVI; también la colocación de grapas de unión de sillares se realizó con frecuencia. En la cúpula de la Clerecía de San Marcos de Salamanca, en 1667, también se colocaron seis tirantes, ya que se habían apreciado grietas importantes. Más tarde volveremos a hablar de ella.

En la cúpula de Loyola no se han hallado restos de los dos anillos exteriores que se colocaron en 1735, y ni siquiera se han encontrado huellas de su colocación en la piedra. Las endoscopias realizadas por el Profesor Croci hicieron posible la detección de restos de trozos de hierro en la cámara entre las dos hojas de la cúpula, que quizá fueran elementos de atado de los sillares. Incluso aunque se hubieran colocado, es muy posible que la corrosión los hubiera roto.

La aparición de las grietas descritas, a pesar de su alarmante espesor, no significa por sí sola que la cúpula esté próxima al colapso. Aún cabe progresar en el análisis, y estudiar la resistencia de la cúpula, suponiendo que está dividida en una serie de gajos independientes (figura 5B), como ocurre tras el agrietamiento.

Un estudio de este tipo fue realizado, para la cúpula del Vaticano, por Poleni, en una brillantísima memoria fechada en 1748. La cúpula del Vaticano presentaba un grave agrietamiento, similar al de Loyola, de forma que estaba prácticamente dividida en gajos; ello a pesar de tener en su interior varias cadenas.

Poleni demostró que la cúpula era estable, aún sin cadenas; para ello, la asimiló a una serie de arcos, cuyo análisis teórico ya había alcanzado algún nivel (el de las cúpulas no existía en aquella época). El estudio consistía básicamente, en equiparar el arco a una cadena colgada (figura 6). Si al invertir la cadena, queda dentro de la masa del arco, este es estable. Poleni supuso también que la asimilación de la cúpula al arco está del lado de la seguridad.



GRÁFICA DE POLENI (1748)

FIGURA 6

Las conclusiones de Poleni eran correctas: el desarrollo posterior de la teoría de estructuras permite afirmar que una cúpula semiesférica, incluso con grietas radiales importantes y sin cadenas, es estable siempre que la relación entre su espesor y su radio sea superior a 0,042 aproximadamente; en el Vaticano esta relación es 0,06, lo que garantiza su estabilidad. Además, la cúpula del Vaticano no es semiesférica, si no algo apuntada, lo que mejora su estabilidad.

Para la cáscara exterior de Loiola, con un espesor de 0,60 m. y un radio medio de unos 11,50 m., la relación citada es superior a 0,05, por lo que, sin la existencia de los factores que más adelante se detallan, no debería tener problemas de estabilidad.

Hay que hacer notar que, a pesar de su macizo aspecto, la cáscara exterior de la cúpula de Loiola es, en proporción, solo cinco veces más gruesa que la cáscara de un huevo.

Llegado este punto, hay que profundizar en el diseño y la construcción de la cúpula, para explicar lo sucedido.

Según la documentación existente, el proyecto fue encargado por el General de la Compañía de Jesús Pablo de Oliva, al arquitecto e ingeniero italiano Carlo Fontana. Éste publicó en 1694 un monumental trabajo dedicado a la cúpula de San Pedro del Vaticano, en el que proporciona una serie de reglas geométricas para el trazado de cúpulas, así como para la colocación de cadenas de hierro en su parte inferior. También establece que el grosor del tambor debe ser del orden de la décima parte del diámetro interior de la cúpula y proclama su preferencia por las cúpulas de doble cáscara, que permiten independizar las formas perceptibles desde el interior y el exterior. En resumen, se podría decir que el proyecto se encargó a un especialista en cúpulas.

En la figura 7 se ha representado una sección en línea llena de la cúpula de Loiola, y otra, en línea de trazos, de una cúpula teórica con las dimensiones que resultan de aplicar las reglas de Fontana (referidas a una cúpula simple, ya que en la práctica, la cáscara exterior es la resistente).

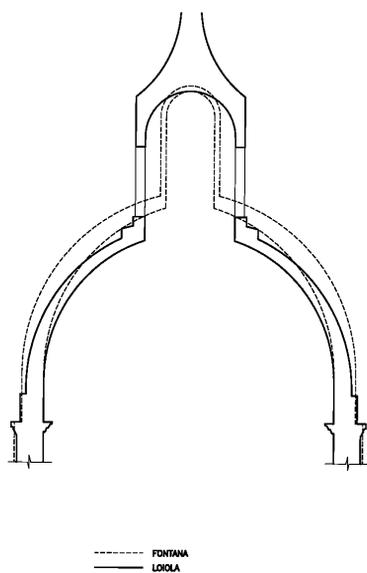


FIGURA 7

Existe una buena coincidencia en lo concerniente al grosor del tambor (dos metros), pero puede verse que la cúpula de Fontana es más apuntada, y el diámetro de su óculo es del orden de la mitad que el de Loiola. Consecuentemente, el tamaño de la linterna de Loiola es desmesuradamente grande con relación a la cúpula, aunque resulte proporcionado al óculo.

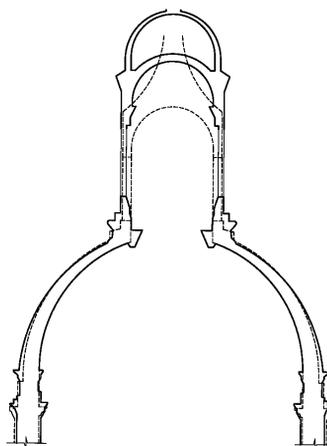
Este mayor tamaño del óculo se explicaría quizá por una mayor necesidad de luz natural en Loiola, dadas las diferencias climáticas. Es sabido que Fontana nunca vino a Loiola, y que no prestaba en sus proyectos un excesivo interés a los condicionantes de diseño derivados del emplazamiento de la obra.

La teoría de estructuras confirma la estabilidad de cualquier cúpula que siga las reglas de Fontana. Las dos decisiones de variar la sección transversal, rebajándola, y de aumentar la dimensión de la linterna en tal proporción, fue-

ron nefastas desde el punto de vista estructural, y sin duda, están en el origen de las lesiones que se han producido.

Tampoco se sabe si realmente se colocaron cadenas de acuerdo con los escritos de Fontana, y menos si éstas figuraban en los planos.

La cuestión que se plantea es saber quienes fueron los autores del diseño de la cúpula que realmente se construyó. Parece claro que los maestros locales mantuvieron la doble cáscara de Fontana, que tenía la ventaja de permitir el uso de una piedra más blanda en la interior, tan profusamente decorada. A partir de ahí, la cúpula de Loiola se separa de las reglas de Fontana, y presenta una mucha mayor similitud con la ya citada de la Clerecía de San Marcos de Salamanca. Aunque ésta es menor (13,40 m. de diámetro interior), presenta unas dimensiones proporcionales a las de Loiola (figura 8), con un óculo y linterna también exagerados. Pero profundizar en las semejanzas, e inferir una intervención de Joaquín de Churriguera, es asunto de historiadores. Como ingeniero, me limito a resaltar la similitud geométrica, y el indudable ascendente que Churriguera (llamado como consultor por su prestigio) pudo tener sobre los maestros locales.



----- LOIOLA
———— CLERECIA SAN MARCOS (PROPORCIONAL)

FIGURA 8

El refuerzo realizado en 1993 garantiza la estabilidad de la cúpula, sin pretender reducir el espesor de las grietas, lo que hubiera requerido medios excepcionales. Como se ha dicho, el refuerzo se ha realizado en la cáscara exterior, que es la que resiste principalmente las cargas. En la cáscara interior, algunas grietas se entrecruzan y llegan casi a definir un contorno cerrado. Las trayectorias de estas grietas en el interior de la cáscara no se conocen, pero podría darse el caso de que permitieran la caída de la zona situada dentro de dicho contorno. Por ello, se ha recomendado su fijación, dentro de los trabajos de restauración que se prevé realizar.

Mi agradecimiento a los Arquitectos de la Diputación Foral de Guipúzcoa D. Luis Astrain y D. Álvaro Tejada, por su apoyo y colaboración; al Profesor Arquitecto D. Santiago Huerta, cuya tesis sobre el diseño de cúpulas en España entre 1500-1800 ha constituido una ayuda inestimable, y a los Jesuitas de Loiola, cuya hospitalidad me ha hecho querer más a esa tierra, a su Basílica y a su cúpula.

BIBLIOGRAFÍA ESPECIFICA

La Basílica de Loyola. R.M. Hornedo, S.I. Miscelanea de Comillas, 1956.

Loyola. Historia y arquitectura. J.R. Eguillor S.I., H. Hager - R.M. Hornedo, S.I. (Diputación Foral de Guipúzcoa / Editorial Etor 1991).

Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Jacques Heyman (Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1995).

W. Flügge. Handbook of engineering mechanics (McGraw-Hill, 1962); Stresses in shells (Springer, 1961).

- E. Torroja. Razón y ser de los tipos estructurales (Instituto Eduardo Torroja, 1957).
- G. Poleni. Memorie istoriche della gran cupola del Tempio Vaticano (Padua, Nella Stamperia del Seminario, 1748. Edición Española de INTEMAC).
- C. Fontana. Il Tempio Vaticano e sua origine. (Roma: Nella Stamparia di Gio: Francesco Buagni, 1694).
- S. Huerta. Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España Ca.1500-Ca.1800 (Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1990).
- Servicio de patrimonio de la Diputación Foral de Guipúzcoa. Información varia de archivos (1998).
- Estudio de la estabilidad de la cúpula de la clerecencia de San Marcos de Salamanca. José María Izquierdo, INTEMAC, 1988.