LA CUPULA DE SANTA MARIA DEL FIORE

(THE DOME OF SANTA MARIA DEL FIORE)

Mariano Navas, Ingeniero de Caminos

102-2

RESUMEN

La construcción de la Cúpula de Santa María del Fiore suponía resolver los dos problemas siguientes: Por un lado, encontrar una solución en que los empujes horizontales no superaran la capacidad del esbelto cimborrio construido. Por otro, la construcción debía hacerse sin cimbra.

Brunelleschi encontró respuesta para ambos problemas. Combinó arcos verticales al estilo gótico con otros horizontales, constituyendo un auténtico entramado espacial. La experiencia medieval le había puesto de manifiesto que el arco ojival transmite menores empujes horizontales que los de medio punto. La solución de la construcción sin cimbra la encontró reflexionando sobre las cúpulas romanas y, en particular, sobre el Panteón.

SUMMARY

The construction of the dome of Santa María del Fiore involved solving the following two problems: first of all, to find a solution in which the horizontal thrusts did not exceed the capacity of the thin edge of the dome constructed. Secondly, the construction had to be carried out without centring.

Brunelleschi found an answer to both problems. He combined vertical Gothic style arches with horizontal ones, thus creating a veritable network of arches. The experience of the Middle Ages had made it clear to him that ogival arches transmit less horizontal thrusts than do half arches. He found the solution for the construction without centring by studying Roman domes and in particular the Pantheon.

I. Principios Constructivos

El primer proyecto de la Catedral de Florencia fue redactado a finales del siglo XIII por Arnolfo di Cambio, quien recibió el encargo de realizar la obra «con aquella más alta y suntuosa magnificencia que inventar se pueda». La nueva Catedral se había de emplazar en donde estaba situada la Iglesia de Reparata junto al Baptisterio.

Posteriormente el proyecto original, que parece ser preveía una ancha nave central con un crucero octogonal abierto a tres cuerpos laterales, fue ampliado por Francesco Talenti, a quien se encomendó la tarea de superar con creces las dimensiones de la catedrales de Pisa, Lucca y Siena. En la figura 1, se recoge las plantas de Arnolfo y Talenti según Paafz. En la figura 2, se reproduce una posible reconstrucción del modelo de Arnolfo (1937). La figura 3, reproduce la planta de la catedral de Florencia y la de la antigua Iglesia de la Reparata, según Rich (1969).

La idea de cubrir el crucero con una cúpula, parece ser figuraba en el proyecto inicial de Arnolfo y luego en la ampliación de Talenti. Así por ejemplo, en los frescos de Andrea de Florencia en la capilla de Santa María Novella, aparece la catedral con cúpula pero sin cimborrio, lo que prueba que ya en 1367 se creía posible esta solución.

Entre 1410 y 1413, fue levantado por Juan de Lapo Ghini un tambor o cimborrio sobre la abertura del octógono, de forma que la altura total desde el suelo a lo que habría de ser el arranque de la cúpula, alcanzaba los 54 m.

Este cimborrio complicaba aún más el problema, puesto que al ser de espesor reducido, los empujes laterales que podrían resistir y que le transmitiría la cúpula, habrían de ser mucho menores.

La idea de construir este tambor debió estar motivada en parte por la necesidad de ganar tiempo hasta encontrar una solución al problema de la construcción de la cúpula, el cual venía a agravarse ahora con dicha construcción.

Aunque Filippo Brunelleschi había tenido contactos ya con el problema en 1404, es en 1417 cuando empieza a trabajar por encargo de la Opera en la elaboración y redacción de los primeros diseños. Por dichos trabajos recibió la cantidad de 10 florines.

Posiblemente por sugerencia de Filippo, el 19 de agosto de 1418 la Opera convoca un concurso de ideas para la construcción de la cúpula.

Filippo presentó una propuesta que introducía dos innovaciones: la supresión de la cimbra y unas

Fig. 1.—Plantas de la Catedral de Florencia de Arnaldo y Talenti según Paatz.

nuevas ideas en el aparejo de la mampostería. La idea de construir la cúpula sin cimbra, era una novedad absolutamente revolucionaria que centró sobre él todas las atenciones.

A últimos de 1418, finalizaron los trabajos de construcción de la maqueta de Filippo. La obra fue ejecutada por cuatro albañiles de la Opera. La linterna que iba a estar situada en la coronación de la cúpula y la galería entre la cúpula y el tambor, parece que fueron esculpidas en madera por Filippo personalmente. No se conservan, desgraciadamente, ningún resto de la maqueta ni tan siquiera el cuadro que sobre la misma hiciera Stefano del Nero.

Aunque sus dimensiones no nos son conocidas con exactitud, si se pueden estimar en base a los datos que sobre la construcción de la cúpula se poseen. Los albañiles usaron 49 caballos de carga para transportar la cal viva precisa para la confección del cemento necesario en el modelo y para un muro que cerraba el jardín de un funcionario

Fig. 2.—Reconstrucción del modelo de Arnolfo.

1.—Antigua catedral de la Reparata (aprox. 600). 2.—Nave central y laterales de la nueva catedral. 3.—Campanile de Giotto. 4.—El gran octógono diseñado por Neri di Fioravante (1366-1367). 5.—Modelo de Neri. 6.—Estridos del octógono construidos por Ghini (1367-1400). 7.—Tribunas y tambor (1400-1420). 8.—Modelo de Brunelleschi (1418-1420). 9.—Cúpula de Brunelleschi (1421-1432). 10.—Exedros de Brunelleschi. 11.—Linternón de Brunelleschi. 12.—Galería propuesta por Brunelleschi.

Fig. 3.—Planta de la Catedral de Florencia y de la antigua Iglesia de la Reparata, según Rich.

de la Opera. La cantidad de madera empleada en la elaboración de las ventanas circulares es conocida. Así pues, con esta serie de datos, se ha estimado que el modelo debió de tener un diámetro interior del orden de 11-12 pies, esto es, un modelo de escala aproximada 1:12.

Al finalizar los últimos detalles de la maqueta, la Opera eligió los superintendentes para la construcción de la cúpula. Fueron elegidos Filippo Brunelleschi, Lorenzo Ghiberti y Antonio di Battista.

Inmediatamente después de producirse estos nombramientos, Filippo envió a la Opera un documento en donde se hacía una minuciosa y exhaustiva descripción de la cúpula. Dicho documento, modelo de concisión y claridad, se conoce con el nombre de «modellum».

Durante la construcción, Filippo completó dichos documentos con otros que recogen las modificaciones introducidas. La versión del citado docu-

mento dada por Vasari no parece muy fidedigna, en opinión de los expertos que prefieren la narración de Manetti.

En dichas especificaciones Filippo no consideró preciso mencionar el diámetro de la cúpula, lo cual, por otro lado, quedaba fijado por el diámetro del octógono.

En los tres puntos siguientes describe las dos láminas de la cúpula:

- La lámina interior está construida en 5 partes desde las esquinas. Su espesor en la base es de 7 pies. En la parte superior, a la altura del óculo de coronación, su espesor es de 5 pies.
- La lámina exterior está construida sobre la anterior para preservarla de los agentes atmosféricos y darle un aspecto de mayor magnificencia y una forma más impresionante. Tiene un espesor de 2 1/2 pies en los arranques, reduciéndose hasta llegar al óculo de coronación, en donde tiene un espesor de 1 1/4 pies.
- El espacio entre las dos cúpulas mide 4 pies en la base. En dicho espacio se alojan las escaleras de acceso a todas las zonas entre las dos láminas.

En los cinco puntos que siguen Filippo establece los materiales a usar y el sistema de «armado» de la cúpula:

- Hay 24 nervios, 8 en las esquinas y 16 en los lados. Cada nervio de esquina tiene un espesor en base de 14 pies en la cara exterior. Entre esquinas hay 2 nervios por lado, cada uno de 8 pies de espesor en la base. Los nervios que unen las dos cúpulas convergen hacia el óculo.
- Los 24 nervios, así como las citadas láminas, están circundados por seis cercos de bloques de piedra arenisca (posteriormente se añadió otro cerco más en la proximidad o la zona de arranques). Dichos bloques, de mayor longitud que sección transversal, están unidos por llaves de hierro recubiertas de estaño.
- El primer y segundo cerco tiene 4 pies de altura, tercero y cuarto 2 2/3 y el quinto y sexto 2 pies de altura.
- Cada 23 pies de altura, aproximadamente, se disponen unos elementos en forma de «bóvedas de cañón» desde un nervio de esquina hasta el nervio adyacente. Debajo se colocan vigas de madera de roble y cadenas de hierro que atan todos los nervios.
- Los nervios están contruidos con arenisca gris y las dos láminas son de arenisca por

I.—Anillo de atado en piedra en uno de los niveles superiores. (Ver IV)
 II.—Anillo de atado en madera. (Ver V)
 III.—Anillo de atado en piedra en el umbral de la cúpula. (Ver VI).

Elementos visibles:

1.—Extremo de las vigas radiales de piedra. 2-3.—Extremos de las barras de atado de hierro. 4.—Atado de madera. 5.—Barras de atado de hierro uniendo el anillo de atado en madera a la fábrica. 6.—Barras de conexión de las barras de atado de acero con tacos para acuarlas. 7-8.—Elementos de unión de los tramos del anillo de atado de madera.

Elementos no visibles y, por tanto, supuestos:

9.—Tirante interior de piedra. 10-13.—Tirantes de piedra. 14.—Grapas de hierro entre las piedras que forman los tirantes. 15.—Barras de atado de hierro. 16.—Barras de atado de hierro con ganchos exteriores. 17.—Barras de atado de hierro con anclajes interiores.

Fig. 4.—Sistema de atado de la cúpula de Brunelleschi según dibujo de Rich (1969).

encima de la altura de 46 pies. Por encima se emplearán ladrillos o piedras porosas.

Este sistema de nervios según los meridianos y vigas de atado perimetrales según los paralelos se complementa con un sistema de barras de hierro que unen y solidarizan todo el conjunto.

Mediante grapas y eslabones se consigue unir las distintas piezas de piedra que forman las cadenas

de atado y con platabandas y bulones se empalman los tramos de las cadenas de madera.

En el dibujo de Rich (1969) se reproduce este complicado mecanismo de atado.

Así pues, el esquema estructural que utilizó Filippo se basa en una serie de nervios verticales interconectados por varios tipos de elementos horizontales: anillos de atado de piedra, madera, hierro, así como los elementos en forma de «bóvedas de cañón» atando los nervios de esquina con los adyacentes.

Gran parte de los elementos de atado quedan embebidos en la mampostería y por consiguiente ocultos; sin embargo, los elementos que se pueden ver, permiten afirmar que en general la estructura cumple con las instrucciones dadas por Filippo en sus especificaciones.

Los elementos que plantean controversias son esos elementos en forma de bóvedas de cañón a que hemos hecho referencia. Entre los nervios interiores no aparecen dichos elementos, tal como muestra el plano de Nelli (figura 5) y en contra de la axonométrica de Sanpaolesi (figura 6).

Desde el punto de vista estático estos elementos sirven para rigidizar la zona de las esquinas, sin embargo en las especificaciones de 1420 no se habla para nada de dicha función.

Las especificaciones preveían además una galería entre la cúpula y el cimborrio y un sistema de gárgolas de desagüe:

- Habrá un pasadizo por encima de las ocho ventanas redondas, soportadas por voladizos, con parapetos aligerados y de cerca de cuatro pies de altura. Realmente serán dos pasadizos, uno encima de otro, encima de una cornisa ornamentada. El pasadizo superior será abierto.
- El agua caída en la cúpula, se concentrará en un canalón de mármol de 2/5 pies de anchura que descargará el agua por mediación de gárgolas de desagüe de arenisca debajo del canalón.
- Se dispondrán ocho caballetes de mármol en las esquinas en la superficie de la lámina exterior. Serán tan anchos como se indique y se levantarán dos pies por encima de la cúpula.

Por lo que respecta a la ejecución proponía:

1-VIII: Los ocho lados de la cúpula. Algunos de los lados se han suprimido para montar la estructura interior. 9, 10.—Láminas interior y exterior. 11.—Nervios de esquina. 12, 13.—Nervios intermedios. 14, 16.—Anillos en piedra al nivel de arranques; 17, 18.—De nivel intermedio; 19, 20.—A la altura de coronación. 21.—Atado de madera. 22.—Elementos en forma de «bóveda de cañón». 23.—Anillo de clave. 24.—Caballote.

Fig. 5.—Estructura de la cúpula de la Catedral de Florencia dibujado por Rich.

Fig. 6.—Estructura de la cúpula de la Catedral de Florencia según Sanpaolesi.

- Háganse los muros de la cúpula como queda dicho sin apeos, hasta treinta brazos (18 m aproximadamente) y de allí hacia arriba como aconsejen los maestros que los han de construir ya que la práctica enseñará cuál ha de emplearse.

Por tanto, se trata de unos arcos apuntados de más de 30 metros de altura, con un radio algo menor de 21 metros. La forma apuntada no es la que le resultaba más atractiva a Filippo el cual en un principio, por influencia del Panteón, pensaba en la forma semiesférica. Si se vió obligado a adoptar una forma apuntada, fue posiblemente por la influencia gótica, cuyos ingenieros habían ya demostrado que los empujes que transmiten los arcos apuntados son menores que los de medio punto.

Las citadas especificaciones estaban firmadas por Filippo Brunelleschi, Lorenzo Ghiberti y Antonio di Battista; sin embargo, resulta probable que el verdadero y único autor de las mismas sea Filippo.

A finales de 1420, fueron aprobados definitivamente el modelo y las especificaciones.

Filippo se dedicó activamente a los trabajos de construcción de la cúpula. El supervisó personalmente el trabajo de los canteros, carpinteros, albañiles, diseñó la maquinaria de transporte y elevación, contrató el personal necesario, etc.

Por decisión de la Opera se vio obligado a compartir la dirección de obra con Lorenzo Ghiberti, lo cual debió ser una contrariedad puesto que las relaciones entre ambos distaban mucho de ser cordiales.

Las tensiones entre Filippo y Lorenzo llegaron a su punto culminante cuando la obra alcanzó el nivel de 58 pies aproximadamente. La causa inmediata del choque fue la colocación de un número mayor de lucernarios. Los partidarios de Lorenzo, proponían se dejaran abiertos 24 espacios entre nervios para la colocación de ventanas. Filippo se negó argumentando razones de seguridad, rigidez y estabilidad de la estructura.

Las polémicas alcanzaron gran virulencia en invierno de 1425-1426, momento en que era preciso tomar una decisión firme ya que se había alcanzado el nivel correspondiente. La Opera se vio obligada a tomar partido y pidió a Lorenzo que dimitiese por algunos meses, pasados los cuales fue restituido en su cargo pero limitando sensiblemente sus atribuciones y responsabilidades.

Durante la construcción hubo momentos muy difíciles, no sólo de orden técnico o por falta de entendimiento entre los directores de obra, sino también laborales. Vasari narra una huelga surgida al verse los trabajadores excesivamente apremia-

dos por Filippo sin ninguna compensación económica. Interrumpieron la obra de acuerdo con los capataces en demanda de mejoras salariales, alegando que si bien sus remuneraciones eran más elevadas de las usuales, el trabajo entrañaba más peligro. Filippo resolvió la cuestión en forma autoritaria despidiendo a todos los trabajadores y llevando a diez lombardos a la obra a los que él mismo instruyó en la técnica de colocación de la mampostería. Los trabajadores solicitaron su reintegro en la obra a lo que accedió Brunelleschi pasado algún tiempo, pero con salario inferior al que tenían al principio.

La cúpula fue acabada en 1436 y el concurso para la construcción del Linternón fue ganado obviamente por Brunelleschi.

Filippo estuvo dedicado durante dieciséis años a la construcción de la cúpula, trabajo que compaginó con la construcción de otras obras, en las que fue definiendo y confirmando su personal visión de la creación arquitectónica.

II. Sus posibles influencias

En su biografía se narra el viaje que hizo Brunelleschi a Roma en compañía de Donatello. Aunque no está absolutamente confirmado este extremo, parece ser que Filippo se unió al grupo formado por Donatello y su padre Nicolo di Betta Bardi, que habían recibido el encargo de realizar algunas esculturas para el Duomo. Filippo hizo una pequeña escultura en piedra recubierta de plomo dorado, que debería servir de modelo de las esculturas de los contrafuertes. Recibió por ello un anticipo de 10 florines y como narra Vasari «... obsesionado una mañana con la idea de ir a Roma, fue allí creyendo que adquiriría una mayor reputación y prestigio».

En Roma debió entrar en contacto con las grandes obras clásicas. Debió estudiar exhaustivamente el Panteón cuya cúpula de 43 m de diámetro y óculo de 8 m serían en un principio su principal fuente de inspiración en el diseño de la cúpula del Duomo.

Debió comprender que el Panteón fue construido sin cimbras, a base de disponer hiladas horizontales y concéntricas de argamasa, esperando para colocar la siguiente a que la anterior hubiese endurecido. Este esquema constructivo debía ser incomprensible para los constructores de la época, familiarizados con la idea de clave como punto de encuentro de elementos que convergen y que encuentran en ella su estabilidad de forma.

Debió, asimismo, estudiar edificios menores de Roma, como por ejemplo, el Templo de Minerva Médica.

Sin embargo, la cúpula del Duomo no responde completamente a la idea de obra del Renacimiento, por cuanto su materialización sólo fue posible por la influencia gótica.

La idea de aligerar los contrafuertes, era ya una clara tendencia que se había puesto de manifiesto con el paso del románico al gótico. La idea de aligeramiento seguía siendo una obsesión constante para la que Filippo Brunelleschi encontró respuesta al combinar los nervios verticales que formaban arcos peraltados, con los nervios o cerros horizontales de atado que deberían absorber las tracciones.

Filippo se encontró con que debía resolver dos problemas fundamentales. Por un lado encontrar una solución en la que los empujes horizontales no excedieran la capacidad del esbelto cimborrio que habían construido. El sabía muy bien, gracias a la experiencia adquirida por los Ingenieros del gótico, que el arco ojival transmite menores empujes horizontales que el arco de medio punto. Así pues, combinó los nervios verticales al estilo gótico con otros horizontales formando un auténtico entramado. Por otro lado su cúpula se debería construir sin cimbras. No era posible encontrar suficientes vigas de madera de la longitud necesaria como para confeccionar una cimbra tan compleja y, además, los métodos de unión entre piezas de madera al uso (bulonado, rayo de Júpiter, etcétera) no resultaban de suficiente garantía.

La respuesta a esta cuestión debió encontrarla al estudiar cuidadosamente las cúpulas romanas y en particular el Panteón.

Brunelleschi hizo estudios sobre posibles andamios a utilizar en la construcción de cúpulas sin cimbras, como demuestra su dibujo de una cúpula de perfil romana en que aparece el esquema de un andamio.

Es claro que la resolución de este doble problema demuestra el gran ingenio e intuición de su autor.

Posiblemente, inspirándose en sus estudios de ruinas romanas y/o costumbres medievales, Brunelleschi introduce en todas sus cúpulas la idea del aparejo a «espinapez». Realmente no es sencillo justificar dicha disposición, aunque él lo introduce absolutamente convencido de sus ventajas. Dicho aparejo llegó a generalizarse por toda la Toscana hasta bien entrado el siglo XVI.

Por último, habría que insistir en que no parece del todo correcto hablar de la obra de Brunelleschi como típica del Renacimiento. Los procedimientos no responden a los de la tecnología antigua, sino, por el contrario, a los medievales, enriquecidos por su gran talento e intuición. En palabras de Benévolo «la cúpula se sitúa entre el pasado y el porvenir como un símbolo de una ciudad ornamentada más que ninguna otra».

☆ ☆ ☆

publicación del i.e.t.c.c.

ACUEDUCTOS ROMANOS EN ESPAÑA

Carlos Fernández Casado

Prof. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Esta publicación se compone de una serie de artículos, publicados en la Revista «Informes de la Construcción», en los cuales se hace un análisis de los acueductos romanos que existen en España y el balance de las condiciones de conservación en que se encuentra cada uno de ellos, incluyendo referencias históricas y literarias. Se ha ilustrado con la reproducción de la valiosa documentación gráfica que posee el prestigioso autor.

Un volumen encuadernado en couché, a dos colores, de 21 x 27 centímetros, compuesto de 238 páginas, numerosos grabados, dibujos, fotos en blanco y negro y figuras de línea.

Precio: España, 900 ptas., 13 \$ USA.