

Diseño y construcción de la bóveda de media naranja de ladrillo a finales del S. XVIII: Real Fábrica de Cristales de la Granja (Segovia)

Belén Morchón Hernández

Los tratados de arquitectura y los antiguos manuales de construcción, sirven como vía de análisis y comprensión de la arquitectura construida. En ellos, de forma más o menos intuitiva, los maestros transmitieron los conocimientos adquiridos a través de su propia experiencia, de la observación de otros edificios construidos y del estudio de los tratados anteriores, constituyendo a su vez la principal base de conocimiento para la ejecución de bóvedas en épocas posteriores.

Una primera aproximación al estudio de las bóvedas de media naranja de ladrillo pone en evidencia la progresiva pérdida de la tradición constructiva de este elemento desde comienzos del s. XX., debido a la utilización de nuevos materiales y sistemas constructivos y estructurales. Esto ha provocado la casi total desaparición de las técnicas de construcción y diseño que se emplearon durante siglos en la ejecución de bóvedas, sin embargo muchos edificios se han conservado hasta hoy, esto constituye una prueba indiscutible de la calidad y solidez de los métodos empleados.

La hipótesis inicial de la que parte este trabajo es que la geometría y proporciones de la bóveda oeste de la Nave de Hornos de la Real Fábrica de Cristales de Segovia, responden a alguna de las trazas geométricas definidas en los tratados de arquitectura anteriores al s. XIX. No se trata de analizar la bóveda con los conocimientos y herramientas del cálculo estructural actual, sino descubrir a través de la geometría real las claves del diseño, dimensión y construcción que manejaban los antiguos maestros de obra.

Por otro lado, en la actualidad la combinación de los métodos topográficos de toma de datos unidos al modelado 3D y a la modificación de la imagen digital, permiten la obtención de modelos virtuales que representan de forma exacta y precisa la arquitectura construida de modo que puedan ser analizados, manipulados y en general utilizados como un instrumento fundamental para el análisis, documentación y conservación del Patrimonio.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL LEVANTAMIENTO Y ELABORACIÓN DEL MODELO VIRTUAL

El objetivo del levantamiento es determinar la geometría de la bóveda oeste de la Real Fábrica de Cristales de la Granja, Segovia (figura 1), en especial de la linterna, la bóveda y los diferentes elementos que las sustentan, desde las pechinas hasta la base de los pilares, con la suficiente precisión para poder definir con exactitud cada uno de estos elementos y utilizar esta información para la elaboración de un modelo en tres dimensiones.

Se optó por una metodología de topografía clásica con medición sin prisma para medir la bóveda y determinar de modo preciso su forma y dimensiones. La utilización de una estación total Leica TCRM+1203 provista de distanciómetro permitió medir sobre cualquier superficie, sin emplear elementos reflectantes como dianas de puntería o prismas, realizar el levantamiento de la bóveda seleccio-



Figura 1
Bóveda oeste de la Real Fábrica del Cristales de la Granja, Segovia (foto de la autora)

nando los puntos que definen la geometría de la misma y georreferenciar los datos obtenidos; con un coste muy inferior al del escáner 3D.

Observando sobre el terreno el estado de la bóveda y los elementos que la componen: ladrillo, enfoscado y en algunos puntos piedra, se determinó que la precisión del equipo de medida debería estar en torno a 1 cm para una distancia máxima de 25 metros, la altura del punto mas lejano de la bóveda, que corresponde a la linterna.

Como primer paso del levantamiento se establecieron 6 puntos fijos de control materializados con dianas reflectantes adhesivas, tomando posteriormente las coordenadas de dichos puntos con la estación total y estableciendo un sistema de coordenadas local. A continuación, tras establecer el sistema de puntos de control y con coordenadas conocidas se realizaron 5 estacionamientos y se radiaron un número total de 1315 puntos del intradós de la bóveda. Dichos puntos se fueron apuntando en el croquis de campo con su numeración precisa con el fin de poder identificarlos después en el modelo.

Se generó una nube de 1.315 puntos en el espacio tridimensional que fue convertida en un archivo de formato dwg tridimensional que permite su visualización y manipulación con el software de Autodesk AUTOCAD 2012 (figura 2). Estos puntos fueron inicialmente unidos entre ellos para crear una red que permitiera unificarlos y visualizar de forma somera los elementos constructivos. Para ello se siguieron las referencias tomadas en los cro-

quis y las fotografías realizadas con una cámara Canon EOS-20D.

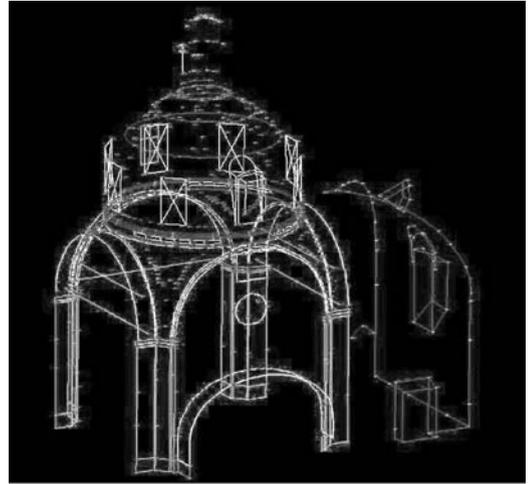


Figura 2
Nube de puntos en el espacio tridimensional (dibujo de la autora 2011)

La nube de puntos fue posteriormente importada al software de Autodesk MAYA, programa informático de modelado y animación 3D. En dicho programa, la nube aparece como rectángulos que indican la posición de cada punto en el espacio 3D a través de sus coordenadas en X, Y, Z. Esto sirvió como referencia

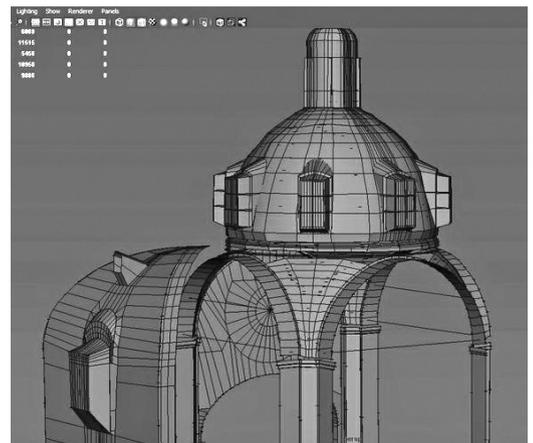


Figura 3
Modelo tridimensional inicial (dibujo de la autora 2012)

para modelar en polígonos el modelo tridimensional. La utilización de mallas permite obtener un modelo muy aproximado a la realidad (figura 3, pero no un conocimiento preciso de la geometría de las diferentes superficies que conforman la bóveda.

El procedimiento fue modelar las formas y superficies de manera simétrica y genérica, para luego adaptar la forma a las irregularidades de la estructura real, adaptando las superficies a los puntos singulares de la nube. Las superficies generadas recogen los puntos de referencia creando el esqueleto del modelo tridimensional (figura 4). Adaptándose en todo momento a los elementos referenciados, lo que nos garantiza la fiabilidad del modelo, cuyo error máximo no supera 1 cm en las coordenadas x, y, z.

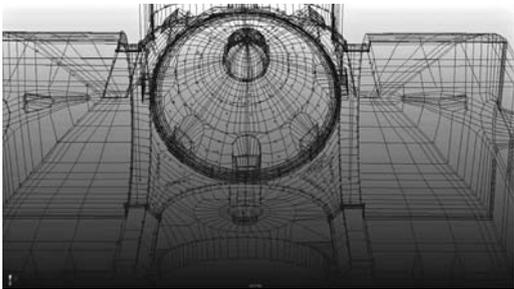
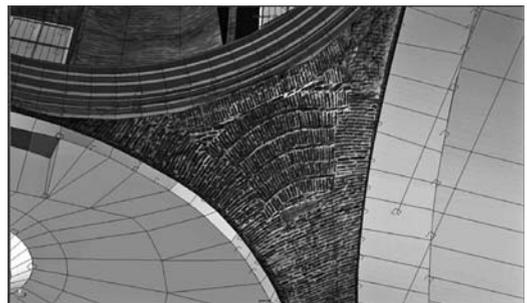
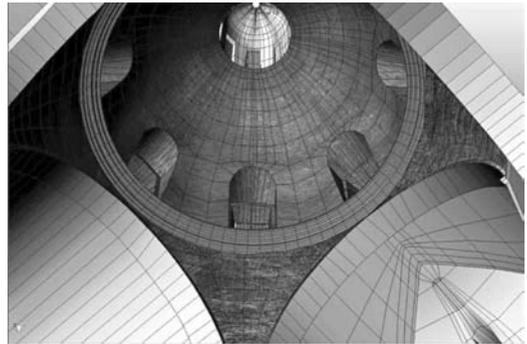


Figura 4
Malla adaptada a la nube de puntos (dibujo de la autora 2012)

Para el estudio del aparejo de ladrillo se procedió a la adaptación de las imágenes digitales obtenidas desde distintos puntos de visualización, utilizando el software Adobe PHOTOSHOP. Para ello se recurrió de nuevo a los 1.315 puntos radiados incluidos en las superficies dibujadas y a los croquis dibujados in situ, lo que permitió encajar perfectamente las imágenes en el modelo creado, dotando al mismo de información sobre color, textura y aparejo del elemento constructivo (figuras 5 y 6).

Esta metodología es especialmente interesante para el caso de elementos constructivos como bóvedas y cúpulas, cuya elevada altura dificulta la toma de datos por medios ordinarios y a su vez constituye un método exacto, fiable y mucho más económico respecto a técnicas de captura masiva como la fotogrametría digital y el láser escáner terrestre, donde el instrumento captura automáticamente la información 3D.



Figuras 5 y 6
Imágenes digitales integradas en el modelo tridimensional (dibujos de la autora 2012)

LA BÓVEDA DE MEDIA NARANJA Y LOS TRATADOS DEL S. XVII-XVIII

Disponemos de escasos datos concretos sobre la concepción y el proceso constructivo de las bóvedas de media naranja de la Real Fábrica: la planta general del edificio firmada por José Díaz Gamones en 1770 y unas líneas escritas por el Aparejador Real en 1774 durante su ejecución: «Empezar la boveda de la nabe grande que cubre la Carquesas o templadores, y haver cerrado las pechinas y arcos torales para el empiezo de una media naranja y continuando en las demás bovedas para su adelantamiento». (Antonio Ruiz Hernando y María Jesús Callejo Delgado. 1988, 46). Sin embargo la geometría y dimensiones de la bóveda estudiada demuestran el gran conocimiento que José Díaz Gamones poseía de la tratadística escrita hasta finales del s. XVIII sobre este tipo de bóvedas y la enorme influencia que la obra de Fray Lorenzo de San Nicolás ejerció en los maestros de obra de la época.

El análisis de la geometría de la bóveda pone de manifiesto que fue diseñada y construida siguiendo las indicaciones descritas con precisión en el tratado de Fray Lorenzo sobre las trazas y construcción de bóvedas de media naranja.

Arte y Uso de la arquitectura (1639 y 1663) fue el tratado de referencia para la construcción de templos en toda España hasta bien entrado el s. XIX. Aunque los dibujos son muy escasos, las descripciones escritas son amplias y detalladas. En él se hace referencia a otros tratadistas anteriores, al análisis de obras construidas y a la propia experiencia constructiva del autor. De este modo, también los tratados posteriores se basan en él para desarrollar las variantes y evolución de los sistemas constructivos que iban avanzando de forma más o menos intuitiva, basándose en la experiencia de los maestros. Este modelo basado en las reglas de proporción empíricas estuvo vigente hasta finales del s XIX.

Los materiales

El 12 de Octubre de 1770 Carlos III encargó a José Díaz Gamones, aparejador del Real Sitio, la construcción de la nueva Real Fábrica de Cristales de La Granja junto a la fuente del Príncipe. En el encargo se incidía en la necesidad de evitar los incendios que acababan de destruir la antigua fábrica. La gran novedad del proyecto de Gamones respecto a las fábricas anteriores fue resolver la cubrición de la nave de hornos mediante bóvedas construidas con fábrica de ladrillo y mortero de cal; anteriormente se habían utilizado armaduras de madera.

La bóveda fue probablemente construida para ser revocada, y este debió ser su estado desde su construcción, sin embargo en la actualidad se encuentra limpia lo que permite apreciar perfectamente su aparejo de excelente calidad. La linterna es el único elemento de la bóveda con revoco a día de hoy.

Se desconoce en qué momento se eliminó el revoco de las cúpulas, ya que este no aparece en ninguna de las fotografías antiguas de la fábrica que se conservan. El arquitecto Ignacio de las Casas, señala en el Proyecto de Obras de Restauración y Conservación de la Real Fábrica de Cristales de la Granja de San Ildefonso: «Los revocos de todas la bóvedas y cúpulas fueron picados, dejando al descubierto las fábricas de ladrillo que si bien ofrecen un aspecto es-

pléndido a nivel constructivo, puede apreciarse que siempre fueron realizados pensando en estar recubiertos. La revocación de la nave la haría recobrar la imagen primitiva». (Ignacio de las Casas 1984).

Ante la imposibilidad de acceder a la zona superior de la bóveda se han analizado los documentos fotográficos y el tipo de fábrica empleado en el resto del edificio, constatándose medidas variables que con oscilaciones de hasta 2 cms indican que se ha utilizado principalmente ladrillo de tejar de dimensiones 28 x 14 x 4 cm colocado a soga en la mayor parte de las zonas. El ladrillo se fabricaba para ser manejado fácilmente por lo que el tamaño de la soga suele estar alrededor de 1 pie, aproximadamente el doble del tizón. Las llagas y los tendeles tienen un espesor medio de unos 2 cm.

En algunos puntos de la bóveda se han utilizado sillares de piedra: en el anillo, coincidiendo con la parte superior de cada una de las cuatro pechinas y en el interior de las mismas, en la parte inferior del triángulo, donde su función podría limitarse a crear la curvatura que permite la colocación de los ladrillos a sardinel en forma de arco en la zona central de la pechina. Los arcos torales están atirantados mediante tirantes de hierro: 2 en los arcos del crucero y uno en el arco de la nave principal, al igual que toda la bóveda de cañón que cubre la nave.

Exteriormente, el cimborrio octogonal de fábrica que cubre la bóveda posee una cubierta de teja árabe colocada a la segoviana, es decir utilizando solo teja canal y cobija solo en algunas hiladas y en las cumbres, colocada sobre un lecho arcillosos que permite su movimiento y mantiene la impermeabilidad del conjunto. Esta cubierta se coloca sobre estructura de madera a la que no ha sido posible acceder. La cubierta de la linterna, igual que las de las chimeneas, es de plomo.

El diámetro

En planta, la bóveda de media naranja se inscribe en un cuadrado de lado 11,15 m., que corresponde a la luz de la bóveda, equivalente a exactamente 40 pies castellanos (figura 7). El pie castellano es la unidad de longitud tradicional utilizada en España hasta el s XIX basada en el pie humano y equivale a 0,278635 metros. La medición del diámetro de la cúpula sobre el modelo 3D elaborado confirma esta medida, que a su vez coincide con la distancia entre las aristas de



Figura 7
Medición de la bóveda (ilustración de la autora 2012)

las pilastras en el nivel inferior. No se trata de una luz excesiva si la comparamos con los ejemplos de las grandes cúpulas históricas.

Los tratados de arquitectura españoles de la época utilizan el pie castellano como unidad de medida en los dibujos y descripciones de las trazas y en las indicaciones para la medida y cuantificación de los elementos descritos. Cabe destacar que tanto el «Tratado de todo género de bóvedas», de Juan de Torija (1661) como «Arte y Uso de la Arquitectura» de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639 y 1663) o el «Compendio de Arquitectura y simetría de los templos» de Simón García (1683), describen el diseño de bóvedas de rosca de media naranja de 40 pies de diámetro. Dicho diámetro se emplea de nuevo en las descripciones de cúpulas en la obra: «El arquitecto práctico Civil, Militar y Agrimensor» de Antonio Plo y Camín (1767) contemporánea a la construcción de la bóveda objeto de estudio. Se describe posteriormente como adaptar estos modelos a cualquier diámetro mediante reglas de tres, como señala Torija: «...y con estas advertencias podrás medir cualesquiera Bovedas que estén en proporción de sus semejantes, y esto baste para inteligencia de lo demás» (Torija 1661, 30). Esto indica que el diámetro elegido por José Díaz Gamones o es aleatorio y demuestra que conocía los tratados y diseñó la bóveda conforme a las indicaciones de los mismos.

El diámetro es un dato fundamental, debido a la relación proporcional descrita en toda la tratadística antigua entre el diámetro de la bóveda y el resto de sus elementos. Lo que constituye el fundamento de

su diseño geométrico, como describe Carlo Fontana en sus escritos y fundamentalmente en su obra: «Il Tempio Vaticano» (1694).

ESTUDIO GEOMÉTRICO Y APAREJO DE LA BÓVEDA

Los extremos de la nave principal o nave de hornos, se resuelve mediante una bóveda de media naranja sobre los cruceros, flanqueada por dos bóvedas esquifadas. La transición entre las bóvedas esquifadas y la de media naranja se realiza a través de arcos torales de medio punto, sobre los que apoyan cuatro pechinas que a su vez soportan una cornisa o anillo sobre la que carga la bóveda de crucero, rematada por una linterna. Cuenta con 8 aberturas en la bóveda, para iluminación natural, en los dos ejes perpendiculares de la nave y en los correspondientes dos ejes desplazados 45° respecto a los anteriores y otras 8 aberturas en la linterna. Se trata por tanto, de una bóveda de media naranja representativa tanto en sus dimensiones como en su geometría.

Una vez realizado el modelo tridimensional se procedió al análisis geométrico referido al desarrollo de la bóveda y medidas reales de cada uno de sus elementos.

Este estudio se basa en la sección realizada al modelo tridimensional, sobre ella se superponen las trazas estudiadas en los diferentes tratados antiguos, verificando que es la descrita por Fray Lorenzo la que realmente ha generado el diseño de esta, tanto en el perfil de la media naranja como en las proporciones y dimensiones de la linterna, pechinas, lunetos y el resto de los elementos que la componen, cuyas dimensiones corresponden en cada caso a proporciones relacionadas con el diámetro de la bóveda.

Determinar la geometría de la bóveda fue sencillo, a través del modelo tridimensional se pudieron realizar secciones del intradós absolutamente fiables. Las secciones del modelo se compararon inicialmente con las de la bóveda que aparecían en el proyecto de Restauración y Conservación de la Real Fábrica de Ignacio de las Casas. Este proyecto no actuó sobre las bóvedas. La superposición de líneas de sección se corresponde de forma general, pero llama la atención que en el proyecto las bóvedas fueron representadas semiesféricas, mientras que el levantamiento realizado muestra una bóveda de perfil apuntado (figura 8).

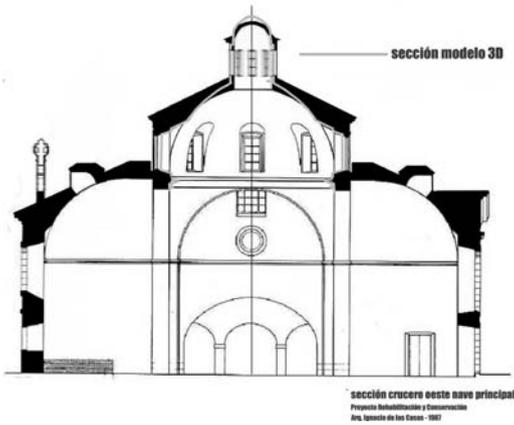


Figura 8
Sección del crucero oeste de la Nave de Hornos (dibujo de la autora 2012)

La altura total de la bóveda desde el pavimento hasta la parte superior de la linterna es de 24,78 m.

La bóveda de media naranja se divide de arriba a abajo en los siguientes elementos: linterna, bóveda, lunetos, cornisa o anillo, pechinas y pilares (figura 9).

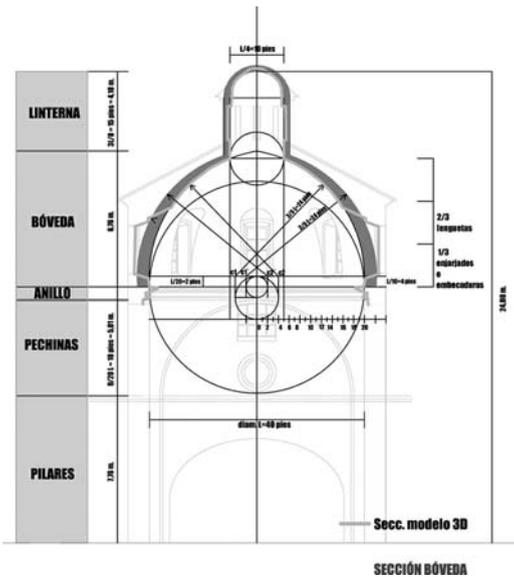


Figura 9
Estudio geométrico de la bóveda (dibujo de la autora 2012)

Linterna

La linterna de la bóveda tiene una forma cilíndrica con remate semiesférico, actualmente es el único elemento de la bóveda que mantiene el revoco. Posee 8 ventanas que corresponden en planta con los ejes de las ventanas de la cúpula. Al exterior la linterna tiene una planta ochavada rematada con cubierta de plomo. Según indica De las Casas: «Las cubiertas de las linternas y chimeneas eran de plomo y así se interpretó que debieran serlo las lunetas de fachada y probablemente las buhardillas que hoy han desaparecido». (Ignacio de las Casas. 1984).

Las dimensiones de la linterna son:

Diámetro: 2,78 m = 10 pies = $L/4$

Altura: 4,18 m = 15 pies = $3L/8$ ($L/4 + L/8$)

Espesor: 1 pie

(Siendo L = diámetro de la bóveda = 40 pies = 11,15 m)

Las citadas proporciones respetan exactamente lo indicado por Fray Lorenzo de San Nicolás en su Tratado: «El diámetro de la linterna ha de ser por la quarta parte del diámetro de la media naranja, y el alto de la linterna ha de ser diámetro y medio, en quanto a la parte de adentro de la linterna, y assi quedará en buena disposicion las medidas» (Fray Lorenzo de San Nicolás 1639, Parte I Cap. LIII, 94).

Carlo Fontana describe unas proporciones más esbeltas en su tratado, con diámetro de la linterna de $L/5$ y altura $L/2$ para la linterna sin la esfera y la cruz. Tampoco sigue las trazas indicadas por Simón García, que aunque coinciden en el diámetro interior de la linterna de $L/4$ utiliza una mayor altura para la misma $2a$, siendo «a» el diámetro exterior de la linterna.

También Fray Lorenzo hace referencia a la solución exterior de la linterna, con sección octogonal, comenta que existen dos formas de hacer las linternas al exterior: «...ò una forma de pedestal quadrada, con sus ventanas en el recto, ò haziendole ochauado, y por cada ochauo darle su ventana, para que por ella reciba luz la media naranja (...) aunque por dentro vna y otra han de tener forma redonda». (Fray Lorenzo de San Nicolás 1639, Parte I Cap. LIII, 94) (figura 10).

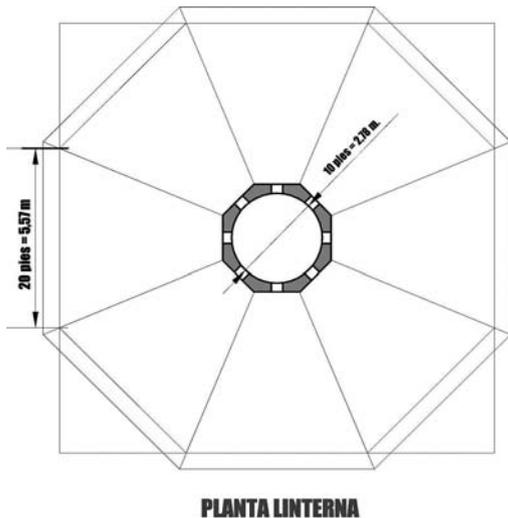


Figura 10
Planta de la linterna (dibujo de la autora 2012)

Bóveda de media naranja y cimborrio

Una primera aproximación a la geometría de la bóveda, indica que tiene planta circular de diámetro $L = 11, 15 \text{ m} = 40 \text{ pies}$, con un perfil apuntado y 8 aberturas en los ejes principales y los desplazados 45° . Exteriormente se cubre con un cimborrio de planta octogonal de lado $5,57 \text{ m} = 20 \text{ pies} = L/2$. Para la comprensión de su desarrollo se ha comparado con las trazas que expone Carlo Fontana en su estudio.

Se trabaja a partir de la sección del intradós de la bóveda obtenida del modelo 3D, tomando como base la línea superior del anillo. Se observa que la bóveda está realizada en su arranque una altura de $2 \text{ pies} = L/20$; línea que coincide con el arranque de los lunetos; a partir de esta altura se traza una línea horizontal en la que se sitúan los centros de las circunferencias que genera la línea del perfil, desplazados del centro hacia ambos lados, una distancia de $4 \text{ pies} = L/10$. El trazado de los arcos desde estos centros coincide con una sorprendente precisión con la línea de sección obtenida del modelo.

Sobre este tipo de bóvedas apuntadas o prolongadas, Fray Lorenzo no es tan preciso en cuanto a la descripción de su trazado: «...la bobeda prolongada de media naranja, se auia de trazar con dos puntos:

esto es, suponiendo que el prolongo se pasa de uno o dos pies: mas siendo mas el prolongo, que venga á ser figura oval, ò ovalo, en tal caso se ha de labrar con quatro puntos o cintreles, que con otros tantos se traza el óvalo». (Fray Lorenzo de San Nicolás 1639, Parte I Cap. LIII, 95).

El aparejo es de una gran calidad, rematándose la bóveda en su parte superior con un anillo de una rosca que sirve de apoyo a la linterna.

Fray Lorenzo describe las dimensiones que debe tener el cimborrio octogonal que cubre la media naranja de 40 pies: «...por ser, las paredes, en su planta por fuera ochauadas y redondas por dentro redondas... y siguiendo su medida, que alli es de quarenta pies, y de quatro pies los gruesos de paredes por lo mas delgado, que juntos montan quarenta y ocho pies, que es el valor de cada uno de los quatro lados... del centro del círculo formaràs ocho triangulos, que estos en la misma fabrica se forman, y hallaràs que la perpendicular vale veinte y quatro pies, el lado del ochauo vale veinte... » (Fray Lorenzo de San Nicolás, 1639 Parte I Cap. LIV, 207).

Lunetos

La altura de los lunetos de las 8 aberturas de la cúpula es de $4,18 \text{ m}$ al trasdós, esto confirma los cánones de divisiones en tercios que se dan en la obra de Fray Lorenzo, puesto que dicha altura en el trasdós equivale a los $2/3$ de la altura total de la cúpula, como indica el autor en el siguiente fragmento haciendo referencia a las lenguetas: «...sacaràs sus enjarjados, ò embecaduras, hasta el primer tercio; y hasta el segundo, las lenguetas, creo nadie ignora que sean lenguetas, y por esso no me he detenido en declararlo, », «...hazense en las bobedas en unas y otras lunetas, tanto para hermosear la bobeda, como para fortalecerla» (Fray Lorenzo de San Nicolás, 1639 Parte I Cap. LII, 94). En los lunetos, los ladrillos se disponen a soga en la dirección perpendicular a la bóveda.

Cornisa o anillo

El anillo sobre el que se levanta la bóveda de media naranja es circular y tiene una altura de 11 hiladas de ladrillo; en la línea situada sobre cada una de las pe-

chinas, se sustituyen 5 hiladas de ladrillo por sillares de piedra.

Pechinas

Las cuatro pechinas que realizan la transición de la planta circular a la cuadrada presentan un aparejo más o menos similar. En la zona central de las pechinas el ladrillo se coloca a sardinel en 5 o 6 hiladas curvas con 1 o 2 hiladas a tizón entre cada una de ellas. Aparece un sillar de piedra situado en la base del triángulo, que probablemente servía como apoyo para la colocación de la hilada curva. En la parte superior de la pechina, bajo el anillo, el ladrillo se coloca en dos hiladas a sardinel. En los dos laterales el aparejo sigue la dirección de los arcos torales y termina siendo recto horizontal en la parte inferior formando las boquillas de apoyo de las pechinas sobre los pilares. Las boquillas tienen un ancho de 3 pies (figura 11).



Figura 11
Pechina (foto de la autora 2011)

Fray Lorenzo insiste en la necesidad de trabar el aparejo de los arcos con el de las pechinas: «importa que vaya trauando en el arco de suerte, que el arco haga resalto por la parte de la pechina, como en la boquilla, y sobre el cargue la pechina vn quarto de pie, para ayudarla a sustentar» (Fray Lorenzo de San Nicolás, 1639 Parte I Cap. XLV, 75).

La curvatura de las pechinas fue descrita geométricamente en muchos tratados, viene definida por el

diámetro de la circunferencia de la bóveda y la anchura de la boquilla de apoyo de la pechina: «Cuando se quieren hacer cúpulas de grandes diámetros, se apela al recurso de robar las esquinas sobre que apoyan las pechinas, haciéndose estas truncadas y valiéndose de boquillas». (Florencio Ger y Lobe, 1898, 248)

Arcos torales

Entre cada par de pechinas se disponen los arcos torales de medio punto con un diámetro de 35 pies y un espesor al intradós de 4 pies.

Tirantes

En los arcos torales de los brazos del crucero aparecen dos tirantes de hierro, el primero a la altura del arranque del arco y el segundo aproximadamente a la mitad. En el arco hacia la nave principal solo se ha colocado un tirante en el arranque, continuando la disposición de tirantes de toda la nave.

CONCLUSIÓN

Hasta entrado el s. XIX la estabilidad de la estructura se alcanzaba siguiendo criterios geométricos, que determinaban las proporciones adecuadas de las distintas partes del elemento arquitectónico. En este trabajo se ha demostrado como las dimensiones y geometría de cada uno de los elementos de la bóveda, respetan de un modo preciso las relaciones proporcionales entre ese elemento y el diámetro de la bóveda, tal y como dichas relaciones están reflejadas en los tratados, fundamentalmente en «Arte y Uso de la Arquitectura» de Fray Lorenzo de San Nicolás.

La integridad constructiva y estructural con que ha llegado la bóveda hasta nuestros días, demuestra que las reglas empíricas proporcionales, geométricas y aritméticas descritas en los tratados, constituyen un método válido para el proyecto de este tipo de estructuras.

La elaboración de un modelo virtual 3D basado en tomas de datos por métodos topográficos es actualmente un recurso viable, económico y preciso para el análisis y documentación de elementos arquitectónicos.

LISTA DE REFERENCIAS

- Casas, Ignacio de las. 1984. *Proyecto de Restauración y Conservación de la Real Fábrica de Cristales de la Granja de San Ildefonso*, 1.3.1. Memoria descriptiva. Madrid
- Fontana, Carlo. 1694. *Il Tempio Vaticano*. Roma
- Fortea Luna, Manuel y V. López Bernal. 2001. *Bóvedas de ladrillo. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Cáceres: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura, Editorial de los Oficios S.L.
- García, Simón. 1683. *Compendio de Arquitectura y simetría de los templos*. Salamanca
- Ger y Lobe, Florencio. [1898] 2001. *Tratado de construcción Civil*. Badajoz: Est. Tip. La Minerva Extremeña. Edición facs. Badajoz: Diputación General de Badajoz.
- Guastavino, Rafael. [1890] 2006. *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, Jacques. 1995. *Estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM, CEHOPU, CEDEX.
- Heyman, Jacques. 1995. *The Stone Skeleton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Heyman, Jacques. 1999. *El Esqueleto de Piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM, CEHOPU, CEDEX.
- Heyman, Jacques. 1999. *The science of structural engineering*. London: Imperial Collage Press.
- Heyman, Jacques. 2004. *La Ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM.
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, Bóvedas y Cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM.
- Marcos y Bausá, Ricardo. 1879. *Manual del Albañil. Biblioteca Enciclopédica Popular Ilustrada*. Madrid: Dirección y Administración. Ed. facs. 2003 Valladolid: Maxtor.
- Plo y Camín, Antonio. 1767. *El arquitecto práctico Civil, Militar y Agrimensor*. Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar.
- Pastor Rey de Viñas, Paloma. 1994. *Historia de la Real Fábrica de Cristales de San Ildefonso. Durante la época de la Ilustración (1727-1810)*. Madrid: Fundación Centro Nacional del Vidrio.
- Pastor Rey de Viñas, Paloma y Acu Estebaranz. 1999. *Real Fábrica de Cristales. Imágenes de una época*. Madrid: Patronato de la Fundación Centro Nacional del Vidrio.
- Ruiz Hernando, Antonio y María Jesús Callejo Delgado. 1988. *Las Fábricas de vidrio de la Granja. Estudio Arquitectónico. Vidrio de La Granja. Real Fábrica de Cristales de la Granja, Carlos III y la Ilustración (1788 - 1988)* Madrid: Fundación Centro Nacional del Vidrio, Ministerio de Cultura, Mondadori.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639 y 1663. *El arte y Uso de la Arquitectura*. Madrid.
- Torija, Juan de. 1661. *Breve Tratado de todo género de bóvedas*. Madrid: Matritis.

Huerta, Santiago y Fabián López Ulloa (eds.). 2013. Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid, 9-12 de octubre de 2013. Madrid: Instituto Juan de Herrera.