

# ESTEREOTOMÍA DE UNA BÓVEDA DE CRUCERÍA DE LA CATEDRAL DE CUENCA

Steornomy of a ribbed vault in Santa María Cathedral of Cuenca

Enrique Torrero Fuentes. Universidad Castilla La Mancha

Ana María Coronado Gómez. Universidad Castilla La Mancha

Mónica Canosa Mora. Universidad Castilla La Mancha

Víctor Pérez Andreu. Universidad Castilla La Mancha

David Sanz Martínez. Universidad Castilla La Mancha

## RESUMEN

La Catedral de Santa María de Cuenca es uno de los edificios más emblemáticos la ciudad, declarada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1996. Las múltiples alteraciones que el edificio ha sufrido a lo largo de los siglos dificultan mucho su comprensión.

En este trabajo se constatan estas modificaciones mediante el estudio de una bóveda cuatrimpartita de crucería, donde se mezclan el estilo gótico con el renacentista.

Para ello mediante un levantamiento planimétrico y despiece de la basa de sus pilares, de sus arcos apuntados, perpiaños y cruceros, de su clave e incluso de la plementería se ha podido entender la estereotomía de la bóveda a partir de la modelización en 3D de dicha bóveda construida íntegramente en piedra.

### Palabras Clave:

Estereotomía, bóveda, plementería nervios.

## 1. INTRODUCCIÓN

La bóveda de crucería se generalizó como forma de resolver los problemas que planteaba la construcción de bóvedas de arista. En ella se sustituyen las líneas diagonales, que en las bóvedas de aristas deben ser semielipses, por semicircunferencias, y se materializan en nervios. En este sentido, se evita construir superficies ideales que se intersecan en líneas y se comienza a construir aristas reales para, sobre ellas, apoyar un relleno llamado plementería (1).

Los nervios diagonales o crucesos, que dan nombre a la bóveda, también se llaman ojivos y son habitualmente semicirculares. A los ojivos hay que añadir los que rematan la bóveda en su perímetro, formeros y perpiaños, y esta estructura inicial se irá subdividiendo con la inserción de otros nervios, hasta hacer de la bóveda de crucería una red espacial, una colección de arcos que se encuentran en nudos, y que dejan espacios entre sí, generalmente triangulares y cada vez más pequeños, que llenan los cascos de plementería. (1)

Los nervios son generalmente arcos de circunferencia, así que no

constituyen un problema para el diseño. La plementería es un relleno, en principio de sillarejo o ladrillo, por hiladas, a modo de tabique ligeramente cóncavo. Así que la dificultad de la concepción formal para el corte de las piedras se concentra en los lugares dónde los nervios se encuentran. (1)

La forma geométrica en Cantería o Estereotomía es inseparable de la función estructural. Las dovelas de un arco o de una bóveda sólo serán estables y su comportamiento mecánico apropiado si su geometría también es correcta, y ello sólo es posible cuando sus cortes son radiales.

Los maestros canteros necesitaban conocer ángulos, radios y dimensiones reales de los sillares para obtener las plantillas a tamaño natural, lo que les obligaba a dibujarlos en la montea mediante procedimientos sencillos pero con mucho rigor geométrico. La forma geométrica se materializaba después, durante el proceso de labra, con la ayuda de escuadras, compases y saltarreglas. Esto les permitía determinar la estabilidad de las construcciones.

En este trabajo se ha estudiado una bóveda cuatrimpartita de crucería de la Catedral de Santa María de

Cuenca donde se mezclan el estilo gótico con el renacentista. Esta bóveda se encuentra en una de las zonas más interesantes de la Catedral, situada próxima a la nave central de la cabecera y brazos del transepto. En esta nave lateral, la variedad de apoyos es grande y su disposición muy ingeniosa. (Fig. 1).

Este análisis de la estereotomía de la bóveda se realiza combinando la modelización en 3D de la bóveda mediante un levantamiento planimétrico previo con un estudio de la piedra utilizada mediante el despiece de cada uno de sus pilares, arcos, nervios y plementería.

## 2. TOMA DE DATOS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Para poder hacer un correcto análisis de la bóveda, ha sido necesario realizar previamente una toma de datos in situ, para determinar sus dimensiones reales, así como ver su sistema constructivo, las piezas de las que está compuesta y observar el estado de conservación de la piedra. Para ello se tomaron datos por el intradós de los arcos, con la ayuda de la estación total y el distanciómetro. De esta forma, se

puede determinar las alturas de las claves, sacar la curvatura de los arcos mediante nubes de puntos y las alturas de pilares.

Con la información obtenida, se realiza un renderizado gráfico en 3D. La nube de puntos, sirve de ayuda para trazar la curvatura de arcos y nervios. Trazando una línea curva se obtiene el centro de cada uno de los arcos perpiaños y formeros, del cual, se pueden sacar unas dimensiones permanentes, que permiten averiguar la posible coincidencia con bóvedas de otras iglesias o catedrales góticas.

Una vez representados estos arcos y nervios, in situ se cuantifican el número de dovelas de los que está compuesto cada uno de ellos, y se realizan cortes, determinando así el ángulo exacto de inclinación de cada una de ellas.

La geometría de este tipo de bóvedas es muy sencilla: arcos apuntados para perpiaños y formeros. Todos ellos se trazan con su centro en la línea de imposta, con una salvedad en el arco sur, que estando también sus centros en la línea de imposta, éstos salen del vano entre los pilares. La altura que alcanzan los arcos determina por tanto la altura de la clave.

## 3. ESTEREOTOMÍA DE LA BÓVEDA

### 3.1 Realización de la montea

La realización de la montea consistía en grandes construcciones geométricas, que representando la obra, o parte de ella, a su tamaño natural mediante distintas proyecciones, permitían obtener al maestro cantero aquellos elementos y medidas necesarios para conformar las distintas piezas. (2)

Como resultado de la montea obtenían las plantillas o patrones que les servían para trazar sobre las piedras los contornos de las caras de las distintas piezas, así como las medidas lineales o angulares que se precisaban para el proceso de labrado. (3).

### 3.2 Estructura inalámbrica

La planta de la bóveda a estudiar (Fig.1), representa la proyección horizontal del conjunto de nervios. En el contorno se abren cuatro arcos perimetrales, sobre los lados del rectángulo. La bóveda forma parte de un conjunto lineal de varios arcos, dos de estos son perpiaños, limitando con el tramo siguiente, siendo los otros dos, formeros.

El nervio crucero es semicircular. Como la directriz no arranca del vértice del rectángulo de planta, si no algo más adelantado, el radio de la línea del intradós del ojivo, no es exactamente igual a la diagonal del rectángulo.

Para la realización de los arcos perpiaños y formeros, se toma el centro en la línea de imposta, localizándose algunos dentro de la luz entre pilares y otros fuera de esta.

En la figura 2, se puede observar el levantamiento de esta bóveda en tres dimensiones. En la primera (Fig. 2a.), se representan las geometrías de todos los arcos, trazándolos desde el intradós de

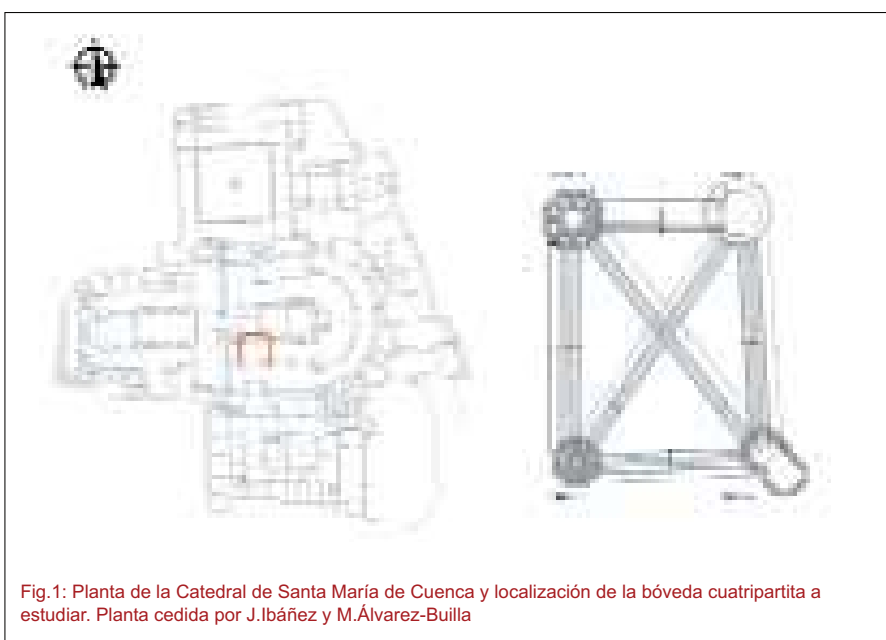


Fig. 1: Planta de la Catedral de Santa María de Cuenca y localización de la bóveda cuatripartita a estudiar. Planta cedida por J.Ibáñez y M.Álvarez-Builla

éstos, como también el arranque desde las basas de los pilares que los sustentan y las disposiciones de las secciones de los nervios en dichas basas. En la segunda figura (Fig.2b.), se representan colocados todos los arcos. Al realizar una sección de la bóveda por el eje longitudinal o transversal, presenta una misma apariencia. Las alturas de las claves de los arcos perpieños y formeros, alcanzan una altura similar a la de la clave central, por lo que la sección, será sensiblemente horizontal, lo que se llama rampante llano.

### 3.3. Modelización de los pilares

Es de suponer, que el proceso de elaboración de sillares, era el habitual para molduras rectas. Para la labra de las formas molduradas, se controlaban mejor comenzando por tallar un volumen contenedor del conjunto, hasta llegar a la forma final del proceso, consistente en añadir facetas cada vez más ajustadas a las secciones que se querían obtener. En la figura (3) se muestran la modelización de los pilares y los cortes horizontales en sus sillares.

El Pilar nº1 muestra con claridad la forma en que la fábrica tardogótica transformó la originaria del s.

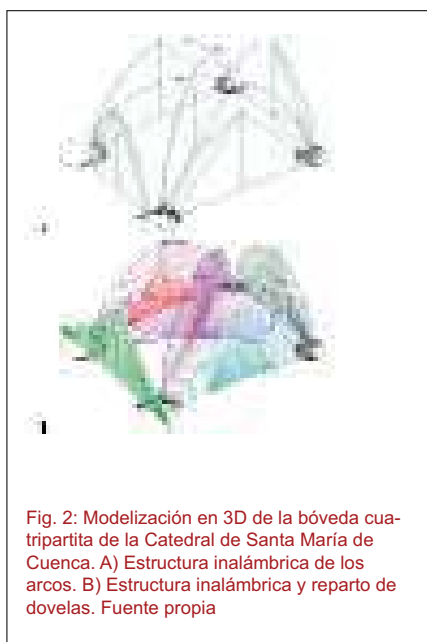


Fig. 2: Modelización en 3D de la bóveda cuatripartita de la Catedral de Santa María de Cuenca. A) Estructura inalámbrica de los arcos. B) Estructura inalámbrica y reparto de dovelas. Fuente propia

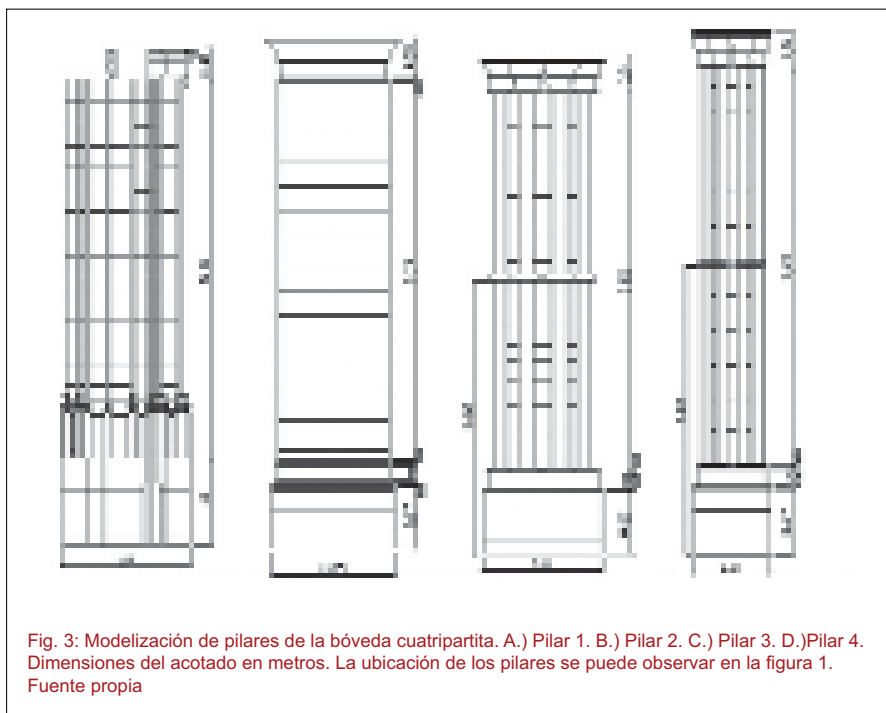


Fig. 3: Modelización de pilares de la bóveda cuatripartita. A.) Pilar 1. B.) Pilar 2. C.) Pilar 3. D.) Pilar 4. Dimensiones del acotado en metros. La ubicación de los pilares se puede observar en la figura 1. Fuente propia

XIII. El apoyo primitivo quedó embebido en un macizo poligonal de cuyo interior emerge un haz de nervios (4); éstos se corresponderían con los formeros de separación de los dos tramos previos de ambas naves laterales, los nervios diagonales de sus bóvedas cuatripartitas y los dos transversales. El fuste está formado por 17 sillares, con dimensiones varias, pues realiza una forma peculiar e irregular. Se aprecia claramente como este pilar tiene juntas verticales, tanto en fuste como en basa. En la Fig. 4, se ven las dimensiones aproximadas de estos sillares.



Fig.4: Representación de sillares en basa de pilar 1. Fuente propia

El Pilar nº 2 se trata de un pilar de fuste circular de diámetro 1,30 m. y basa ática con un diámetro de 1,80 m. Se presenta dispuesto sin transición alguna sobre un alto zócalo, también circular y moldurado a un tercio de su altura. En realidad estos basamentos se organizan en dos cuerpos de anchura decreciente y separada por baquetón. El fuste circular, se compone de catorce sillares irregulares de aproximadamente 0'30 m. de altura, destacando una única llaga en sentido vertical en cada uno de ellos, igual en todas las alturas. El capitel está decorado con dos hileras de hojas de penca ner-

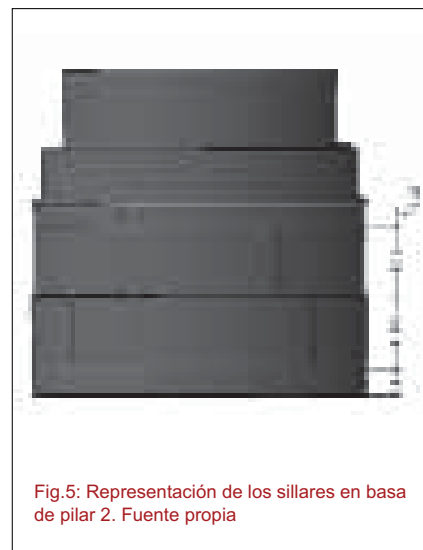
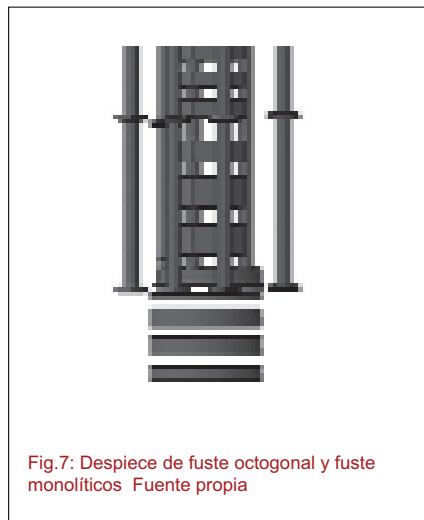


Fig.5: Representación de los sillares en basa de pilar 2. Fuente propia



vada. Los ábacos son circulares y de escaso desarrollo vertical, constituidos por dos molduras convexas separadas entre sí por otra cóncava y rematados por listel. La basa (Fig. 5), de diámetro 1,80 m. y altura de 0,87m., está compuesta sillares de aproximadamente 1 o 1,20 m. de longitud y cuyas alturas están representadas en la siguiente figura.

El Pilar nº 3 se compone de núcleo octogonal de lado 0,45 m. y altura 5,35 m., al que se adosan a contralecho ocho fustes lisos monolíticos de diámetro de 0,20 m, interrumpidos a media altura, 2,70m., por un anillo moldurado (Fig. 6). (Medidas tomadas desde el último elemento de la basa).

Según Gema Palomo (4), este sistema constructivo con fustes exentos y monolíticos que rodean el núcleo central, tiene como misión dar rigidez a unos apoyos que han de sufrir mucha carga, ejerciendo el oficio de puntales permanentes. En ocasiones, y como es en este caso, para ligar más dichos fustes a sus núcleos, se subdividía su altura rodeándolos en forma de anillo. Todos los fustes se disponen sobre un único basamento o zócalo también circular. El fuste octogonal, se compone de trece sillares irregulares de aproximadamente 0,47 m. de altura. Al no encontrarse llagas verticales en estos sillares, llegamos a la conclusión de que se trata de piezas únicas talladas con la forma del octógono (Fig. 7).

Cada uno de los ocho fustes adosados al núcleo central, está compuesto por dos piezas de 2,70 m. de altura, tallados de forma cilíndrica. En la base de estos fustes, a media altura y en la parte superior, vemos que se encuentran adosados a piezas de piedra con forma de anillo, que sirve de ligadura entre ellos. La basa, de diámetro 1,60 m. y altura 0,87 m., está compuesta por sillares de grandes dimensiones, de entre 0,95 y 1,30 metros de longitud. En cuanto a su altura, se representa en la Figura 6.

Los capiteles de cada uno de los ocho fustes, se encuentran ampliamente decorados con crochets, sus cabezas se levantan sobre rígidos nervios, y se unen formando uno sólo. El ábaco, se ondula contorneándolos.

El Pilar nº 4 se compone de núcleo circular diámetro 0,60 m. y altura 5,35 m., al que se adosan a contralecho ocho fustes lisos monolíticos de diámetro de 0,15 m, interrumpidos a media altura (2,70m.) por un anillo moldurado. (Medidas tomadas desde el último elemento de la basa). El fuste circular (Fig. 8), se compone de trece sillares irregulares de aproximadamente 0,47 m. de altura. Al no encontrarse llagas verticales en estos sillares, se llega a la conclusión de que se trata de piezas únicas talladas con la forma del circular.

Cada uno de los ocho fustes adosados al núcleo central, está compuesto por dos piezas de 2,70 m. de altura, tallados de forma cilíndrica. En la base de estos fustes, a media altura y en la parte superior, se ve que se encuentran adosados a piezas de piedra con forma de anillo, que sirve de ligadura entre ellos.

La basa (Fig.9), de diámetro 1,20 m. y altura 0,87 m., está compuesta tres sillares de aproximadamente 0,80 m. de longitud y altura 0,29 m.



### 3.4 Despieces de arcos, nervios y plementería

Para el despiece de arcos y nervios se traza la sección o plantilla de los nervios. Se recomienda siempre que existan ciertas proporciones para el cuelgue o canto de los ner-

vios en relación con la luz del vano. Se diseñan las tres plantillas diferentes que se pueden observar en la bóveda, con una cierta modulación común entre ellas.

La cola o espiga superior sirve para el apoyo de los extremos de las hiladas de la plementería. Si se prescinde de ella, los cascos de plementería que llegan por ambos lados se unirían en una junta. La zona del arranque de los nervios, por lo general comienzan en una única pieza, comúnmente llamado enjarje o jarja, pero en el caso de la bóveda estudiada se trata de piezas independientes, puesto que desde el inicio cada nervio sigue su propia directriz.

Por lo general, los perfiles de los nervios suelen presentar una quilla o baquetón central, seguido a cada lado de una concavidad y otra convexidad de remate. De esta manera, es posible agarrar manualmente cada dovela por los baquetones laterales. Además, se diseña la cimbra de manera que el nervio encaje sobre ellas, evitando su movimiento lateral, por ejemplo, disponiendo las cimbras como dos tablas paralelas sobre las que apoyan los baquetones laterales. (5)

Las dovelas de los nervios no presentan dificultad geométrica, aunque si quizá de labra, según la complejidad del diseño de sus molduras, ya que la bóveda estudiada, cuenta con tres tipos diferentes. Como en cualquier otro arco, para la obtención de cada pieza, el bloque inicial era cortado con cierta curvatura que conocían de la montea.

En la Fig. 10, se resume la obtención de cada tipo de dovela a partir de una escuadría estrictamente capaz de contenerla, y en el ejemplo, se puede observar el procedimiento general en la talla de una dovela para los arcos, en base a ejemplos de la "Guía Práctica de la Estereotomía, 2007" (5), y adaptándolos a este caso. El trabajo se iniciaba con el desbroce o retirada

de la tierra que cubría la roca, mediante el pico y la pala. A continuación, con el martillo del piquero se capeaba el material, tarea consistente en detectar fallos e imperfecciones de la roca. Después con el pico y la acodadera, se procedía a marcar las líneas que determinarían la figura del bloque. Sobre dichas líneas, se hincaban cuñas metálicas y estas, al presionar la roca, fracturaba el bloque. También en algunos casos, se utilizaban cuñas de madera, que luego se mojaban, hinchándose y provocando el desgajamiento del bloque. (6)



Fig. 10: Proceso de obtención de dovelas de diversos arcos, a partir de escuadrías estrictas. Fuente (1)

La plementería es la superficie que da forma a la cáscara de la bóveda, es por tanto el objetivo primordial de la construcción de ésta, el conseguir una superficie continua con la que cubrir el espacio. En la Catedral de Cuenca, la cáscara de la plementería está construida con piedra, se lleva a cabo con una mampostería de pequeño tamaño, con piezas poligonales apenas desbastada. Con estas piezas, se va rellenando el espacio que queda entre los nervios partiendo desde los arranques hasta la cúspide. Debido a la gran altura de la bóveda, la inclinación de los lechos hace que éstos puedan precipitarse hacia el interior, por lo que cada hilada adquiere una forma ligera-

mente cóncava y comienza a actuar como un pequeño arco autoportante cóncavo entre los nervios. Por regla general, las plementerías de las bóvedas de crucería se pueden aparejar de dos formas diferentes, a la inglesa o a la francesa, siendo este último la tipología propia de la Catedral de Cuenca.

El aparejo de plementería a la francesa consiste en disponer los lechos como si se tratara de una bóveda de arista, es decir, paralelos a los dos ejes ortogonales de la bóveda (4). Las hiladas se van apoyando en los arcos diagonales y en los arcos perimetrales, ya sean los perpiaños o los formeros. Sobre la diagonal, el encuentro a inglete de los lechos queda oculto tras el nervio ojivo (cruceiro). Este aparejo a la francesa tiene algunos problemas. Para llevar a cabo un témpano triangular de plementería se requiere un replanteo previo; este replanteo consiste en dividir la mitad del arco formero o el perpiaño en  $n$  partes iguales, tantas como hiladas y lo mismo sobre la mitad del arco diagonal en el que apoya el casco de plementería. Al ser la mitad de la diagonal de una longitud mayor que la mitad del arco de perímetro, cada lecho varía su anchura, siendo más estrecho al comenzar en el perímetro que cuando llega a la diagonal.

## 4. CONCLUSIONES

Con este estudio, gracias a los ensayos realizados insitu con ultrasonidos, se han podido establecer semejanzas en cuanto a fases constructivas con otros investigadores de esta Catedral, como es el caso de Joaquín Ibáñez y Maryan Álvarez-Builla. Se cree por ello que esta bóveda se realizó en una primera fase constructiva de la Catedral, hacia el siglo XIII. También, ensayando la piedra con la que fue construida dicha bóveda, se hizo una hipótesis del peso de sillares con densidades

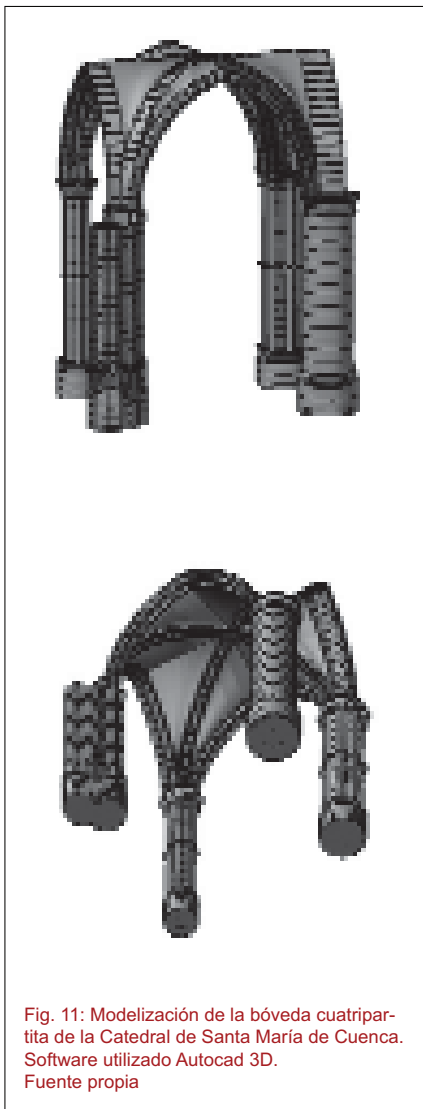


Fig. 11: Modelización de la bóveda cuatripártita de la Catedral de Santa María de Cuenca. Software utilizado Autocad 3D. Fuente propia

reales, y se ha llegado a la conclusión de que parte de los pilares que sustentan la bóveda, no son sillares macizos si no huecos y rellenos con cascotes, debido al gran peso que estos conllevarían para su traslado desde la cantera. Se realiza una modelización 3D de la bóveda completa, para una mayor comprensión. (Fig.11)

## 5. NOTAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rabasa, E.; determinó que durante el gótico temprano aparecería la bóveda de crucería para mejorar el sustento de las antiguas bóvedas de arista.
2. Fernández Salas, J.; explica la montea como elemento fundamental de la antigüedad ante la escasez de medios para una correcta colocación insitu de cada elemento que constituye una bóveda.
3. Gordo Murillo, C; con la montea se consiguen patrones de labrado, de diversas formas y complejidades.
4. Palomo Fernández, G; explica claramente la apariencia externa de varias bóvedas, entre ellas parte de la estudiada, en cuanto a nervios, fustes y basas de alguno de los pilares de esta Catedral.
5. Rabasa, E; explica el procedimiento de cimbrado de nervios para una mayor facilidad a la hora de la puesta en obra de las piezas, y para una mayor estabilidad.
6. Castellanos Miguélez, A; determinaba cuales eran las escuadrías básicas de talla para la realización de nervios. El caso de la imagen 10 muestra el caso concreto de la Catedral de Cuenca.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Castellanos Miguélez, A. (1999).** *Guía Práctica de la Cantería*. 3ª ed. Edita Centro de los Oficios. ISBN 84-87496-45-0.

**Fernández Salas, J. (1996).** *Geometría y función estructural en cantería. La cantería y la estereotomía de la piedra en el aprendizaje del arte de construir y otras consideraciones*.

**Gordo Murillo, C. (1997).** Tesis doctoral. *Bóvedas oblicuas en cantería sus elementos y morfología como factores determinantes de su uso*. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

**Palomo Fernández, G. (2002).** *La Catedral de Cuenca en el Contexto de las Grandes Canterías Catedralicias Castellanas en la Baja Edad Media*. Edita Madrid: Historia 16, D.L. 1991. ISBN 84- 7679-199-2.

**Rabasa, E. (1996).** “*Técnicas góticas y renacentistas en el trazado y la talla de las bóvedas de crucería españolas del siglo XVI*”. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, 19-21 septiembre 1996. Eds A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU.

**Rabasa, E. (2007).** *Guía Práctica de la Estereotomía de la piedra*. León: Edita Centro de los oficios, Ayuntamiento de León. ISBN 978-84-96-534-09-4.