

Estudio de los métodos de trazado de las trompas nervadas mediante dos casos históricos

Analysis of gothic squinch tracing methods through two historical cases

■■■■■
Tomas Gil-Lopez, Amparo Verdu-Vazquez, Oscar Lopez-Zaldivar y Rafael Lozano-Diez
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8490>

En la arquitectura gótica, la composición en planta sobre figuras poligonales alcanza un notable desarrollo, tal y como se manifiesta en investigaciones anteriores [1, 2]. Su trazado surge como superposición simultánea de dos figuras geométricas: el cuadrado y el círculo. Estudios previos en el ámbito de esta investigación [3] señalan que la evolución del cuadrado al círculo se constituye en el fundamento de la *sciencia* medieval.

Esta evolución del cuadrado al círculo, se realiza mediante plantas poligonales que parten del octógono como figura más habitual. Esto es debido a la estrecha relación con el cuadrado, como se recoge en trabajos ya publicados [4], puesto que el octógono se genera a partir del giro de un cuadrado un ángulo de 45°.

En la mayoría de los casos, se parte de una planta cuadrada o rectangular desde la cimentación, y se ochava en un plano superior, tal y como expresa Gelabert [5]: "*capilla quadrada con tres paños de ochavo*" (capilla cuadrada con tres paños en ochavo). El motivo es el mejor aprovechamiento del espacio, como se desprende de las palabras de Juan Gil de Hontañón [6], cuando en 1509 al contratar la Librería de la Catedral de Segovia (zona superior de la Sala Capitular) dice que habría de ser "... *quadrada por lo baxo e ochavada por lo alto...*" (cuadrada en la parte baja y ochavada en la alta).

Esta transición de la planta cuadrada a la octogonal, conlleva la resolución de los cuatro espacios triangulares que aparecen en los rincones. La cubrición de estos espacios, que en planta tienen forma de triángulo rectángulo isósceles, se ha resuelto habitualmente mediante un elemento arquitectónico denominado

trompa. Se trata de un dispositivo con forma abocinada que resuelve la transición formal y mecánica de la planta cuadrada al octógono, para proporcionar un apoyo continuo a la descarga de una bóveda.

No ES un elemento novedoso que aparece en la etapa gótica, puesto que es la misma solución ensayada ampliamente en la arquitectura románica. En la arquitectura gótica, se mantiene este elemento, pero se le imprime un carácter "goticista" con la incorporación de la nervadura, convirtiéndose en una bóveda nervada que sirve de transición y apoyo a la bóveda principal. La trompa pasa de ser un elemento auxiliar, a adquirir un protagonismo desconocido hasta ahora, al tratarse de nuevas bóvedas con nervios y claves propias.

En el primer gótico, aparecen las trompas nervadas de un sólo nervio, con la incorporación de un nervio diagonal, como refuerzo. Con el avance del estilo gótico, esta solución se complica, apareciendo la bóveda con tres nervaduras, que confluyen en una clave, denominándose trompa trinervada.

Esta investigación se centra en un análisis en profundidad de los métodos de trazado de la trompa nervada, por considerar que se trata de un conocimiento fundamental para poder acometer obras rehabilitación en este tipo de bóvedas. Para ello, se ha centrado el estudio en dos espacios cuya cubrición se ha resuelto de forma similar pero con una gran diferencia dimensional entre ambos. Se han escogido estos dos espacios, para comprobar si el método de trazado de la trompa se mantiene pese al incremento de la escala.

1. EL TRAZADO EN FUNCIÓN DE LA ESCALA. DOS CASOS DE ESTUDIO

1.1. TEORÍA SOBRE LA TROMPA NERVADA

Las reglas de trazado de la trompa nervada son similares a las de cualquier

bóveda gótica. La construcción de la misma tiene su origen en la proyección horizontal de sus nervaduras [7], denominada traza.

Posteriormente, se realiza la monea, comenzando por la ejecución de los nervios. Pese a tratarse de un elemento volumétrico, los nervios se generan a partir de trazados bidimensionales, arcos de circunferencia sobre planos verticales. Tal y como se recoge en estudios realizados [8], la verticalidad de las nervaduras y claves, junto con la referencia de éstos a la proyección horizontal, guían el trazado de sus componentes.

Como los nervios son arcos formados por dovelas de piedra, para su realización, al maestro medieval le basta conocer su curvatura (generalmente la del intradós del nervio) y su perfil [9]. Cada una de las curvaturas diferentes está definida con un baivel. Este instrumento permite realizar la talla de las dovelas del arco prescindiendo de planos. Tiene forma de escuadra, con un brazo recto y otro curvo. El brazo recto está orientado hacia el centro geométrico del arco y el curvo tiene la misma curvatura que el intradós del arco. Por consiguiente, para realizar dos arcos con la misma curvatura se utiliza el mismo baivel.

Finalmente se realiza la plementería de la bóveda. El tipo de superficie resultante tiene poco interés para el maestro cantero [10]. Suele tratarse de superficies irregulares, ligeramente cóncavas, que se adaptan en la medida de lo posible a los nervios perimetrales, normalmente divergentes entre sí y con distinta curvatura.

2.2. SALA CAPITULAR DE LA CATEDRAL DE VALENCIA VS. SALA DEI BARONI DE CASTEL NUOVO EN NÁPOLES

El progresivo aumento de escala de los abovedamientos, implica una modificación del método de trazado de las trompas nervadas. Para poder estudiar este condicionante, se han escogido dos casos representativos de abovedamientos de planta octogonal: la Sala Capitular de la Catedral de Valencia vs. Sala dei Baroni de Castel Nuovo en Nápoles.

Se trata de dos obras construidas con aproximadamente un siglo de diferencia. Ambas bóvedas son de planta octogonal divididas en ocho sectores mediante ner-

vios diagonales. Cada uno de ellos, a su vez, está dividido por un nervio rampante y dos terceletes que convergen en una clave secundaria. Los ocho nervios diagonales y ocho rampantes se unen en una clave polar en el ejemplo español y en un anillo pétreo (clave perforada por un óculo central) en el italiano.

La primera de ellas, la sala capítular de la catedral de Valencia, hoy llamada capilla del Santo Cáliz, tiene planta sensiblemente cuadrada de 13,40 m. de lado, con una altura aproximada de 16 m. Está cubierta con una bóveda estrellada de planta octogonal, con cuatro trompas trinervadas en los rincones.

La bóveda (Fig. 1), se realiza según las trazas de Andreu Julià [11]. Destaca la singularidad de su emplazamiento dentro de la catedral. En lugar de estar adosada a uno de los lados del claustro como viene siendo habitual en esta tipología, está emplazada a los pies de la iglesia. Estudios realizados sobre la influencia de las escuelas catedralicias en el origen de las primeras universidades, sacaron a la luz el primitivo uso de este espacio: escuela de teología. Sobrino [12], refiriéndose a este espacio, comenta que se trata del edificio de enseñanza más notable de toda la Edad Media cristiana. Posteriormente, se transforma en capilla de enterramiento de prelados y canónigos, en sala capítular, e incluso, en sede de la celebración de algunas cortes reales [13].

Con respecto al segundo ejemplo a analizar, la Sala dei Baroni de Castel Nuovo en Nápoles, se trata de un espacio de planta sensiblemente cuadrada cuyo lado

es 100 pies mallorquines y una altura aproximada de 28 m., tal y como se refleja en mediciones realizadas con anterioridad [14, 15]. Está cubierta con una bóveda estrellada de planta octogonal, con cuatro trompas trinervadas en los rincones.

La bóveda (Fig. 2) fue realizada por el maestro cantero español Guillem Sagrera entre 1442-1454 para Alfonso V de Aragón [16, 17]. Como singularidad cabe destacar la existencia de un anillo pétreo, a modo de clave polar, que deja un óculo en el centro. En el siglo pasado, la existencia de este óculo central ha generado comparaciones con el Panteón de Agripa en Roma y con las termas de Baie y Pozzuoli [18, 19]. Sin embargo, contemporáneos de Sagrera señalaron que la Sala dei Baroni tiene una clara influencia del gótico catalán, puesto que Nápoles fue antiguo reino español, y no una conexión con la arquitectura antigua [20].

2. METODOLOGÍA

2.1. PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN

Para poder comparar los trazados de ambas bóvedas, se ha realizado un levantamiento tridimensional de cada uno de sus nervios.

Una vez obtenido las directrices de los mismos y teniendo en cuenta la teoría sobre los trazados de las trompas nervadas, expresadas anteriormente, se pretende obtener las reglas geométricas que han originado el trazado de cada uno de ellos.

Comparando los datos obtenidos, se comprueba cómo dichas reglas geométricas se modifican en función de la escala del trazado.

2.2. OBTENCIÓN DE DATOS

Por tratarse de bóvedas de difícil acceso, la medición directa resulta extremadamente compleja. Por esta razón, se ha utilizado una estación total láser sin prisma de reflexión, marca Leica, modelo TCR 1105, montada sobre un trípode topográfico.

Se han fijado una serie de puntos en el arranque de nervios alternos de la bóveda, señalizados con dianas retroreflectantes, como base de referencia de la toma de datos. A continuación, desde cuatro estaciones diferentes, con objeto de evitar zonas de sombra, se han obtenido cuatro nubes de puntos. Posteriormente, se han unido tomando como referencia los puntos fijados por las dianas retroreflectantes.

De esta forma se ha obtenido un modelo tridimensional por cada bóveda (Fig. 3a y 3b), compuesto por puntos posicionados en el espacio (con coordenadas X,

Y y Z), necesario para determinar la geometría exacta (487 puntos en la bóveda de la antigua sala capítular de la catedral de Valencia y 1.359 puntos en la bóveda de la *Sala dei Baroni* de Castel Nuovo en Nápoles, dado que su tamaño es mayor).

A partir de estos modelos, se pretende realizar un análisis exhaustivo de la geometría y de los métodos de trazado de las trompas trinervadas.

Mediante el programa Rhinoceros 5.0, se obtienen las coordenadas de la nube de puntos procedentes de las mediciones de la estación láser total. Posteriormente, mediante el programa de modelado algorítmico Grasshopper, se realiza una programación que escoge (dentro de cada nervio) ternas de puntos y halla el centro de la circunferencia que forman. Una vez obtenidos los posibles centros, se halla el punto medio de los mismos. Este proceso se realiza así puesto que, como se detalla en la teoría del trazado, los nervios son arcos de circunferencia. Posteriormente, se obtiene el punto medio de todos los centros y el radio medio de todas las circunferencias.

Analizando el trazado de las bóvedas, se observa un descenso de 6 cm en la clave polar en la bóveda de la antigua sala capítular de la catedral de Valencia. Se trata de un desplazamiento relativamente pequeño, que no impide obtener cómo podría ser la forma original de la bóveda.

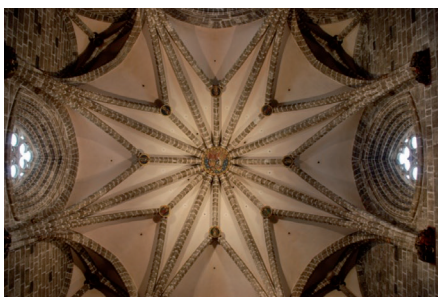


Fig. 1: Bóveda de la antigua sala capítular de la catedral de Valencia.
Fuente: Autores

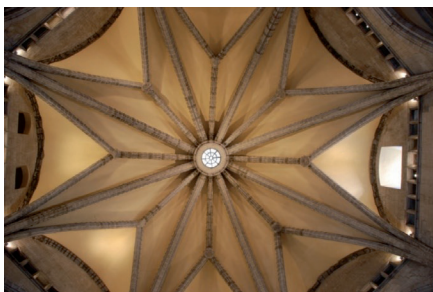


Fig. 2: Bóveda de la Sala dei Baroni de Castel Nuovo en Nápoles. Fuente: Autores

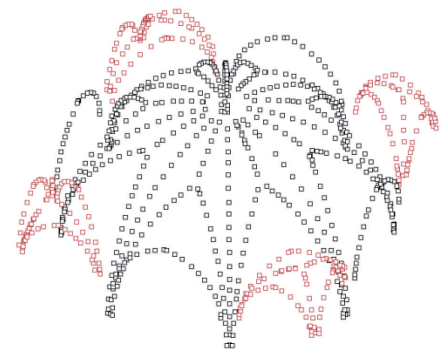


Fig. 3a: Adquisición de datos de la bóveda de la antigua sala capítular de la catedral de Valencia

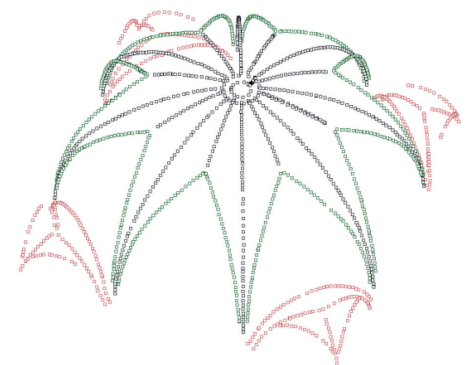


Fig. 3b: Adquisición de datos de la bóveda de la Sala dei Baroni de Castel Nuovo en Nápoles

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. TRAZADO DE LA TROMPA NERVADA

El nervio diagonal acomete sobre la clave del arco formero, que forma el ocha-vo, y nace del extradós de los dos arcos ciegos, que convergen tangencialmente en el ángulo formado por los muros. Cuando se trata de octógonos regulares, el espacio abovedado forma en planta un triángulo rectángulo isósceles. La traza del nervio diagonal acomete perpendicularmente en el arco formero, dividiendo al triángulo en otros dos triángulos rectángulos isósceles de superficie mitad (Fig. 4).

Partiendo del lado del octógono que forma la bóveda en planta L , la longitud del cateto del triángulo L' , que forma 45° con L , mediante una relación trigonométrica, será:

$$L' = L \sin 45^\circ = L \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{1}$$

Como el nervio diagonal forma a su vez 45° con el cateto del triángulo L' , su longitud D será:

$$D = L' \sin 45^\circ = L' \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{2}$$

Sustituyendo el valor de L' obtenido en (1), en la ecuación (2):

$$D = L \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{L}{2} \tag{3}$$

Es decir, que la longitud de la traza del nervio diagonal es igual a la mitad de la del arco formero. Por consiguiente, si el arranque del nervio diagonal y del arco formero tiene la misma cota y el nervio diagonal acomete con tangente horizontal en la clave del arco formero, como por otra parte es habitual, la montea del nervio diagonal y el arco formero son iguales. Es decir, el nervio diagonal es igual a medio arco formero y, si se trata de arcos de medio punto, la plementería de la superficie abovedada es una porción de esfera.

Como es sabido, la cantería gótica se caracteriza por emplear procedimientos sencillos y estandarizados, buscando la eficacia constructiva. Este es un ejemplo claro, puesto que el hecho de poder labrar las dovelas del nervio diagonal con la misma plantilla que la del arco formero simplifica su ejecución.

3.2. TRAZADOS DE LA TROMPA TRINERVADA

Del análisis de los datos obtenidos, se han descubierto dos métodos de trazado

diferentes. Posteriormente se han corroborado, aplicándolos sobre otros ejemplos existentes.

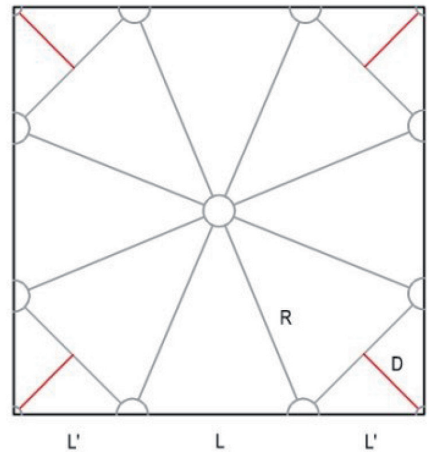


Fig. 4: Taza del nervio diagonal de la trompa nervada

3.2.1 Taza

Las trompas de la sala capitular valenciana siguen la traza propuesta por José de Gelabert en su manuscrito [5], identificada en la tabla final como la relativa al *tercerol*, donde aparece la traza y la montea del mismo. El *tercerol* a que se refiere Gelabert es un triángulo rectángulo isósceles con tres nervios que convergen en una clave.

El trazado del *tercerol* de Gelabert es idéntico al de una cuarta parte de la bóveda de crucería estrellada de planta cuadrada con cinco claves (una polar y cuatro secundarias). En la Fig. 5, se ha superpuesto la traza de la bóveda de planta cuadrada con cinco claves propuesta por Tosca sobre el trazado de Gelabert. Según el trazado de Tosca [3], sobre un cuadrado inscrito en una circunferencia, los nervios ojivos se corresponden con las diagonales del mismo, los rampantes con las líneas perpendiculares a los lados por el punto medio, y la traza de los terceletes con la línea recta que resulta de unir cada vértice con el punto de intersección de la línea perpendicular al lado con la circunferencia. Es decir, la traza de los nervios del *tercerol* de Gelabert se corresponde con lo que actualmente se conoce como los dos terceletes y el rampante de una bóveda de crucería estrellada de planta cuadrada.

Como se aprecia en la Fig. 6, éste es el método de trazado de las trompas trinervadas de la sala capitular valenciana.

Sin embargo, el levantamiento realizado de la bóveda de la Sala dei Baroni del Castel Nuovo de Nápoles puso de manifiesto que este método trazado no es el único usado para la construcción de la trompa trinervada. Mientras que en el

ejemplo valenciano, el trazado sigue fielmente el recogido por Gelabert, las trompas de la Sala dei Baroni tienen un trazado diferente. La prolongación de la traza de los nervios interseca en el punto medio del lado opuesto del triángulo.

En la sala valenciana, los nervios de las trompas se trazan a lo largo de las bisectrices de los ángulos internos del triángulo. Como resultado, la clave se coloca en el incentro del triángulo. En cambio, en la sala napolitana, los nervios se disponen sobre las medianas del triángulo. Es decir, la clave se sitúa en el baricentro del triángulo. Este cambio podría deberse al aumento de escala de una bóveda respecto a la otra. En el caso de la bóveda de mayor tamaño, al situar la clave en el baricentro del triángulo, la longitud entre los tres nervios de la bóveda es más parecida, así como la superficie de los cascos de plementería.

3.2.2. Montea

En la sala capitular valenciana, el arranque tanto de los nervios de la bóveda como de los de las trompas se produce a la misma altura mediante ménsulas. Sin embargo, los arcos formeros de la trompa y los de sus propios nervios están peraltados mediante semicolumnas.

En la Sala dei Baroni, por el contrario, los nervios arrancan directamente del muro (intersecando directamente en él, como es habitual en las obras de Sagrera), evitando el uso de ménsulas, que debido al tamaño de la sección de los nervios adquirirían un enorme dimensión. Además, el hecho de que las trompas se encuentren a una altura inferior al arranque de la bóveda, hace necesaria la existencia de dos arcos formeros (superpuestos en planta),

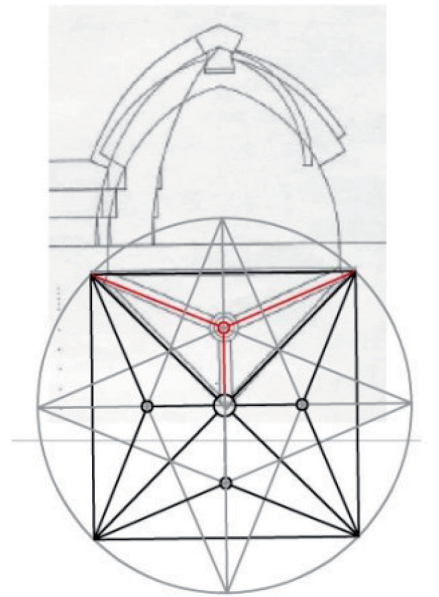


Fig. 5: Taza de la bóveda de planta cuadrada con cinco claves sobre el tercerol de Gelabert

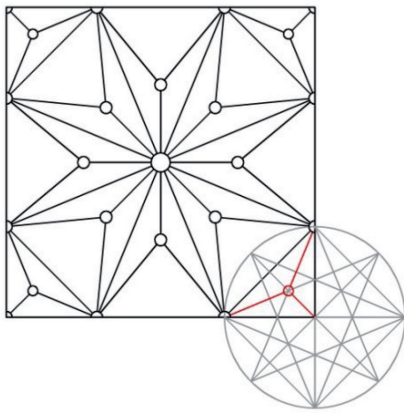


Fig. 6: Taza de la trompa trinervada en la antigua sala capítular de la catedral de Valencia

uno inferior a la altura de la trompa y otro superior a la altura de la bóveda. Esta duplicidad de arcos formeros no es necesaria en la bóveda valenciana. La diferencia de altura entre ellos es de aproximadamente 8 metros, lo que posibilita la creación de una galería perimetral, que recorre todo el perímetro de la sala.

En la sala capítular valenciana, los arcos perimetrales a las trompas (tanto el arco formero de la bóveda como los dos que discurren por el muro) son apuntados y con directriz circular, como los arcos principales de la bóveda. El diámetro del arco formero es igual a 25 pies valencianos, la mitad del diámetro del nervio diagonal, cuya medida es 50 pies valencianos. Los arcos que forman las trompas así como los perimetrales a las mismas que discurren por el muro tienen todos el mismo radio ($1/3$ del radio del nervio diagonal), excepto el nervio de la trompa más corto cuyo radio es de valor doble ($2/3$ del radio del nervio diagonal). Además, sus centros están situados a una altura de $1/3$ del radio del nervio diagonal, sobre las ménsulas de arranque de la bóveda. De esta forma queda definida la clave de la trompa.

En la Sala dei Baroni, a diferencia de la valenciana y pese a tratarse de una bóveda gótica, ninguno de sus arcos es apuntado. Los tres nervios que forman la trompa tienen una directriz circular y los centros se sitúan a la altura del arranque de los dos nervios mayores de la trompa (los que en planta parten del vértice formado por un cateto y la hipotenusa) y del arco formero. El diámetro de todos ellos es el mismo y coincide con el lado del octógono inscrito en un cuadrado de lado 100 pies mallorquines: 10,80 m. El arranque teórico de los mismos, con tangente vertical, se situaría en el interior del muro. En proyección horizontal, estos puntos se encuentran en un cuadrado de lado 104 pies mallorquines concéntrico al anterior.

De esta forma, queda situada espacialmente la clave de la trompa. Finalmente, el arranque del nervio menor (cuyo trazado en planta coincide con la diagonal del cuadrado en el que se inscribe la bóveda) se produce a una altura superior, coincidiendo con el arranque de los nervios de la bóveda. El radio de este nervio queda definido por las condiciones anteriores.

CONCLUSIONES

Esta investigación tiene por objeto estudiar los métodos de trazado de las trompas nervadas de las bóvedas góticas. Un conocimiento de los mismos es fundamental para acometer obras de rehabilitación en este tipo de cubriciones.

Se han analizado dos obras representativas de la arquitectura gótica en lo que a su abovedamiento se refiere: la antigua sala capítular de la Catedral de Valencia (España) y la Sala dei Baroni de Castel Nuovo en Nápoles (Italia). El hecho de escoger dos bóvedas de traza muy similar pero con gran diferencia de escala permite visualizar claramente las diferencias en los métodos de trazado de las trompas, así como aportar novedades sobre los mismos.

El método de trazado de la trompa trinervada, llevado a cabo en la sala capítular de la Catedral de Valencia, se corresponde con el denominado por Gelabert en su manuscrito como *tercerol*. Sin embargo, a raíz de esta investigación, se concluye que no es el único utilizado. El análisis de la bóveda de la Sala dei Baroni en Castel Nuovo permite afirmar que existe otro trazado diferente. Este hecho vuelve a poner de manifiesto la racionalidad constructiva gótica, puesto que un aumento de escala modifica el trazado, tendiendo a igualar la longitud de los nervios y la superficie de sus plementerías.

REFERENCIAS

- [1] E. Rabasa, J. Calvo, Gothic and Renaissance design strategies in stonecutting, in: H. Nowacki, W. Lefevre (Eds.), Creating shapes in civil and naval architecture. A cross-disciplinary comparison, Brill, Leiden-Boston, 2009, pp. 167-191.
- [2] Sebastian Aguirreche. El gótico vascongado. Dyna 72 (1997) 64-65.
- [3] J. Gómez, El gótico español en la edad moderna. Bóvedas de crucería, Valladolid University, Valladolid, 1998, pp. 76 y 37, Fig. 40.
- [4] T. Gil-Lopez, The vault of the chapel of the Presentation in Burgos Cathedral: Divine canon? No, Cordovan proportion, Nexus Network Journal 14 (1) (2012) 177-189, p. 179.

- [5] E. Rabasa Díaz. El manuscrito de cantería de Joseph Gelabert. Fundación Juanelo Turriano. Madrid, 2011.
- [6] M.T. Cortón de las Heras, La construcción de la Catedral de Segovia (1525-1607). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 1990, Vol. II, p. 2.
- [7] A. Serra, "È cosa catalana": La gran sala de Castel Nuovo en el contexto mediterráneo, Annali di Architettura 12 (2000) 7-16, p. 8.
- [8] E. Rabasa, Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX, Akal, Madrid, 2000, p. 39.
- [9] J.C. Palacios, La construcción de la bóveda de crucería. El Arte de la Piedra. Teoría y Práctica de la Cantería, Fundación Universitaria San Pablo CEU, Madrid, 2009, pp. 27-51.
- [10] T. Gil-Lopez, The vault of the chapel of the Presentation in Burgos Cathedral: Divine canon? No, Cordovan proportion, Nexus Network Journal 14 (1) (2012) 177-189, p. 177.
- [11] J. Bérchez, A. Zaragoza, Iglesia Catedral Basílica Metropolitana de Santa María, Valencia, Generalitat Valenciana, Valencia, 1995, pp. 27-28.
- [12] M. Sobrino, Entre el claustro y el aula, La aventura de la historia 163 (2012) 62-65.
- [13] M. Sánchez, La catedral de Valencia, F. Doménech, Valencia, 1987, pp. 12 y 45-48.
- [14] R. Filangieri, Rassegna critica delle fonti per la storia di Castel Nuovo, Archivio storico per le province napoletane 23 (1937) 303-305.
- [15] E. Rabasa Díaz, M. A. Alonso Rodríguez, T. Gil-Lopez, A. López Mozo, J. Calvo-López, A. Sanjurjo Álvarez. The 100 Ft Vault: The Construction and Geometry of the Sala dei Baroni of the Castel Nuovo, Naples, in: R. Carvais, A. Guillerme, V. Nègre, J. Sakarovich (Eds.), Nuts and Bolts of Construction History. A&U Picard. Paris, 2012.
- [16] H.E. Wethey, Guillermo Sagrera, Art Bulletin 21 (1939) 44-60.
- [17] J. Domenge, Guillem Sagrera, in: E. Garofalo, M.R. Nobile (Eds.), Gli ultimi indipendenti. Architetture del gotico nel Mediterraneo tra XV e XVI secolo, Edizioni Caracol, Palermo, 2007, pp. 59-93.
- [18] R. Filangieri, Castel Nuovo. Reggia angioina ed aragonese di Napoli, E.P.S.A., Naples, 1934, p. 89.
- [19] R. Pane, Note su Guillermo Sagrera architetto, Napoli Nobilissima III (1962) 151-162.
- [20] E. Rabasa Díaz, M. A. Alonso Rodríguez, T. Gil-Lopez, A. López Mozo, J. Calvo-López, A. Sanjurjo Álvarez. The Hundred Feet Vault: The Construction and Geometry of the Sala dei Baroni of the Castel Nuovo, Naples. Fourth International Congress on Construction History. Paris, 2012.