

LA CANTERÍA GÓTICA EN LA COMARCA DEL MAESTRAZGO. MODELOS VIRTUALES DE LOS SISTEMAS ABOVEDADOS DE TRES CAPILLAS OCHAVADAS

Gothic stonework in the region of maestrazgo. Virtual models of vaulted systems for three octagonal chapels

Manuel Cabeza González. Universitat Jaume I de Castellón

Alba Soler Estrela. Universitat Jaume I de Castellón

M^a Jesús Máñez Pitarch. Universitat Jaume I de Castellón

José T. Garfella Rubio. Universitat Jaume I de Castellón

RESUMEN

Entre los siglos XIII y XV, la comarca histórica del Maestrazgo, vivió un momento de gran expansión económica que se vió reflejado en el auge de la arquitectura gótica, y de forma destacada en las poblaciones de Morella y Sant Mateu por su situación estratégica entre los reinos de Valencia y Aragón. Estas dos poblaciones albergan algunas de las más relevantes construcciones de esta época de las que, sin embargo, no existe información suficiente sobre su historia y procesos constructivos. Para cubrir este vacío se propone el estudio de tres casos concretos de un mismo tipo de capilla ochavada(1) que, según las fuentes bibliográficas consultadas, podrían haber sido realizadas por el mismo maestro cantero, Domènec Prunyonosa. El objetivo consiste en determinar las propuestas de los modelos teóricos utilizados a partir de un levantamiento topográfico y fotogramétrico de cada uno de los casos seleccionados lo suficientemente preciso para poder definir el despiece exacto de los nervios y plementerías que configuran sus correspondientes sistemas abovedados.

Palabras Clave:

Levantamiento arquitectónico Fotogrametría. Escáner láser. Bóvedas de crucería.

1. INTRODUCCIÓN

En la comarca histórica del Maestrazgo, se encuentran algunos de los

mejores exponentes del gótico valenciano, entre los que cabe destacar La Iglesia Arciprestal de Sant Mateu (Sant Mateu, Castellón), la Iglesia del Convento de San Francisco (Morella, Castellón), y la Iglesia Arciprestal de Santa María la Mayor (Morella, Castellón). El estudio de los datos históricos, establece la participación en todas ellas de un mismo maestro constructor, Domènec Prunyonosa. Además dentro del dilatado proceso de construcción y de la complejidad arquitectónica de cada una de estos edificios, se ha identificado un elemento común: las capillas sobre planta de trazado octogonal.

El trabajo que se presenta desarrolla un estudio completo de este elemento en cada una de las tres iglesias, para determinar las trazas de los sistemas abovedados tanto en planta, para la situación de los distintos elementos, como en vertical, para determinar los alzados y directrices de los nervios. Esta documentación permite definir el modelo tridimensional de la bóveda de cada una de las capillas, tanto el entramado de nervios que la sustentan como las superficies generadas por las plementerías (2)

Los casos analizados son los siguientes:

Caso 1: Capilla absidial primera del lado del evangelio de la iglesia Arciprestal de Sant Mateu. (Fig. 1)

Caso 2: Capilla lateral primera del lado del evangelio de la iglesia



Fig. 1: Vista cenital de la capilla de la iglesia de Sant Mateu. Fuente: Propia

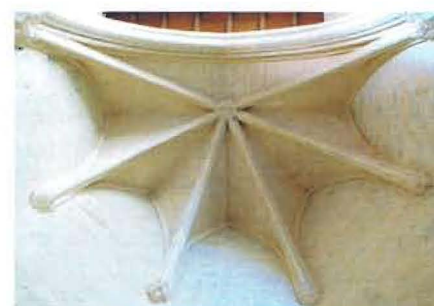


Fig. 2: Vista cenital de la capilla de la iglesia de San Francisco de Morella. Fuente: Propia



Fig. 3: Vista cenital de la capilla de la iglesia de Sta. María de Morella. Fuente: Propia

del convento de San Francisco en Morella. (Fig. 2)

Caso 3: Capilla lateral del lado de la epístola de la iglesia Arciprestal de Santa María la Mayor de Morella. (Fig. 3)

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La investigación realizada para cada uno de los tres casos estudiados se ha estructurado en tres fases de trabajo:

I- Documentación existente, imprescindible para conocer el estado de la cuestión y poder planificar de manera efectiva la toma de datos. Se realizan a partir del análisis de la bibliografía específica y la realización de visitas previas.

II- Registro de datos. El proceso de levantamiento se lleva a cabo fundamentalmente, a partir de los datos registrados con escáner láser, sistema que posibilita la obtención de la localización exacta de millones de puntos en relativamente poco tiempo, además de aportar información sobre la luminosidad y color de cada uno de ellos.

Con este proceso se obtienen tantas nubes de puntos como número de barridos se hayan ejecutado con el escáner, a partir de los cuales se puede generar una representación virtual realista del objeto de análisis. El grado de definición de este modelo depende de la densidad de puntos de las nubes y de los vacíos o sombras que se produzcan al tomar los datos.

III- Procesado de datos con software específico para el tratamiento de las nubes de puntos. Para una mayor precisión el análisis se realiza directamente sobre los datos capturados por el escáner de forma que, en esta fase, además de eliminar la información innecesaria se crean nuevas nubes de puntos a partir de la original que faciliten el estudio parcial de cada una de las partes que constituyen la bóveda: planta, nervios y plementería.

IV- Análisis y resultados. Tratando de seguir el proceso generador que conforma los espacios, a partir de los datos del levantamiento procesados, se analizan los criterios que pudieron inspirar los trazados de las capillas, profundizando en el conocimiento de la geometría del sistema de abovedamiento. Como resultado, a partir de los trazados reguladores es posible obtener un modelo tridimensional que refleje el funcionamiento del elemento estudiado.

3. DOCUMENTACIÓN EXISTENTE

La importancia de la arquitectura gótica en el Maestrazgo ha sido puesta de manifiesto, al ocupar un lugar destacado dentro de la arquitectura gótica valenciana. Las iglesias estudiadas son ejemplares destacados dentro de este contexto, y pueden encontrarse interesantes descripciones de su arquitectura acompañadas generalmente de documentación fotográfica. La documentación gráfica es más escasa aunque en algunos casos se incorporan algunos planos generales. (3)

También ha sido de gran interés consultar los estudios que relacionan los datos históricos con la construcción de las iglesias analizadas, localizándose artículos monográficos (4). Es de destacar, en

el caso de la iglesia arciprestal de Sant Mateu, la existencia de un exhaustivo estudio con importantes aportaciones sobre su arquitectura y fases de construcción (5). En cuanto al convento de San Francisco, para una adecuada interpretación es necesario conocer las obras de reconstrucción llevadas a cabo (6).

Respecto al tema concreto de los sistemas abovedados, algunos estudios incluyen trazados ideales esquemáticos, dentro de un contexto general. (7)

4. TOMA DE DATOS

Para planificar el trabajo se realizaron unas visitas iniciales, con el fin de comprobar el estado del monumento y las posibilidades de acceso con el objetivo principal de determinar los sistemas de medida a utilizar para la toma de datos, así como prever la ubicación y número de estacionamientos en el caso del escáner láser.

La toma de datos se ha llevado a cabo combinando sistemas de medida directa e indirecta, de forma que, si bien con los tradicionales flexómetros y distanciómetros de mano láser de tipo convencional se ha podido tomar las dimensiones de todos aquellos elementos accesibles, tales como las secciones de las pilastras en su base, así como

Escáner Láser	Topcon GLS 1500
Tipo	Pulsos
Color	Invisible (eye-safe laser)
Clase	Clase 1
Velocidad de escaneo	30.000 puntos/segundo
Campo de vision	V- 70° (máximo) H- 360° (máximo)
Densidad de escaneo (Resolución)	Distancia entre puntos- 6 mm at 40 m Máxima densidad de la muestra- 1mm at 100 m
Imagen digital a color	2.0 megapíxel

Fig. 4: Resumen de las especificaciones del sistema de escáner utilizado

Especificaciones del escaneo	Densidad de escaneo	Distancia máxima	Tiempo
Vistas en detalle	H - 5 mm	10 m	15-20 min
	V - 5 mm		

Fig. 5: Características de las mediciones de las mallas de paso

las distancias en planta de los distintos elementos, para poder obtener datos de las zonas superiores, sobre todo de los elementos que configuran las bóvedas que cubren los distintos capillas, fue preciso recurrir a sistemas de medición indirectos, en concreto se ha utilizado un Escáner Láser Terrestre marca Topcon tipo GLS 1500. (Fig. 4)

Para cada capilla estudiada, se ha realizado un único barrido estacionando el escáner lo más bajo posible y descentrado en planta, de forma que se obtienen suficientes puntos para definir las directrices de todos los nervios, con pequeñas zonas de sombra que pueden deducirse dadas las características de repetición y simetría de los elementos. Tanto por las propias características del equipo que tiene acotado su ángulo de visión en uno de los ejes, como por la geometría de la construcción motivo de estudio, hubiera sido preciso realizar más de un estacionamiento para obtener la totalidad de la superficie de las bóvedas. Conviene destacar que al realizarse un único escaneo por bóveda es innecesario posicionar las correspondientes dianas retro-reflectantes para el posterior enlace de los distintos barridos, lo cual reduce considerablemente el tiempo invertido en la toma de datos y su posterior procesado.

Otro factor a tener en cuenta es la densidad de malla de paso utilizada, definida en función del nivel de detalle que se requiere. En nuestro caso es preciso poder determinar tanto la forma de la superficie que generan las plementerías como la sección de los nervios sobre las que apoyan, por lo que se define una densidad grande que asegure una separación entre puntos de menos de un centímetro. (Fig. 5).

Esta toma de datos se complementa mediante la fotografía digital, utilizando una cámara fotográfica digital Nikon modelo D-80 de 10,2 Mega píxeles, con un objetivo comprendido entre los 18-135mm y con apertura focal de f/3.5-5.6., cuyas

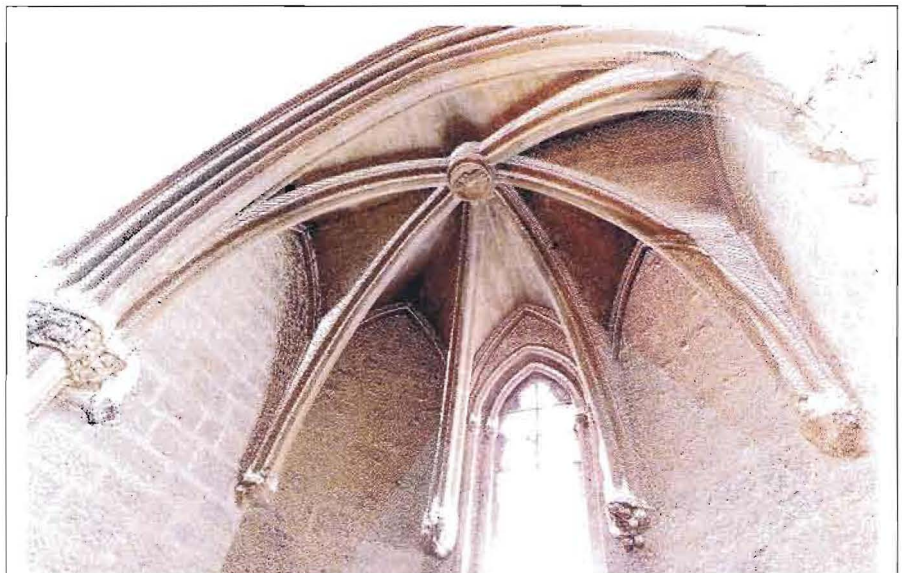


Fig. 6: Detalle de la nube de puntos de la capilla de la iglesia de Sta. María de Morella. Fuente: Propia

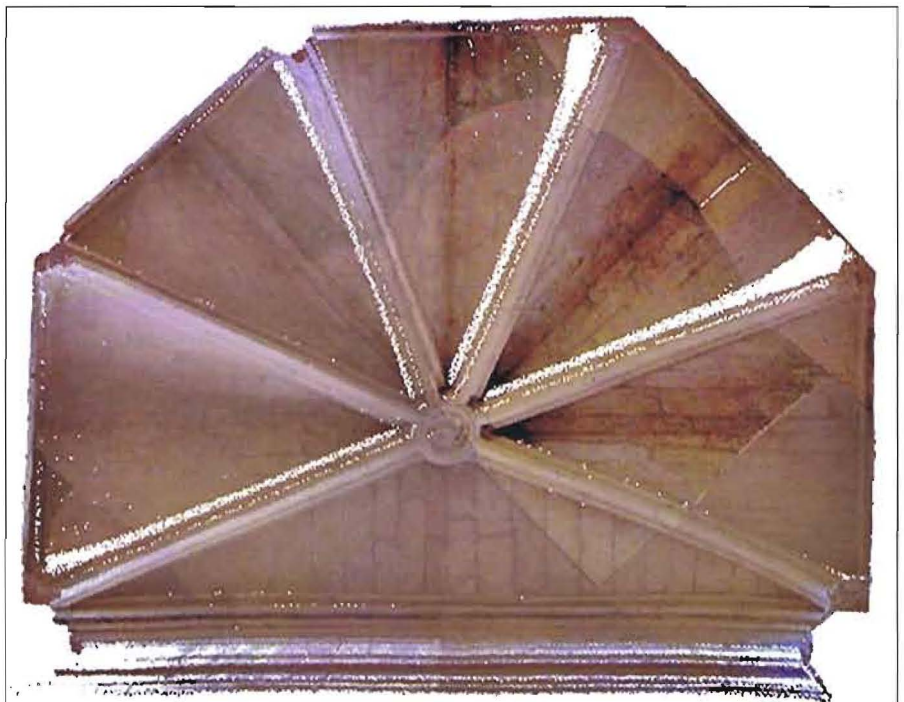


Fig. 7: Ortofoto de la planta de la capilla de la iglesia de San Francisco, obtenida de la nube de puntos. Fuente: Propia

imágenes sirvieron de apoyo a la lectura directa de los distintos elementos constructivos.

5. PROCESADO DE DATOS

Como resultado de la toma de datos se obtuvieron tres nubes de puntos de gran densidad, compues-

tas cada una de ellas por millones de mediciones individuales según un sistema de coordenadas tridimensional (x, y, z) a las que, gracias a la cámara fotográfica de alta resolución que incorpora el escáner, se les asocia su color aparente, consiguiendo así un primer modelo virtual de gran precisión y realismo de cada una de la bóvedas. (Fig. 6)

Para este proceso se ha utilizado fundamentalmente el software propio del equipo de escaneado láser. Uno de estos programas es ScanMaster de Topcon, el cual permite visualizar, medir y editar un primer modelo de datos tridimensionales a partir directamente de las nubes de puntos.

Cada uno de los tres modelos realistas obtenidos ha sido dividido en nubes de puntos en función de las geometrías a analizar, planta, nervios y plementería. De esta manera además de facilitar la lectura de cada uno de los elementos, se reduce el tamaño de los archivos resultantes, consiguiendo que sean manejables para los programas de CAD utilizados para analizar y representar los trazados y volumetrías resultantes.

Con este objetivo cada una de las nuevas nubes de puntos se exporta en formato DXF y VRML. El primero de ellos es un formato compatible con Autocad, programa desde el que se realiza el análisis y representación gráfica. El segundo formato es compatible con Meshlab, programa de tratamiento de nubes de puntos desde el que se generan ortofotos que se exportan en formato JPG y que ayudan y enriquecen el trazado de la planimetría tradicional: plantas, alzados y secciones. (Fig. 7)

6. RESULTADOS. TRAZADOS REGULADORES Y GEOMETRÍA SUPERFICIAL

Tratando de conocer el proceso generador que conforma los espacios, a partir de los datos obtenidos mediante el levantamiento, se analizan los criterios que pudieron inspirar los trazados de las capillas, profundizando en el conocimiento de la geometría del sistema de abovedamiento.

Nos situaremos en el lugar del maestro gótico y su contexto técnico a la hora de definir el trazado de los nervios, para lo que se utilizarían dibujos que serían esquemáticos y al mayor tamaño posible. Tenemos noticias a través de contados casos (8) que indican que solían realizarse en la propia iglesia o alguna era próxima. También son conocidos diversos pergaminos de maestros españoles que nos permiten analizar en detalle los trazados y el pensamiento que los guía (9)

En planta representarían la proyección horizontal de los ejes de los nervios, definida entre las claves y los vértices del polígono de referencia. A partir de la planta tra-

zarían la "elevación", proyección frontal en verdadera magnitud, definiendo las curvaturas (radios) y posición de los centros. Pero para poder relacionar con el trazado en planta es necesario definir la sección de todos los arcos y nervios con sus dimensiones y molduras, es decir, la plantilla de testa o "el perfil", posicionándolo con sus dimensiones reales y así poder determinar la curvatura del intradós.

La construcción de los paños de plementería se realizaría en sentido ascendente desde las jarjas, colocando hiladas sucesivas de elementos de cantería hasta completar la superficie comprendida entre los nervios que le sirven de apoyo.

La diferencia de longitud entre estos arcos era absorbida por una última hilada en forma de cuña, encargada además de resolver las diferencias en el encuentro de las dos superficies que configuran cada sector o bien alternado este tipo de hiladas dentro de los paños (10).

6.1. Las trazas horizontales

A partir del levantamiento se representa esquemáticamente la proyección horizontal del eje de los nervios y arcos, las claves. Se busca el polígono regular teórico que serviría de referencia para posicionar

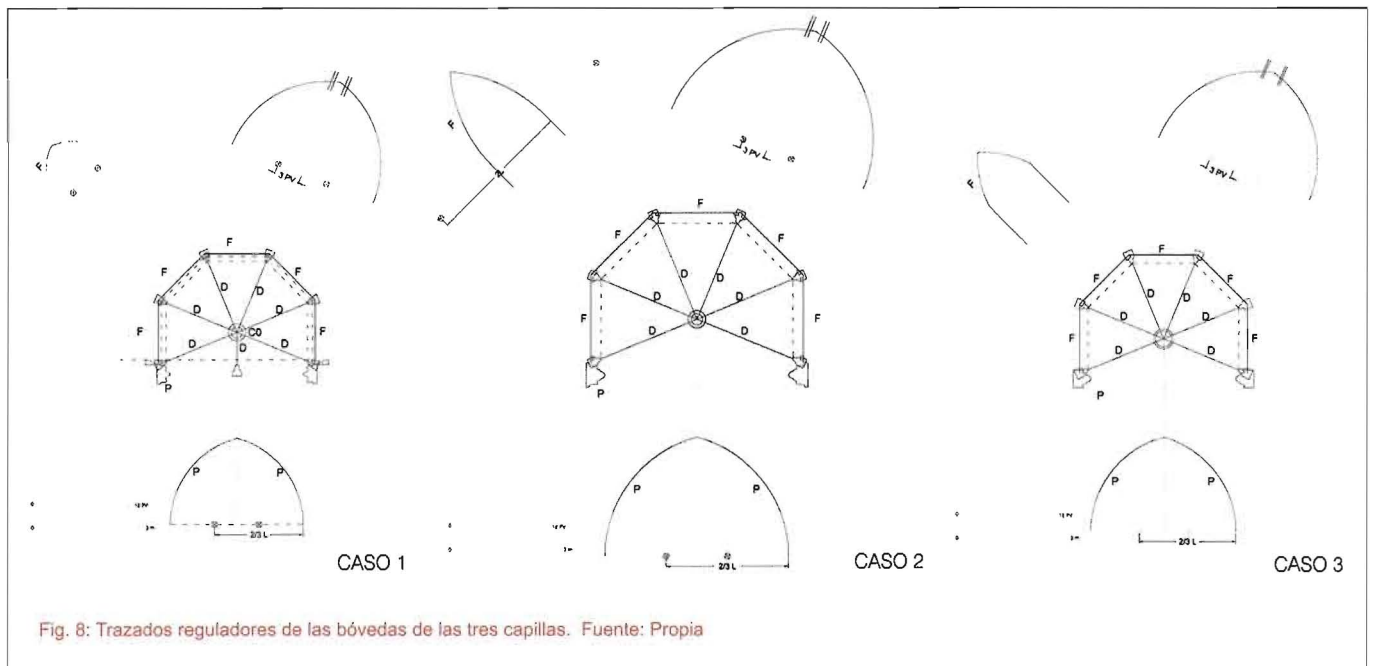


Fig. 8: Trazados reguladores de las bóvedas de las tres capillas. Fuente: Propia

los elementos constructivos del sistema abovedado.

Los tres casos comparten un mismo trazado horizontal, al estar formadas por cinco lados pertenecientes a un octógono regular situando en el centro del mismo la clave polar donde concurren los seis nervios diagonales.

Los casos 1 y 2 tienen una dimensión muy similar, con un ancho interior de la capilla de 18 palmos valencianos, mientras que en el caso 3 las dimensiones son mayores, y se corresponden con 24 palmos.

6.2. Las elevaciones

Con los datos obtenidos a partir del levantamiento mediante escáner láser se realiza un estudio de los distintos nervios y sus criterios de trazado, buscando los trazados ideales según la hipótesis inicial de un arco de circunferencia con centro situado a la altura de la imposta.

Para los tres casos estudiados, los arcos perpiños de acceso (P) tienen un intradós de directriz apuntada con sus centros a la altura del arranque y radio igual a $2/3$ de la luz.

Respecto a los nervios diagonales (D), el trazado que mejor se ajusta a la obra construida no se corresponde con partes enteras de la luz de dichos arcos, pero se ha en-

contrado un criterio común a las tres capillas que consiste en situar el centro a una distancia de 3 palmos valencianos del centro, dando lugar a arcos ligeramente apuntados.

Sin embargo, el trazado de los formeros (F) difiere notablemente en los tres casos estudiados.

6.3. Plementerías

Por último, también a partir de los datos del levantamiento mediante escáner láser, se realiza el estudio de las distintas superficies que cubren cada una de las bóvedas, determinando la situación y forma del arranque, así como la forma y dirección de los rampantes de cada uno de los sectores que conforman la plementería.

Si bien se aprecia que en los tres casos el rampante de todos los tramos es recto, no ocurre lo mismo con su dirección, ascendente hacia la clave en los casos de Sta. María y San Francisco de Morella y descendente en el caso de Sant Mateu a excepción del tramo que conecta con el perpiño que sí invierte su inclinación.

Esto es debido a que en los dos primeros casos tanto el arco perpiño como los formeros se encuentran más bajos que la clave central, mientras que en el tercero ocurre lo contrario con la excepción comentada sobre el arco perpiño.

Respecto al arranque de la plementería, en todos los casos los arcos formeros están peraltados, siendo el caso de Sant Mateu el más llamativo con más de dos metros desde la línea de imposta hasta alcanzar la cota adecuada, formalizando una pared plana sobre el nervio diagonal (11). Con esta disposición se facilitaría la ejecución del paño pues, una vez ejecutados los nervios, el uso de elementos auxiliares de apoyo estaría limitado a la colocación de las últimas hiladas.

7. MODELOS VIRTUALES

Como resultado final se ha desarrollado el modelo teórico de cada una de las bóvedas analizadas. Para ello se han representado tridimensionalmente los trazados reguladores deducidos, relacionando las elevaciones con sus correspondientes trazas horizontales con lo que se obtiene una representación alámbrica del sistema de nervios de las bóvedas.

A partir de esta representación espacial ha sido posible realizar las dos partes que dan lugar a la volumetría ideal de estas construcciones, nervios y plementerías.

Para completar la estereotomía del sistema de nervios ha sido preciso obtener previamente la sección de cada uno de ellos, también directamente de las nubes de puntos

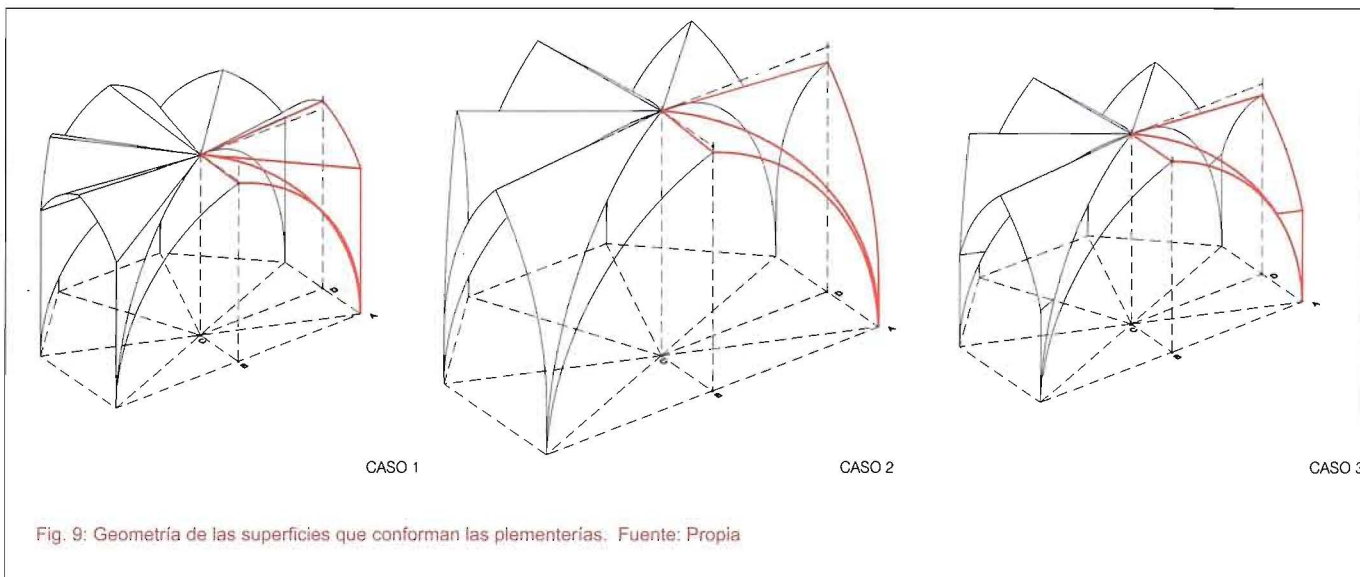
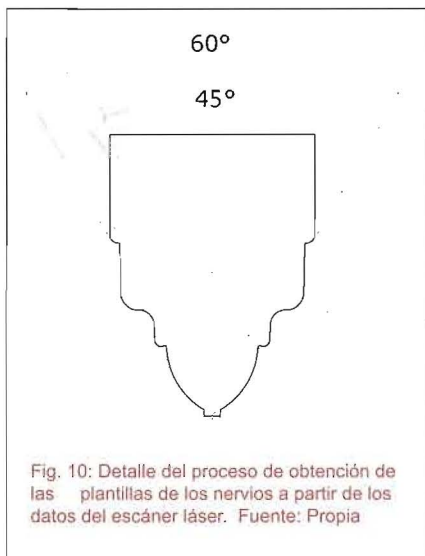


Fig. 9: Geometría de las superficies que conforman las plementerías. Fuente: Propia



obtenidas en el levantamiento (Fig 10), situando cada una de las plantillas en la posición de arranque del nervio correspondiente, determinada por las trazas horizontales y desplazándolas a lo largo del arco definido en las elevaciones, tal y como hubieron de ser construidos, hasta encontrarse con la clave, en el caso de los nervios ojivales, o con su simétrico en el caso de formeros y perpiaños.

Por su parte, la envolvente superficial ha sido representada sector por sector, generando las sucesivas superficies regladas a partir de los arcos que las contienen, diagonal y perpiaño o diagonal y fornero, e incluyendo, en los casos correspondientes, las superficies planas a las que dan lugar las mencionadas paredes verticales que se elevan sobre los nervios diagonales.

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la aplicación de la tecnología láser para la toma de datos y levantamiento de construcciones históricas se puede considerar como la alternativa idónea en cuanto a precisión y rapidez se refiere, posibilitando la creación de una base de datos gráfica de alta fidelidad con la realidad.

En este sentido, los modelos generados sobre los casos estudiados pueden ser considerados como la parte inicial del proceso de la defi-

nición completa de los trabajos de cantería, ya que a partir de ellos es posible extraer la forma exacta de cada una de las dovelas que conforman los arcos, especialmente de sus puntos singulares, enjarjes y claves, así como también de las plementerías. Además, la exhaustividad y precisión de la información obtenida ha permitido materializar estos modelos virtuales mediante impresión 3D, generando así una herramienta más para el análisis de los sistemas de abovedamiento.

De este modo, la comparación de los resultados pone de manifiesto grandes similitudes entre los trazados de los nervios de los tres casos, al mismo tiempo que permite observar las diferencias entre soluciones utilizadas para las plementerías, en concreto la distinta forma de resolver los estrechos tramos iniciales provocados por la proximidad de los nervios de apoyo, destacando como caso singular, las costillas verticales utilizadas en la capilla de Sant Mateu.

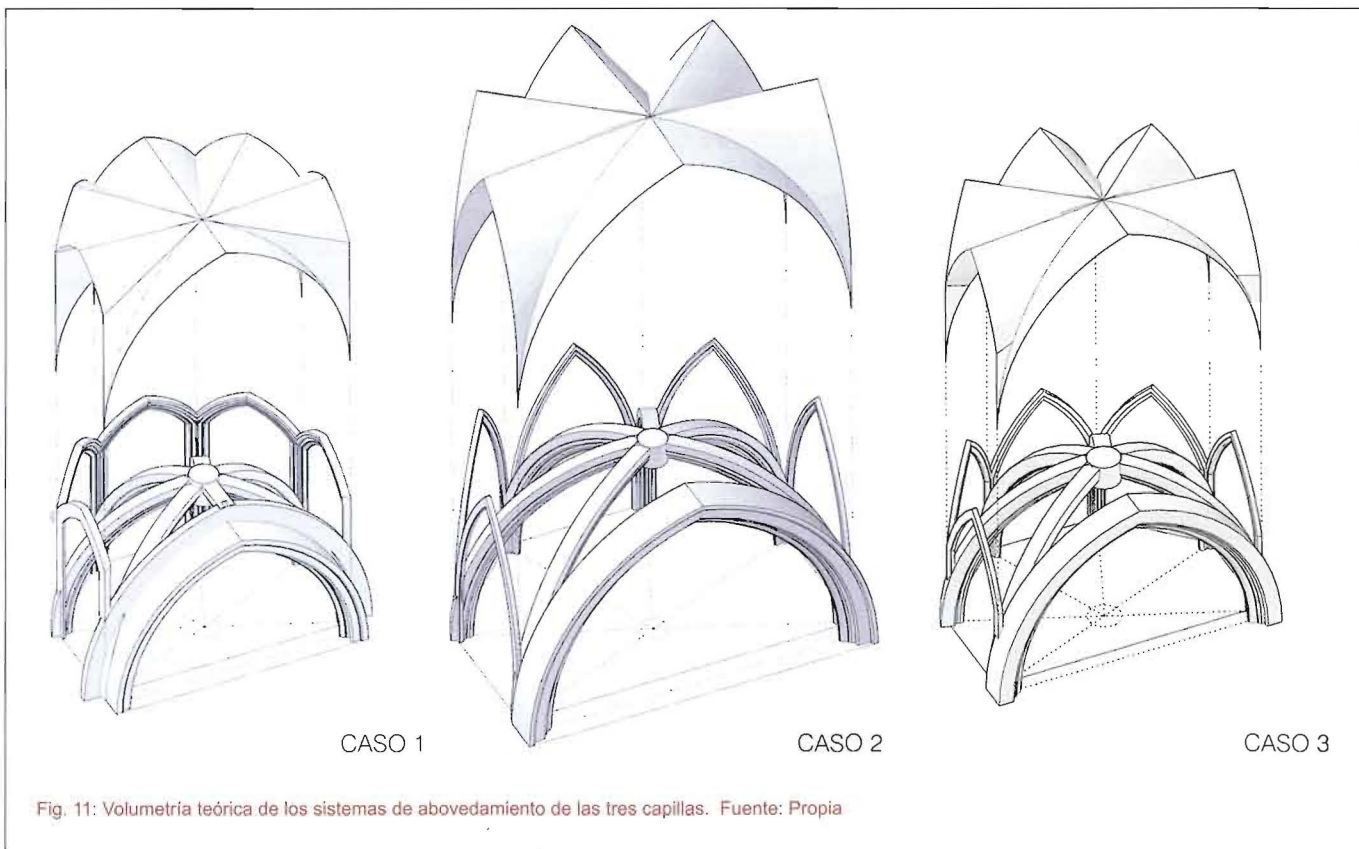


Fig. 11: Volumetría teórica de los sistemas de abovedamiento de las tres capillas. Fuente: Propia

9. NOTAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Nomenclatura utilizada por **Zaragozá Catalán, Arturo** en *Arquitectura gótica valenciana siglos XIII-XV*. Valencia. Generalitat Valenciana. ISBN 9788448238995, para definir las capillas sobre planta de trazado octogonal.
2. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación "*Metodologías y técnicas aplicadas a la investigación arquitectónica del gótico mediterráneo. Estudio de casos*" (Referencia: P1-1A2010-18). Financiado por la Fundació Caixa Castelló-Bancaixa y con la colaboración de Juan Carlos Sáez como becario del proyecto.
3. **Zaragozá Catalán, Arturo**. *Arquitectura gótica valenciana siglos XIII-XV*. Valencia. Generalitat Valenciana. ISBN 9788448238995
4. **Alanyà i Roig, Josep**. *Urbanisme i vida a la Morella Medieval (segles XIII-XV)*. Morella. Ajuntament de Morella- Associació d'Amics de Morella i Comarca.
5. **Zaragozá Catalán, Arturo**. *La iglesia arciprestal de Sant Mateu*. Castellón. Centro de Estudios del Maestrazgo. Boletín nº73.
6. En relación con el *convento de San Francisco de Morella* queremos agradecer especialmente las explicaciones de **Francisco Grande Grande**, arquitecto conservador del convento, sobre las obras llevadas a cabo.
7. **Navarro Fajardo, Juan Carlos**. *Bóvedas de la arquitectura gótica valenciana. Traza y Montea*. Valencia. Universitat de València.
8. **Ruiz de la Rosa, José Antonio**. *Traza y simetría de la arquitectura en la antigüedad y Medievo*. Sevilla. Publicaciones de la universidad de Sevilla.
9. **Rabasa Díaz, Enrique**. *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX*. Madrid. Akal- textos de arquitectura
10. **Palacios Gonzalo, José Carlos**. *La Cantería Medieval. La construcción de la bóveda gótica española*. Madrid. Editorial Munilla-Lería.
11. **Ward, Clarence**. *Medieval church vaulting*. London. Princeton Monographs in Arts and Archaeology V