

Geometrías concertadas. Las cabeceras de las iglesias gótico-mudéjares de la ciudad de Sevilla

Juan Carlos Gómez de Cózar
Carmen Rodríguez Liñán
Paloma Rubio de Hita

Tras la conquista de Sevilla, en 1248 por Fernando III, durante su reinado y los posteriores de Alfonso X y Pedro I, se construyen templos por toda la ciudad. Una serie de causas provocan que estas nuevas edificaciones, muchas erigidas sobre construcciones musulmanas, demostrando su valor emblemático, se construyan según las directrices de lo que posteriormente se denominó *mudéjar sevillano*.

En primer lugar, los materiales propios del lugar hacían difícil la tarea de construir espacios abovedados, ya que no había piedra de buena calidad y lo que abundaba era el ladrillo y la madera. Por otro lado, los modos de hacer del lugar, ejercitados en carpintería y albañilería, necesitaban un tiempo para adaptarse a los sistemas abovedados. Además, dada la despoblación a la que se vieron sometidos los territorios conquistados, los monarcas permitieron que la población musulmana, en muchos casos, permaneciera en las ciudades, por lo que los artífices de las obras, casi siempre, tenían esta procedencia. Esta mezcla de culturas enriquece a los templos que se construyen. En todos los casos, se elige la solución abovedada para las cabeceras de las iglesias y las naves se resuelven con cubiertas de madera.

El tipo de bóveda elegido para la solución de cabeceras es de nervaduras, con diversas variantes, como ya se verá. De las tres naves, normalmente, la principal se cubre con estructuras de *par y nudillo* y las colaterales a *la molinera*.

La figura 1 representa en planta la mayoría de las cabeceras, que hoy se encuentran, en su estado actual. Todas están construidas entre finales del siglo XIII

y finales del XIV. Hay un hecho diferenciador en cuanto a la forma que hoy presentan; en 1356, un terremoto daña muchas de estas cabeceras y son reedificadas como es el caso de San Miguel, Omnium Sanctorum, Santa Marina y San Román.

GEOMETRÍAS UTILIZADAS Y ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Todas las cabeceras analizadas presentan una forma poligonal de cinco lados, basada en el octógono, tras uno o dos tramos de bóvedas de crucería de planta rectangular, construidas con fábrica de ladrillo y mortero de cal. En la mayoría de los casos, tanto las claves del tramo poligonal como las de los tramos rectangulares están a la misma altura, por lo que los nervios ojivos, no son semicírculos completos.

De igual modo, esta desproporción también se evidencia en los arcos formeros, de bastante menos luz que los perpiaños que, para llegar a una altura de acuerdo, se peraltan. Su geometría, aunque hay variedad, suele responder a arcos apuntados equiláteros peraltados.

Por lo general, los arcos perpiaños se resuelven con arcos apuntados trazados desde el tercer punto. Todas las claves están resaltadas. Las nervaduras, resueltas en piedra, confluyen en un capitel al nivel de arranque de los arcos formeros, perpiaños y ojivos, que descansa sobre un pilar, también de piedra, de débil sección.

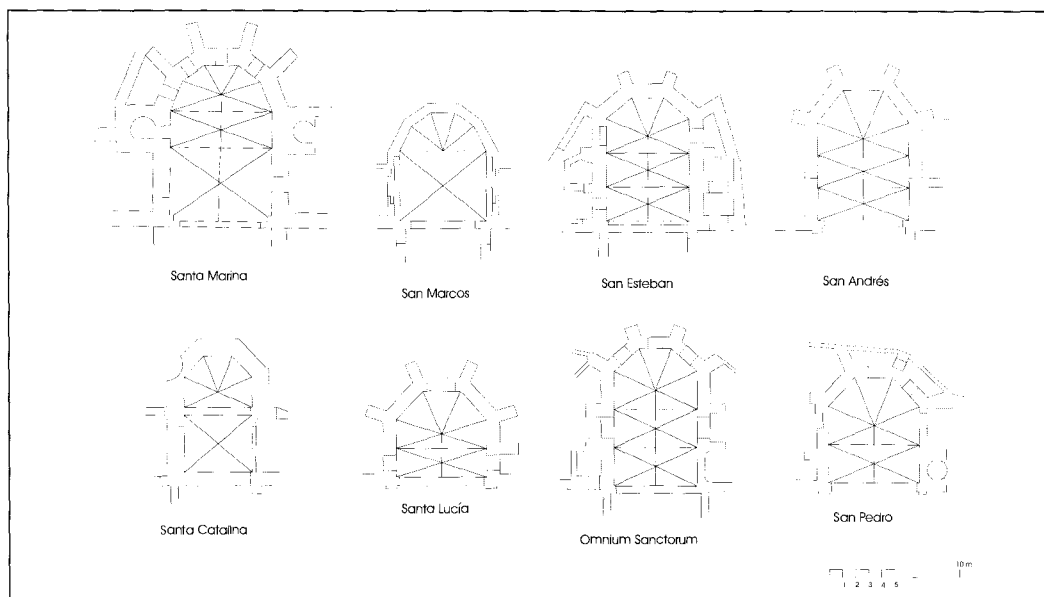


Figura 1

La altura de las claves de los arcos formeros dista de la de los ojivos alrededor de $1/4$ de la altura de éstos, por lo que el espinazo que las une es curvo y, en consecuencia, la superficie de los tímpanos que se trazan entre los formeros y los ojivos, responde más a una *superficie de traslación* de esta curva sobre los arcos de apoyo que a una *reglada*, como ocurre en el resto de casos. Este aspecto será predominante en su comportamiento mecánico.

Por último, destacar que en los casos en los que hay continuidad entre el tramo poligonal y los rectangulares, hay un nervio de espinazo, horizontal, uniendo las claves de todos los tramos.

Para el análisis los ejemplos destacados se han dividido en tres grupos:

Grupo I. Continuidad entre el tramo poligonal y los rectangulares

A este grupo pertenecen las cabeceras de St. Marina (figura 2), S. Andrés, S. Esteban, St. Lucía, S. Pedro y Omnium Sanctorum. Dentro de este grupo hay diferencias entre las que presentan uno, como S. Pedro y St. Lucía, o, como el resto, dos tramos rectangu-



Figura 2

lares. Para el análisis, se han levantado varios modelos utilizando diferentes geometrías para los arcos formeros (figura 3).

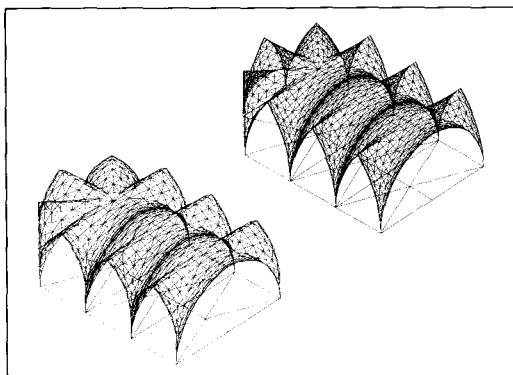


Figura 3

Para el análisis mecánico, se ha elegido la cabecera de St. Lucía (figura 4) que sólo presenta un tramo rectangular. Aunque en la actualidad esta iglesia no se conserva, su forma sí es representativa. Como la cubierta, en este caso, está resuelta con estructura de madera, independiente de las bóvedas, sólo se considerará el estado de cargas de peso propio.

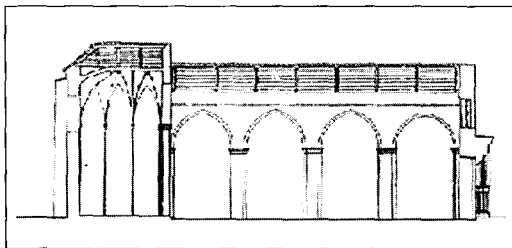


Figura 4

Siguiendo las directrices que marcan las hiladas que componen el plemento, se ha elaborado el modelo de cálculo que muestra la figura 5. A partir de un análisis con el programa de cálculo desarrollado, que estudia las deformaciones y los esfuerzos en el plemento en estado de membrana, se obtienen los siguientes resultados. La geometría en la que se basa el

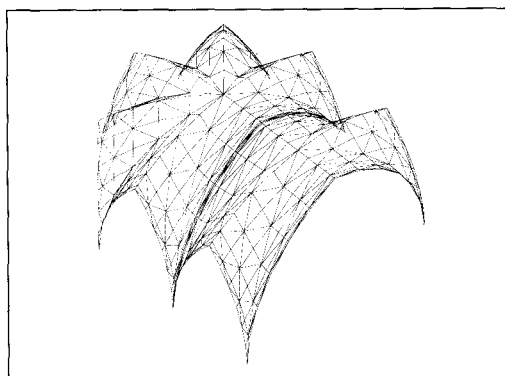


Figura 5

proceso constructivo de la bóveda se compatibiliza perfectamente en planta. Sin embargo, su levantamiento, como hemos visto, provoca discontinuidades en las alturas de las claves, que se han resuelto curvando los espinazos de los arcos formeros. Este hecho la generación de superficies de doble curvatura en la poligonal y en todos los tímpanos que se apoyan en los formeros, provoca (figura 6) que estos elementos sean muy poco deformables.

Sin embargo, los tramos interiores de bóveda que apoyan entre los ojivos, sobre todo el primer tramo basan su geometría en un arco apuntado trazado desde el tercer punto, que debido a la angulación en planta, se apoyan en luces bastante mayores que las de los tramos que proceden de los formeros. Es por ésto por lo que en esta zona de la bóveda, se produ-

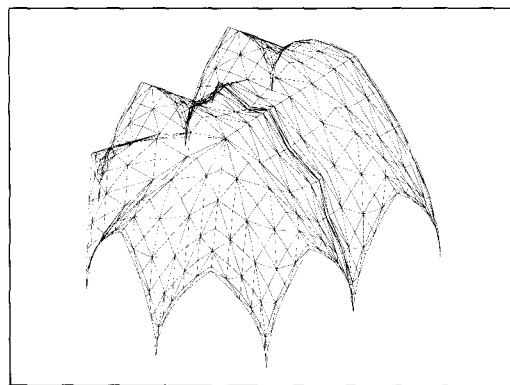


Figura 6

cen las mayores deformaciones tal como se observa en la figura 6. Tal como observamos, conforme disminuye la luz de apoyo, el efecto alternado de compresión/tracción se disipa. Este efecto estudiado anteriormente, unido a las reacciones del tramo poligonal, provoca que los ojivos interiores sufran desplazamientos horizontales, cada vez mayores conforme se acercan a los apoyos en donde concurren los tramos del plemento de mayor luz (figura 7). Cuando la deformada se aleja de su lugar original provocará compresiones o tracciones, según sea la dirección de su movimiento en los tramos anexos de plemento.

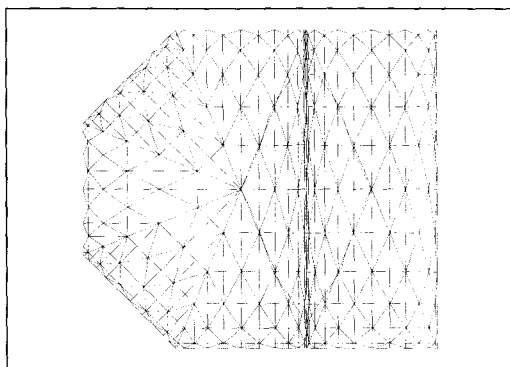


Figura 7

Por último, la figura 8 representa los empujes horizontales que provoca esta bóveda en todo su perímetro apoyado.

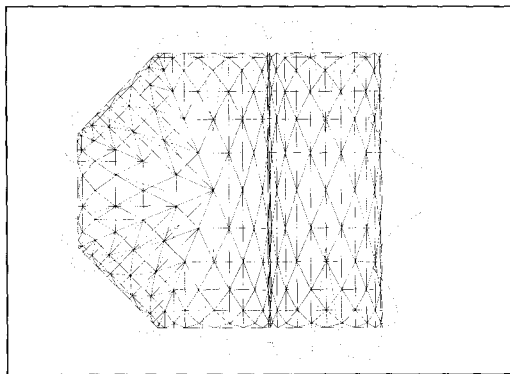


Figura 8

Puede observarse cómo en los tramos poligonales los empujes se concentran en una zona igual a 1/4 de la luz de los arcos formeros, por lo que puede afirmarse que los esfuerzos se van a canalizar por las nervaduras hasta los apoyos, estando la mitad restante de plemento traccionada en la dirección perpendicular al apoyo. En el resto de tramos, este efecto no es tan evidente, y la zona de empujes aumenta considerablemente. En el apoyo del último perpaño de la bóveda, aparece un empuje considerable en su clave, canalizado a través del espinazo horizontal, como consecuencia del desequilibrio existente en el encuentro del tramo poligonal con el rectangular.

Por lo tanto, una vez analizado el ejemplo, puede considerarse que el análisis en estado de membrana es suficiente, ya que evidencia perfectamente las zonas de la bóveda más afectadas.

Estas geometrías, basadas en plantas rectangulares y plementos de doble curvatura en la dirección transversal, han sido muy utilizadas. Los problemas encontrados en los tramos de plemento interior, pueden resolverse rigidizando éstos con más nervios y aumentando su carga en la clave.

Grupo II. Continuidad entre el tramo poligonal y los rectangulares con diferencias de geometría

A este grupo pertenece el caso singular de la cabecera de la iglesia de San Marcos. Tal como se aprecia en la figura 9, la cabecera se resuelve la poligonal con una bóveda de cinco paños, que se une con una bóveda de crucería de planta rectangular. Al contrario de lo que ocurría en los casos anteriores, las nervaduras apoyan en ménsulas al nivel de los arranques de los arcos principales.

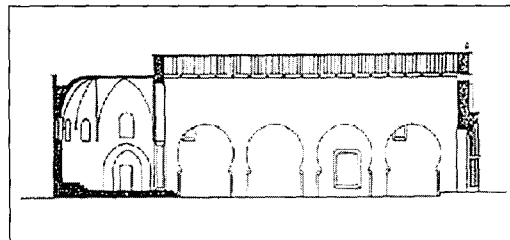


Figura 9

Puede observarse que, para compatibilizar la altura común de las dos geometrías de acuerdo, se han peraltado los arcos de forma de la bóveda rectangular, aunque todos los tramos de plemento de las dos bóvedas parten prácticamente de la misma altura. En este caso, no existe cubierta de madera y sí una azotea construida sobre la bóveda. Para que los resultados sean comparables al caso anterior, sólo se han considerado cargas debidas al peso propio. Siguiendo el mismo esquema anterior, se ha elaborado el modelo de cálculo que muestra la figura 10.

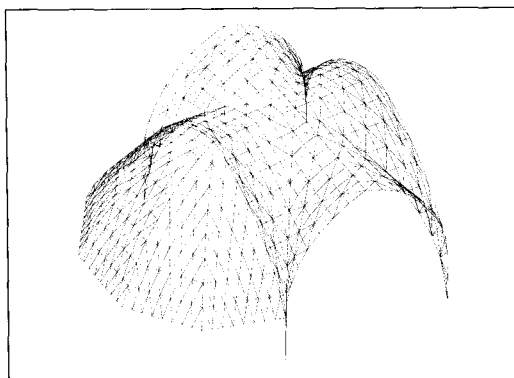


Figura 10

Utilizando también un análisis en estado de membrana, se han obtenido los siguientes resultados.

Del mismo modo que ocurría con el ejemplo anterior, la continuidad planteada entre una bóveda de crucería, basada en el arco apuntado, y otro tipo de bóveda, plantea resultados curiosos. El comportamiento de la bóveda de paños es bastante uniforme dada su rigidez y su rigor geométrico, no se ve afectado por la bóveda adjunta. Tanto su estado de tensiones como de deformación es bastante cupuliforme y aparecen tracciones según la dirección horizontal hasta una altura de $1/6$ de la total. A su vez, su borde de contacto con la otra bóveda es bastante rígido, y plantea un apoyo casi indeformable, para la otra bóveda.

La bóveda de crucería, basada en geometrías de arco apuntado trazado desde el tercer punto, en las dos direcciones, plantea un comportamiento similar al que tendría si estuviera aislada.

Su estado de deformación es consecuencia de su geometría, como podemos observar en la figura 11,

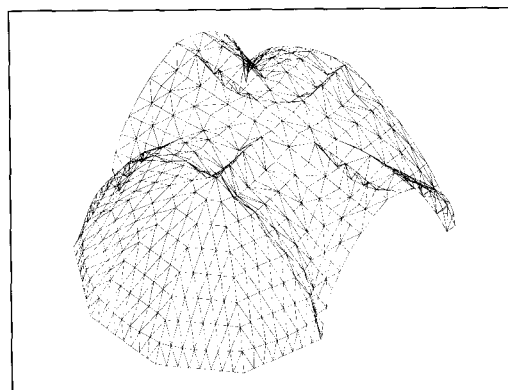


Figura 11

en donde se representan los movimientos totales y podemos apreciar como las claves tienden a levantarse. Estos movimientos siempre son más acusados en la dirección transversal, en la que la luz de apoyo es más larga. En el estado tensional, sin embargo, la conexión con una geometría diferente, sí tiene influencia. Prácticamente, todas las hiladas que están en contacto con las ojivas están traccionadas, fenómeno que tiene su influencia en las reacciones en el contorno.

Grupo III.

Discontinuidad entre el tramo poligonal y los rectangulares con diferencias de geometría

A este grupo pertenece el ejemplo singular de la cabecera de la iglesia de Santa Catalina. Presenta una planta muy similar al caso anterior, pero con la poligonal resuelta con una bóvedas de nervaduras, de tímpanos curvados basados en la geometría de la semicircunferencia, (figura 12). Esta poligonal, apoya en un arco apuntado, trazado desde el tercer punto, sobre el que, por el otro lado, apoya una bóveda de crucería. La aparición de este arco toral de transición, provoca que ambas bóvedas se tracen y construyan de modo independiente.

En este caso, se va a analizar el tramo poligonal, ya que el cuadrado ha sido estudiado en otras ocasiones. Para el estado de cargas se ha considerado su estado real, que corresponde sólo a su peso propio. El modelo desarrollado para el cálculo se representa en la figura 13.

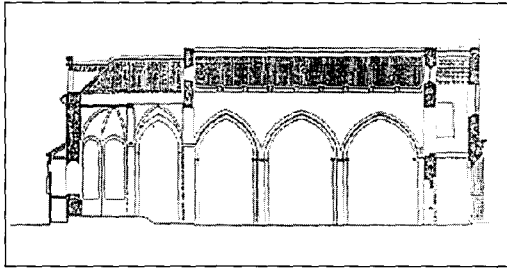


Figura 12

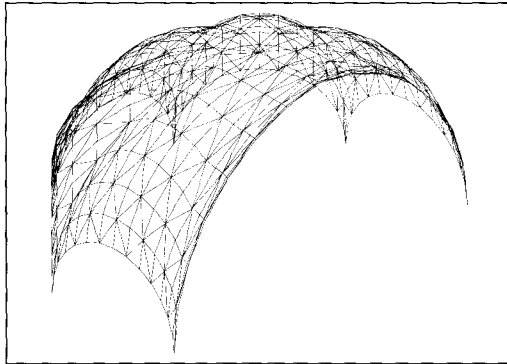


Figura 13

Utilizando también un análisis en estado de membrana, se han obtenido los siguientes resultados.

El estado de deformación obtenido evidencia la rigidez de los tímpanos poligonales, basados en la geometría del semicírculo. El único tímpano que existe basado en el arco apuntado, apoyado en el arco toral, muestra el comportamiento típico de movimientos en la clave (figura 14), que evidencian este tipo de estructuras.

Esta es una estructura prácticamente comprimida en las dos direcciones y sólo presentan tracciones en la dirección horizontal, a alturas muy bajas, del mismo orden que en el ejemplo anterior y en la clave común a todas las nervaduras. La figura 15 muestra el estado de reacciones horizontales.

CONCLUSIONES

Hemos podido constatar como en todos los casos analizados, cabeceras de templos parroquiales, se sa-

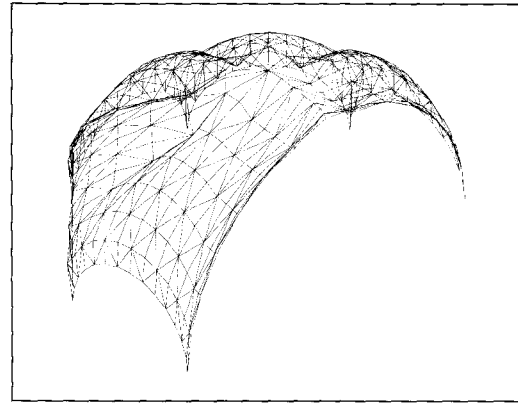


Figura 14

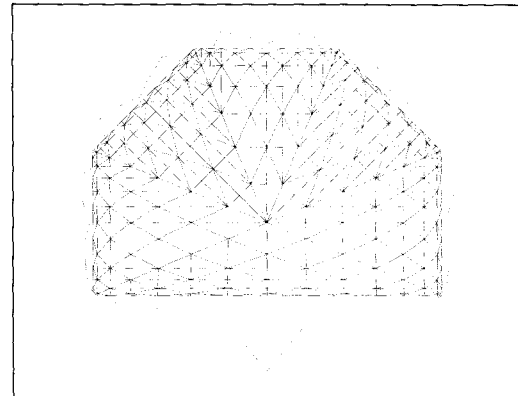


Figura 15

crifica el rigor geométrico frente a la facilidad de trazado de las bóvedas. Ésto, evidentemente, no significa que estén mal resueltas, simplemente en cada caso se ha buscado, sistemáticamente, la solución más sencilla de trazar, ya sea con geometrías basadas en superficies regladas o de traslación, utilizando siempre a las nervaduras como elementos directores.

Si se piensa en resolver estas cabeceras, con errores de trazado arrastrados desde la fundación de sus muros, utilizando otro tipo de bóvedas, aparecerían problemas irresolubles con las técnicas de la época. Es aquí, desde nuestro punto de vista, donde reside la potencialidad de estas bóvedas, en su capacidad de adaptación a cualquier situación

geométrica, por complicada que sea. Sin embargo, lo anterior, la facilidad constructiva, no tiene que implicar en todos los casos un correcto comportamiento mecánico. Si se entiende por correcto, en obras de fábrica, la ausencia de tracciones y minimización de empujes.

Hemos podido observar como todas las bóvedas que basan el trazado de su plemento a partir de arcos de forma de geometría apuntada, sufren tracciones perpendiculares al perímetro, que provocan que parte del plemento se separe de éste. Este aspecto cambia por completo la configuración geométrica y mecánica de la bóveda, pero no implica su colapso, simplemente la aparición de fisuras, que pueden dar origen (estamos en techos y cubiertas) a otras lesiones que degradarán la fábrica. Por otro lado, concertar geometrías distintas, ha provocado en algunos casos, la aparición de reacciones no compensadas, que tendrán que ser absorbidas en el perímetro.

BIBLIOGRAFÍA

- Gómez de Cózar, J. C.: *Análisis de estructuras espaciales de fábrica (bóvedas y cúpulas) en construcciones históricas*. Beca resolución 19/05/ 1998, de la Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo. Ministerio de Fomento.
- Hernández, J.; Sancho, A.; y Collantes, F.: *Catálogo arqueológico y artístico de la provincia de Sevilla*. Diputación de Sevilla. Sevilla, 1939, 1943, 1951 y 1955.
- Heyman, J.: *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Madrid, 1995.
- Morales, A.J.; Sanz, M.J.; Serrera, J.M. y Valdivieso, E.: *Guía artística de Sevilla y su provincia*. Excma. Diputación provincial de Sevilla. Sevilla, 1981.
- Quintas, V.: *Estructuras especiales en la edificación. Análisis y cálculo*. Editorial Rueda. Madrid, 1996.
- Rodríguez Liñán, C.; Gómez de Cózar, J. C. y Rubio de Hita, P.: «Sobre plementos, témpanos y nervaduras. Bóvedas resistentes y elementos decorativos», en *II Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. La Coruña, octubre de 1998.