

Nervaduras, plementos, témpanos y plegaduras. Bóvedas resistentes y elementos decorativos

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

El contenido de este artículo forma parte de una investigación sobre bóvedas de fábrica en construcciones históricas. Sobre todo en aquellas que poseen nervaduras, entendidas como aristas reforzadas, resaltadas, apeos permanentes, etc ... Históricamente el trabajo se centra en la Baja Edad Media y geográficamente en el sur de Europa, más concretamente en el *Reino de Sevilla*.

Por lo tanto, el ámbito histórico elegido, se superpone a los periodos artísticos denominados Mozárabe, Románico, Gótico y Mudéjar.

Si bien, desde un punto de vista teórico, las características que distinguen estos estilos están establecidas, en la práctica, lo normal es que, todas o parte de ellas, aparezcan superpuestas en el mismo edificio. Esto añade una componente de experimentación en las obras que se analizarán, que es lo que la investigación intenta poner de manifiesto, centrando el estudio en sistemas constructivos y comportamiento mecánico. Estamos en un periodo donde aparece una definición constructiva nueva, provocada por el medio (tecnológico, social, religioso, económico) que se va abriendo camino obra a obra.

El estudio comienza en el siglo X, con las primeras bóvedas nervadas y termina en el siglo XIII con las primeras bóvedas góticas construidas en Sevilla en la Iglesia de Santa Ana.

CONSTRUCCIÓN DE BÓVEDAS NERVADAS EN ESPAÑA. EVOLUCIÓN DE UN MODO DE CONSTRUIR

Construir con nervaduras, propone ciertas ventajas. Los nervios, de fácil trazado, permiten adaptar el ple-

mento con economía de medios auxiliares. Históricamente aparecen dos sistemas que utilizan nervios, aquellos que se adaptan a la curvatura del plemento, ayudando a conformarla y mantenerla (arcos fajones o perpiños) y aquellos que imponen cambios de curvatura, inflexiones o plegaduras en la superficie del plemento (bóvedas de crucería). Ambos sistemas coexistirán durante el periodo que se estudia. Sin embargo, las bóvedas nervadas, no han sido las únicas que han impuesto plegaduras a las superficies portantes. Mucho antes, las bóvedas de arista romanas lo hicieron. La evolución que se describe a continuación, expone como se produce la síntesis entre bóveda de arista romana y bóveda de nervaduras.

Leopoldo Torres Balbás, esgrime la teoría de que hay un periodo (S. XI-XII) en España, antes de que aparezcan influencias francesas, en el que aparecen bóvedas con nervios que se cruzan el clave, que se construyen con influencia de las bóvedas hispanomusulmanas y no de las francesas.

Primera Fase. Siglo X. Califal, Mozárabe.

Las primeras bóvedas nervadas que aparecen en nuestro país y de las que hoy tenemos constancia, aparecen en el S. X (962-965), en la Mezquita de Córdoba en la ampliación de al-Hakam II. Sobre planta cuadrada aparecen parejas de nervios, de sección rectangular, que se adaptan a una poligonal inscrita en el cuadrado, normalmente ochavada, sobre las que se construye el plemento. Éste, responde a una geome-

tría irregular resultado de apoyarse en los nervios y en el perímetro de la bóveda, plano o arqueado. (Fig. 1). De este mismo tipo, alternando nervios que comparten el arranque, tenemos la bóveda del Patio de Banderas en el Alcázar de Sevilla. (Fig. 2).

Casi al mismo tiempo, aparecen dos ejemplos en Toledo, la Ermita del Cristo de la Luz y la Mezquita de las Tornerías (Fig. 3 y 4). Ambas incluyen un amplio catálogo de formas, en las que incluyen bóvedas cupuliformes con nervios resaltados, que forman

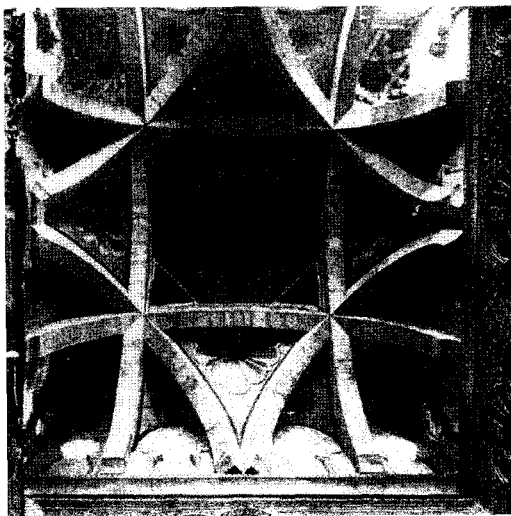


Figura 1
Bóveda de la Capilla de Villaviciosa. Mezquita de Córdoba

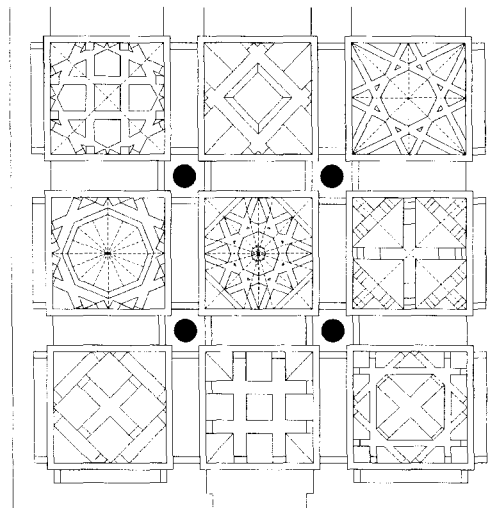


Figura 3
Bóvedas de la Mezquita del Cristo de la Luz (Toledo)

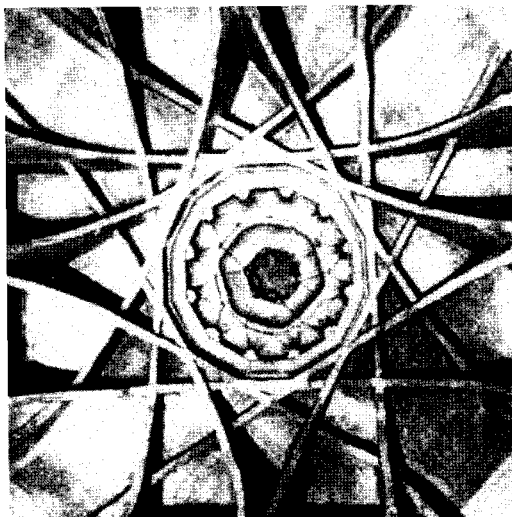


Figura 2
Bóveda del Patio de Banderas del Alcázar de Sevilla

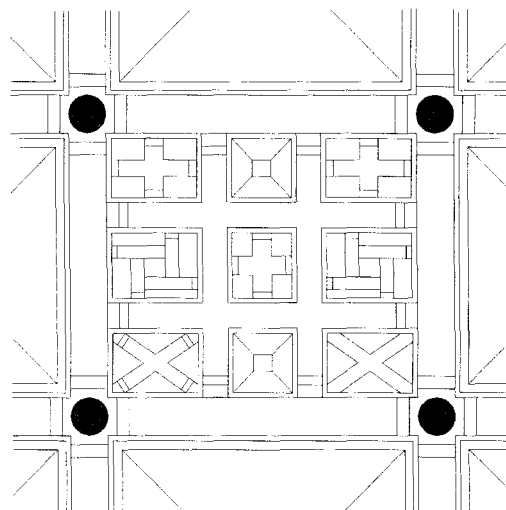


Figura 4
Bóveda de la Mezquita de la Tornerías (Toledo)

cuerpo con la bóveda, de sección rectangular que se cortan en la clave, aunque esta no les es común. Esto último, potenciar, formalizar, resaltar, la intersección de dos superficies es un aspecto importante, ya que no hay que recurrir a influencias extranjeras para justificar las bóvedas que se construyen a partir del siglo XI en España.

Todavía, durante el S X, tenemos un ejemplo Mozárabe en la Iglesia de San Millán de la Cogolla de Suso (Logroño), construida en 984 (Fig. 5). Corresponde a una bóveda esquifada en donde se resaltan las intersecciones y los puntos medios de los paños. En los ejemplos anteriores, teníamos ambas soluciones por separado, pero no unidas en la misma bóveda. Es un ejemplo interesante, ya que materializa las dos funciones principales de los nervios, adaptarse a la curvatura y potenciar el cambio de ésta. En este tipo de bóveda con un comportamiento muy cupuliforme están justificados los nervios que unen la mitad de los tímpanos con la clave, ya que las generatrices son rectas y normales a los nervios, con lo que se constituyen en refuerzos de la zona media.



Figura 5
Bóveda de San Millán de la Cogolla de Suso, Logroño

Segunda fase, siglos XI-XII. Románico.

Durante esta etapa, encontramos bóvedas de nervaduras, semejantes a las del S X construidas tanto en la España reconquistada, como en el sur de Francia. Explicar su aparición sería difícil si no se tuvieran las anteriores como referencia. Hasta ahora, se las suponía torpes precedentes de las bóvedas de ojivas.

La mayoría de los ejemplos, responden a planta cuadrada u octogonal. Los nervios parten de la mitad de los lados de los tímpanos sin reforzar las aristas (crucero de la Catedral de Jaca, 1072, Fig. 6 sobre

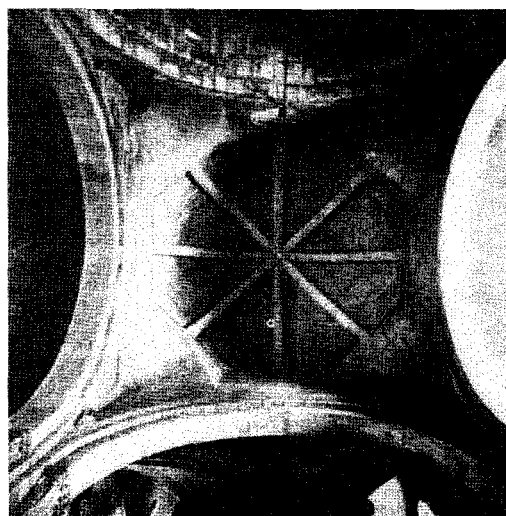


Figura 6
Crucero de la Catedral de Jaca

planta octogonal). Existe la misma disposición en la Torre vieja de la Catedral de Oviedo, pero sobre planta cuadrada y con los nervios apeados en columnas, 1098 (Fig. 7). Siguiendo con esta evolución, encontramos ejemplos con nervios reforzando las aristas y apeados en columnas, muy significativos como San Baudel de Berlanga en Soria (Fig. 8).

Otro caso de aristas reforzadas sobre una disposición de bóveda esquifada o de cuatro paños, lo encontramos en la Torre de la Iglesia de Ayerbe (Huesca, Fig. 9).

Esta etapa, Románica, introduce en la construc-

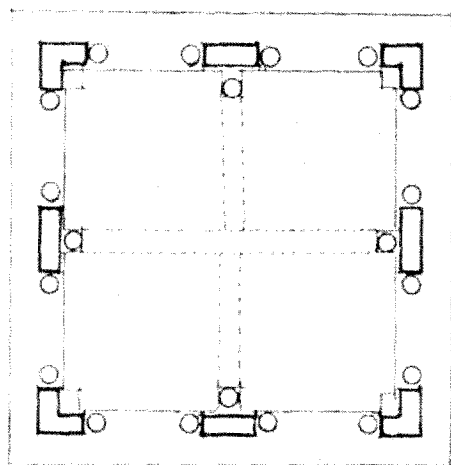


Figura 7
Torre vieja de la Catedral de Oviedo

ción de bóvedas de nervaduras varios puntos comunes que se destacan:

— Construcción de bóvedas cupuliformes. Normalmente esquivadas sobre planta cuadrada, o de paños sobre planta octogonal.

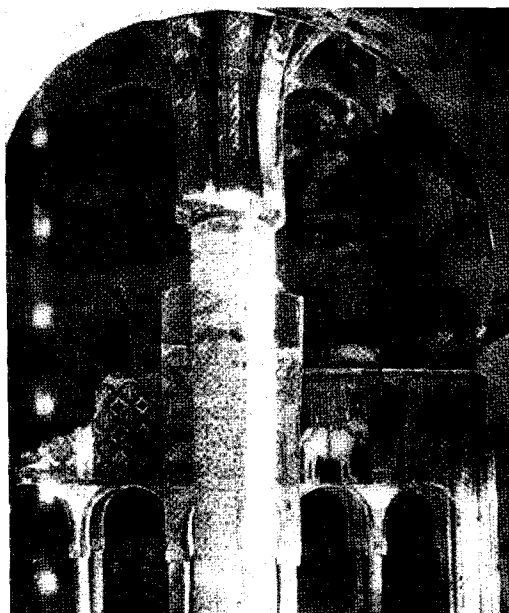


Figura 8
San Baudel de Berlanga, Soria

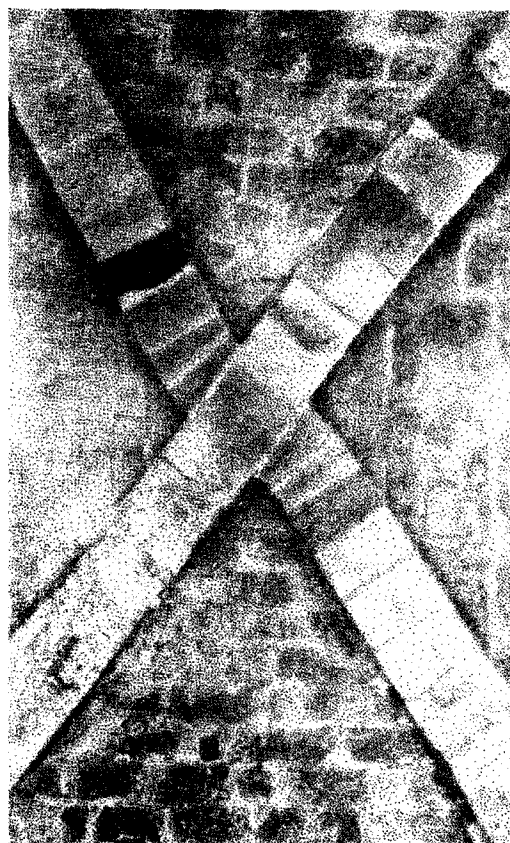


Figura 9
Bóveda de la Torre Vieja de Ayerbe, Huesca

— Aparición de nervios resaltados en el intradós de las bóvedas. De sección rectangular. Éstos, primero aparecen reforzando la mitad de los paños y posteriormente las aristas de intersección. En todo caso la clave no es común, al no corresponder a una sola pieza.

— Aparición de columnas en las que se apean los nervios de refuerzo. Este último aspecto es importante, ya que lo contenían algunas bóvedas en Córdoba, y por lo tanto parece lógico pensar que estamos ante una influencia musulmana y no una regresión gótica. Desde otro punto de vista, el mecánico, incluir columnas de apeo de los nervios no sólo evidencia que con las nervaduras se concentran los esfuerzos de la bóveda, sino que se canalizan hasta la cimentación con otro elemento lineal, desvinculando al cerramiento de parte de su capacidad portante.

Tercera fase siglos XII-XIII. Cisterciense, inicios del Gótico.

En esta etapa se analizan los edificios cistercienses con huellas almohades y la introducción del gótico en nuestro país.

Constructivamente, lo cisterciense, importado de Francia, casi siempre se construye en piedra mientras que el almohade utiliza ladrillo, argamasa y yeso. Durante el siglo XII tanto la orden cisterciense como el movimiento almohade, promueven la austeridad en las construcciones. Éstas deben servir a un propósito (Iglesia: casa de Dios, lugar de rezo y ceremonias. Mezquita: casa de oración) y deben carecer de decoración y suntuosidad.

Lo anterior y la precariedad económica en algunos casos, provoca que se construyan iglesias y monasterios utilizando materiales (ladrillo y argamasa) y mano de obra (pobladores de morerías) propios del país. Esto provoca que aparezcan en estas construcciones bóvedas de nervaduras con influencia almohade.

En esta línea, tenemos el Monasterio de Armentería en Pontevedra (1162, Fig. 10), el de las Huelgas en Burgos (1195, Fig. 11) y el de Santa María de la Vega en Palencia (1215, Fig. 12).

En los dos primeros, encontramos bóvedas similares, en la primera los nervios de resalto de las aristas no llegan hasta la clave, y en la segunda sí. La de las Huelgas, corresponde a un esquema más almohade.

Si se analizan las plantas de las dos últimas, se observan disposiciones características de las construcciones cistercienses: tres naves, una central y dos colaterales de menor luz, terminadas en ábsides más o menos semicirculares peraltados. En Armentería se cubren las cabeceras con bóvedas de cuarto de esfera y de cañón de perfil apuntado y en la de Santa María de la Vega se utiliza una bóveda de nervaduras ajustada a la planta semicircular, en la cabecera principal. Este es otro aspecto significativo del empleo de bóvedas de nervadura, la solución de cabeceras con geometrías diversas. En cuanto a las naves laterales, en Armentería, se resuelven con bóvedas de arista sobre planta cuadrada.

En estas fechas, aparecen en nuestro país las bóvedas de nervaduras góticas basadas en la imposición de las ojivas como elemento definidor de toda la geometría. Éstas aparecen como síntesis entre bóveda de

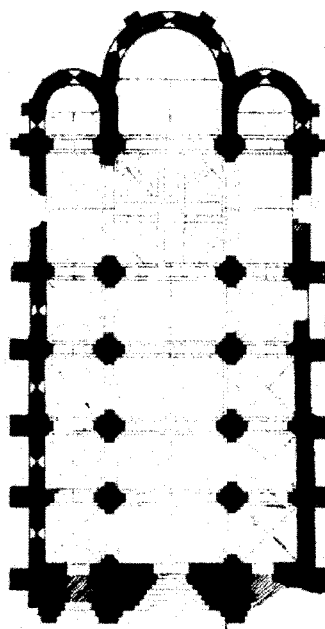


Figura 10
Monasterio de Armentería, Pontevedra

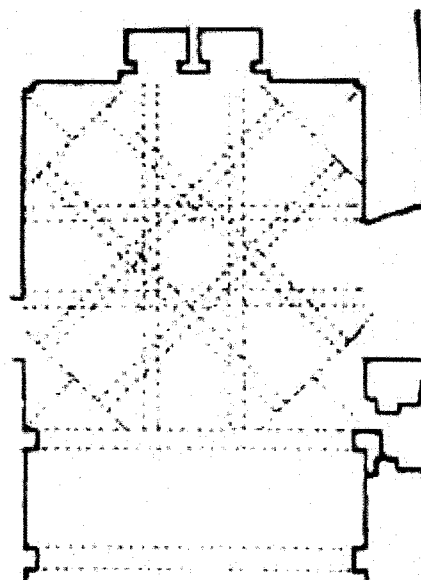


Figura 11
Monasterio de las Huelgas, Burgos

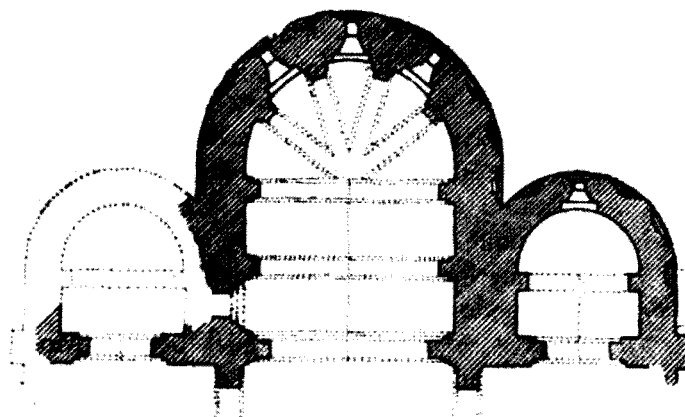


Figura 12
Monasterio de Santa María de la Vega, Palencia

arista romana y bóveda con nervios resaltados. La bóveda de aristas romana requería una técnica constructiva depurada, tanto en su trazado como en sus materiales, y un espacio regular en el que desarrollarse. Sin embargo, su forma provoca una plegadura en las superficies de intersección, por lo que aparece un aumento de rigidez (concentración de esfuerzos provocada por la forma). Las nervadas posibilitan una construcción rápida, casi sin elementos de apeo, ya que los nervios constituyen un esqueleto de fábrica, al que pueden adaptarse los tímpanos que conforman el plemento.

Las bóvedas de ojivas sintetizan ambos sistemas englobando sus características más notables y aportando algunas nuevas:

- Aparición de plegaduras por la intersección de dos superficies, con el consiguiente aumento de rigidez, potenciado además por el nervio que puede actuar de diversas formas según esté construido el plemento, formando cuerpo con el nervio o apoyado en éste.
- Aparición de nervaduras facilitando la construcción del plemento, que aparece como superficie reglada apoyado entre ojivos y formeros.
- Adaptabilidad a cualquier tipo de planta.
- Continuidad de los nervios desde la cimentación hasta la clave. Aparición de pilares que recogen la ramificación de los nervios.

A continuación, se analiza el primer ejemplo de bóvedas de ojivas góticas construido en el ámbito geográfico de estudio, que hemos acotado.

LA IGLESIA DE SANTA ANA DE SEVILLA. ANÁLISIS DE UNA IGLESIA GÓTICA EN UN ENTORNO ALMOHADE

La construcción de la iglesia comienza en 1276-80 y transcurre en una primera fase, la primitiva, hasta principios del siglo XIV, durante el reinado de Alfonso X. Si para el resto de Europa y parte de España, el gótico ya es un hecho construido, en una ciudad como Sevilla, conquistada por San Fernando en 1248, es una novedad. Sin embargo, la ascendencia francesa de Alfonso X, promotor de la obra, y su sentido universalista con respecto a la cultura y el arte, hacen posible la aparición del *nuevo estilo* en el edificio que nos ocupa. Pero una intención no es suficiente para construir, es necesario contar con maestros que sean capaces de fijar las directrices de la obra. Si se comparan las bóvedas de Santa Ana con las de la Catedral de Burgos (1221), no es de extrañar que varios autores apunten que fueron maestros burgaleses los que construyeron el sistema abovedado que cubre la iglesia. Sin embargo, como decimos, esta visión global del monarca no sólo contempla a Francia, cuando Alfonso X contempla las construcciones almohades de Sevilla, queda prendado de ellas y manda protegerlas.

Tal como había ocurrido con algunos monasterios cistercienses que a causa de su precariedad económica se construyen en ladrillo, en Sevilla no es fácil encontrar piedra, por lo que la Iglesia se construye casi en su totalidad con ladrillo, sistema perfectamente conocido por los artífices del lugar.

Esta es la mejor forma de definir lo que se ha denominado Arquitectura Alfonsí: introducción reciente del gótico acompañado de un despertar de la sensibilidad mudéjar.

Descripción de la edificación.

Su trazado en planta (Fig. 13), responde al esquema que hemos descrito anteriormente cuando hablábamos de monasterios cistercienses (ver M. de Armentería y Sta. María de la Vega). Presenta tres naves de

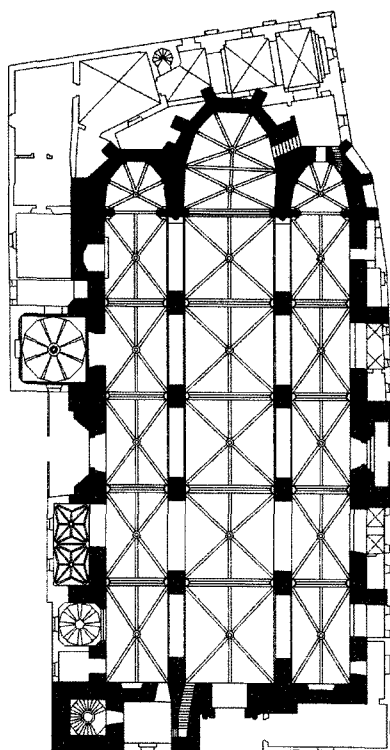


Figura 13
Santa Ana de Sevilla, planta actual

cinco vanos. Los módulos de la nave principal son cuadrados de aproximadamente 7x7 m y los colaterales rectangulares de 7x5 m. No presenta crucero. Las cabeceras de las naves están resueltas mediante ábsides poligonales de apariencia cuasi-semi-elíptica.

Como elemento de cerramiento y de carga perimetral, presenta un muro de fábrica de ladrillo rigidizado verticalmente mediante contrafuertes. Es curioso observar como el eje de éstos, está desplazado del de arranque de las bóvedas. Este detalle, que no hace peligrar la estabilidad del conjunto (los muros tienen un espesor de 1,40 m), añade un indicio más sobre la teoría de que existieron más de una *cuadrilla* trabajando en la obra, una para los elementos verticales (de la propia localidad) y otra para las bóvedas (probablemente de Burgos).

Los elementos portantes verticales interiores, están resueltos con pilastras de ladrillo de 1,40x1,80 m. Sobre éstos, apoya el sistema abovedado que cierra superiormente el edificio.

Este apoyo no es inmediato, no existe continuidad entre los nervios de la bóveda (formeros, perpiños y ojivos) y las pilastras. El encuentro se resuelve mediante un elemento de transición, *culp-de-lampe* (capitel en ménsula sobre la pilastra que recoge cinco nervios de la bóveda, apoyado sobre un pilarcillo que a su vez descansa sobre otra ménsula enrasada con la línea de arranque de los arcos de la nave). Este sistema de apoyo, utilizado por lo cisterciense justifica las influencias de la edificación que nos ocupa. Además ponen de manifiesto el tipo de gótico que estudiamos, primitivo, casi Románico, de hecho los motivos decorativos en capiteles y molduras lo denotan. Todavía no hay continuidad tanto entre las bóvedas y los elementos de carga vertical como en la confluencias de nervios en los salmeres en donde éstos aparecen perfectamente separados unos de otros. El tamaño de las pilastras pone de manifiesto que estamos ante un sistema constructivo todavía por desarrollar y que no se ha empezado a depurar reduciendo secciones y aligerando cargas.

Las bóvedas de Santa Ana.

Su definición corresponde a un esquema inicial de bóvedas de ojivas, ya utilizado en la catedral de Burgos. Su geometría se obtiene a partir de la imposición de los ojivos con directriz semicircular. Como la

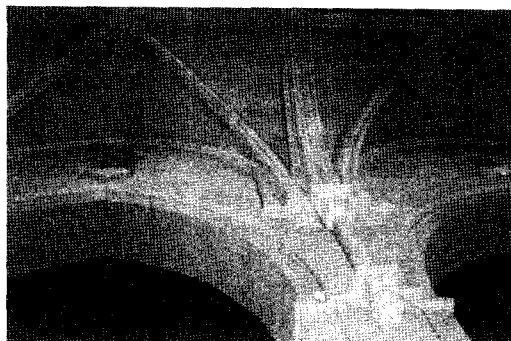


Figura 14
Apoyo de las bóvedas, Culp-de-lampe

línea de espinazo es horizontal, la altura de la clave de los ojivos fija la cota superior del resto de arcos de la bóveda. Como los formeros son semicirculares, tienen que peraltarse para llegar a la altura de referencia. Los perpiños de directriz apuntada, se trazan para que su clave quede a la altura de la de los ojivos (Fig. 15).

Una visión inferior no permite observar el intradós de los arcos formeros, estos están apoyados en un nuevo arco, de directriz apuntada, que arranca desde la finalización del *culp-de-lampe*, mediante una fábrica de un pie de ladrillo. Estas fábricas constituidas casi en diafragmas, poseen ventanas a modo de falso triforio. El espacio que queda entre los dos arcos formeros de cada nave colateral con la central es visitable. En su época constituían elementos de defensa a los que se accedía desde la azotea, que se convertía en una auténtica plaza de armas.

En cuanto a la disposición del plemento, éste se adapta a los nervios constituyendo una superficie reglada. Por lo tanto las hiladas próximas a los arranques están mucho más inclinadas que las próximas a la clave, casi horizontales. El plemento conforma una superficie sinclástica (doble radio de curvatura) al contrario de lo que ocurre con las bóvedas de arista romanas, que siempre corresponden a intersección de dos superficies de simple curvatura. Esta forma de trazado le proporciona rigidez intrínseca, ya que es capaz de absorber las cargas en dos direcciones ortogonales y curvas.

Para analizar el comportamiento mecánico de estas bóvedas, es necesario estimar las cargas a las que están sometidas. Un hecho diferenciador, es que po-



Figura 15
Bóvedas de la nave lateral

see azotea (fig. 16) y no cubierta de madera. Por lo tanto, sobre el trasdós existe un relleno que permite la formación de pendiente de la azotea. Éste provocará una configuración de cargas diferente a las que poseen las bóvedas que sólo se conforman en techos (autoportantes) con un elemento independiente que sostiene el material de cobertura (cubierta, normalmente de madera). En las figuras 17 y 18 se representan la variación de líneas de empujes para diferentes configuraciones de arcos y de sobrecargas. En el caso de semicirculares, puede observarse como un espesor de relleno convenientemente elegido, puede mejorar de forma notable la estabilidad del arco.

Aparte de las cargas, la configuración geométrica de las bóvedas es la que realmente define su comportamiento mecánico. En cada ojiva confluyen dos témpanos con geometrías muy diferentes. Éstas, están de-

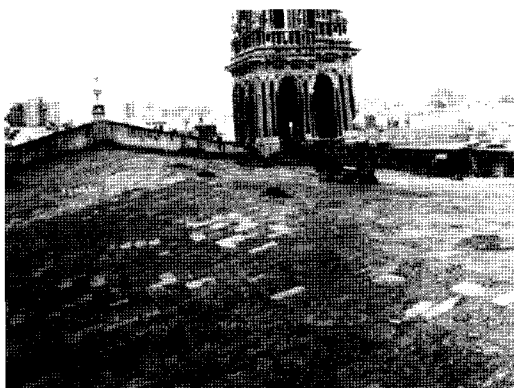


Figura 16
Santa Ana de Sevilla, azotea

finidas por superficies regladas, unas con directriz semicircular, y otras con arco apuntado. La figura 19 representa el estado de deformación de las bóvedas. Puede observarse, como el comportamiento según se trate de un tímpano o de otro es diferente. La clave de los que proceden del arco formero, semicircular, tienden a descender, mientras que las de los perpiaños, apuntados, tienden a subir desde el arranque del perpiaño hasta una zona localizada a $2/3$ de su longitud, para bajar hasta la clave común a los ojivos.

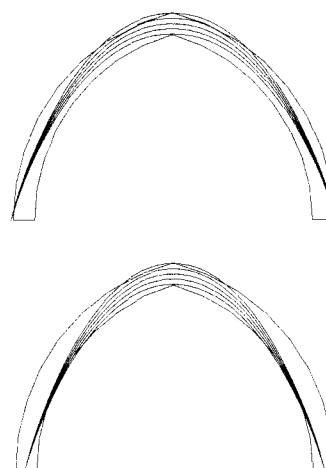
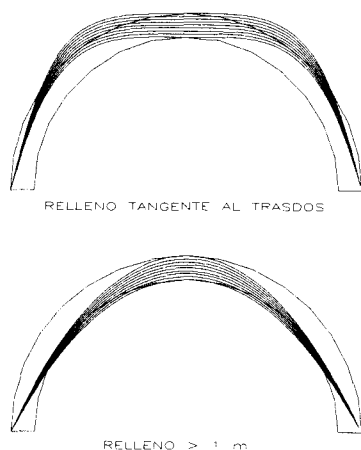


Figura 18
Líneas de empujes en arcos apuntados

Los dos campos de movimientos corresponden al comportamiento independiente de la geometría que define los plementos. El caso de la directriz apuntada, provoca el fenómeno denominado *saltar la bóveda*, como puede apreciarse en la figura.

Cuando se analizaba la sección de la Iglesia, en la descripción general, resultaba curiosa la aparición del falso triforio (fig. 20) situado entre los arcos for-

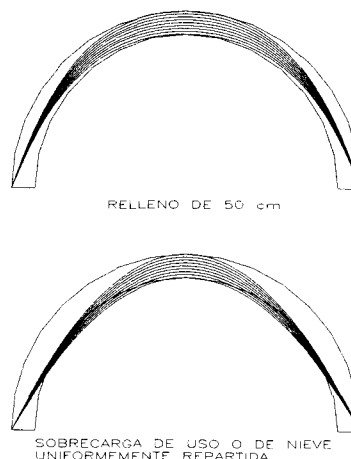


Figura 17
Líneas de empujes en arcos de directriz semicircular bajo diferentes sobrecargas

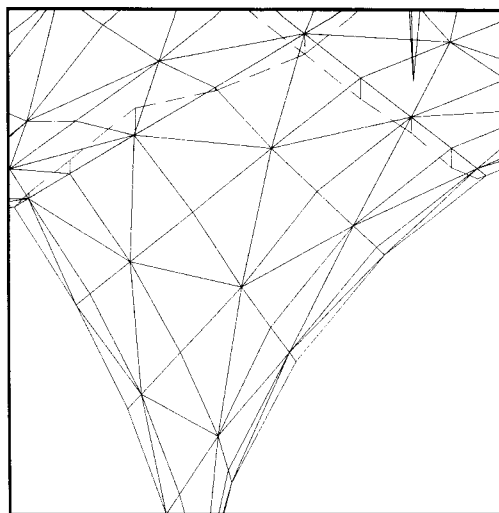


Figura 19
Deformación de las bóvedas. Peripiaño apuntado, formero
semicircular peraltado

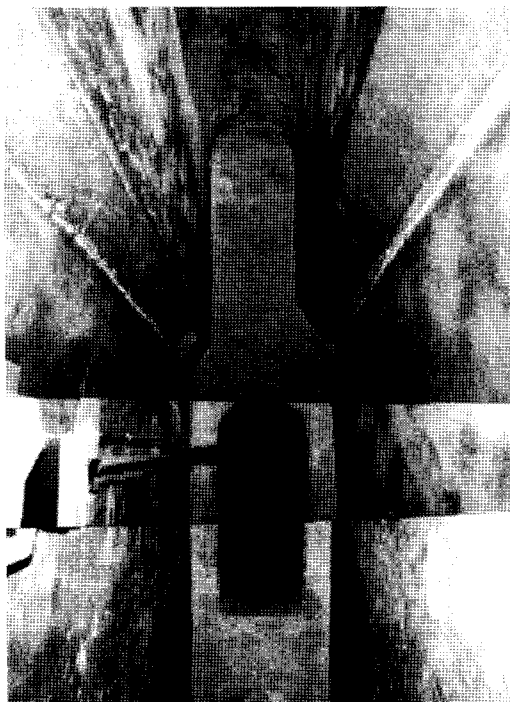


Figura 20
Santa Ana, interior del falso triforio

meros. Al analizar el cerramiento de éste, sólo un pie de fábrica de ladrillo, cabía cuestionarse, si no peligraba su estabilidad debido a los empujes transversales de las bóvedas. Las figuras 21 y 22 muestran gráficamente el valor de estos empujes. Puede observarse como son mayores en la dirección de la nave, acompañando a la forma apuntada, y como se

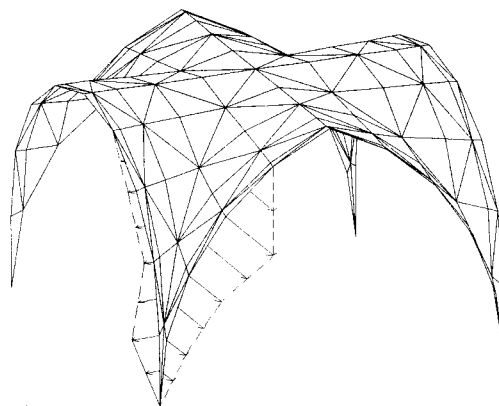


Figura 21
Reacciones horizontales en bóvedas de nave central

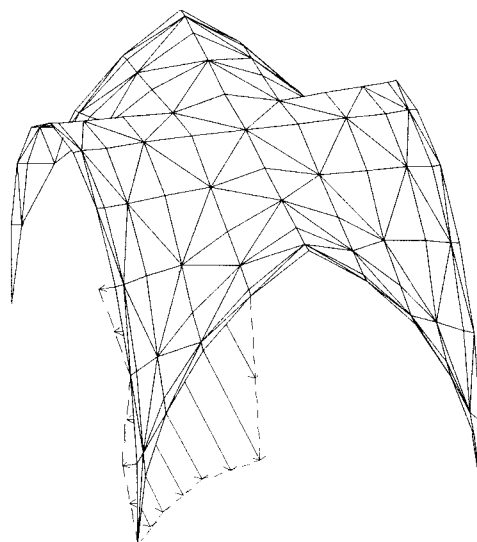


Figura 22
Reacciones horizontales en bóvedas de naves colaterales

reducen en la dirección perpendicular que es la más problemática. En esta dirección son de orden menor, y cuando se les añade la componente vertical, las acciones a las que están sometidos los cerramientos del falso triforio son casi verticales. De hecho no se han observado fisuras en ninguno de ellos. Sin embargo, en el lugar donde los empujes se hacen mayores, en el arranque a un tercio de la altura de la bóveda, la solución constructiva del triforio, pasa por estrechar el espacio y casi macizarlo, oponiéndose a una concentración de esfuerzos.

CONCLUSIONES

Durante los siglos XI-XII se construyen en la España cristiana bóvedas de nervaduras, con influencias del trazado de las musulmanas construidas durante el siglo X.

Aunque la primeras bóvedas de ojivas se construyeron fuera de nuestro país, construir con nervaduras en España, no es una técnica desconocida, y se adapta rápidamente a las formas, materiales y técnicas propias de cada localización.

La novedad más importante que fijan las bóvedas de ojivas, es la decisión de fijar los *arcos directores* de las bóvedas (ojivos, perpiaños y formeros) con una geometría conocida, y por tanto fácil de trazar, (arcos semicirculares, semicirculares peraltados y posteriormente apuntados) adaptando el plemento a éstos, construyéndolo como una superficie reglada, primero con generatrices rectas (de fábrica apoyadas en los arcos directores) y posteriormente con generatrices curvas. Obteniendo, por lo tanto, *superficies sinclásticas* (doble radio de curvatura, del mismo sentido).

Con la simplificación del trazado de las formas se facilita su construcción y se mejora el comportamiento mecánico de forma notable, propiciando la disminución de los espesores de los plementos repercutiendo en los muros de cerramientos.

Tanta dificultad de diseño no estaría justificada, salvo si las plantas son irregulares, están superpuestas a construcciones precedentes o se interviene en restos de edificaciones antiguas. Es aquí donde el método de trazado gótico se desarrolla y se aplica hasta la saciedad (cabeceras, girolas, plantas trapezoidales, etc...). Puede observarse esto último en la cabecera principal de Santa Ana de Sevilla, en donde aparece una desviación en la planta, que es resuelta perfectamente con el *nuevo trazado*. (Fig. 23 y 24).



Figura 23
Cabecera principal de Santa Ana, Sevilla

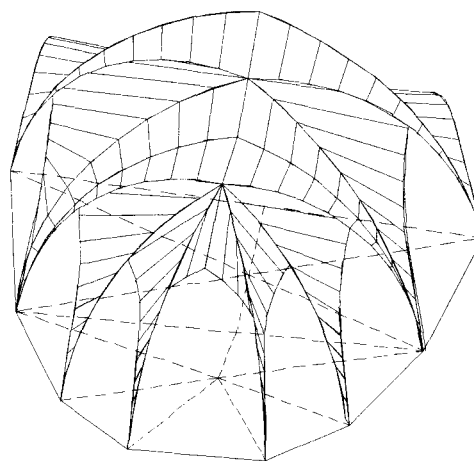


Figura 24
Modelo de la cabecera principal de Santa Ana de Sevilla

BIBLIOGRAFÍA

- Chueca Goitia, Fernando. *Historia de la Arquitectura española. Edad Antigua y Edad Media*. Ed. Dossat. Madrid, 1965.
- Comes Ramos, Rafael, *Arquitectura Alfonsí*. Excma. Diputación Provincial de Sevilla. Sevilla, 1974.
- Esselborn, Carl. *Tratado general de construcción. Tomo II, Construcción de edificios*. Gustavo Gili, 1929.
- Fitchen, John. *Construction of Gothic Cathedrals*. Oxford University Press, 1967.
- Heyman, Jacques. *Teoría, historia y restauración de Estructuras de Fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Madrid, 1995.
- Huertas, Santiago. Tesis Doctoral, *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España*. E.T.S. Arquitectura de Madrid, 1990.
- Martínez Valero María de los Ángeles. *La Iglesia de Santa Ana de Sevilla*. Colección Arte Hispalense. Excma. Diputación Provincial de Sevilla. Sevilla, 1991.
- Quintas, Valentín. *Estructuras especiales en edificación. Análisis y cálculo*. Ed. Rueda. Madrid, 1996.
- Torres Balbás, Leopoldo, *Obra Dispersa. Crónica de la Es-*

paña Musulmana. Instituto de España. Madrid, 1983. Diez Tomos.

La progenie hispano-musulmana de las primeras bóvedas nervadas francesas y los orígenes de las ojivas. (Tomo I, pag.)

Una fase de austeridad en el cristianismo y en el Islam. (Tomo 6, pag. 122)

Viollet le Duc, E. *La construcción medieval*. Instituto Juan de Herrera. Madrid, 1996.

PROCEDENCIA DE LAS FIGURAS E ILUSTRACIONES

Chueca Goitia, Fernando (Op. Cit.):

Fig. 1, 2, 6, 8, 11, 12

Gómez de Cózar, Juan Carlos (Tesis Doctoral, en preparación):

Fig. 3, 4, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24.

Torres Balbás, Leopoldo (Op. Cit):

Fig: 5, 7, 9, 10.