

## Patología de bóvedas de doble curvatura

Manuel Fortea Luna  
Vicente López Bernal

### DEFINICIÓN

Cuando visitamos una iglesia o cualquier estructura abovedada, y particularmente de bóvedas de aristas, desconocida para nosotros hasta ese momento, la mirada se nos detiene en primer lugar en la contemplación y disfrute del espacio; en segunda instancia, si la visita es profesional, reparamos en la calidad constructiva y seguidamente en su estado de conservación. Ocupada la vista en estos menesteres, y distraída en todas las anécdotas que va descubriendo a lo largo de todos los barridos, olvida con frecuencia un dato fundamental para comprender la esencia de su alma estructural: la altura relativa de la clave central respecto a la de los arcos formeros y perpiaños. Ciertamente es difícil apreciarla sin ayuda alguna ni referencia, primero porque ya sabemos que la vista engaña con más frecuencia de la debida, y segundo porque la visión en vertical es más torpe a la hora de proporcionarnos estimaciones dimensionales. Supongamos una bóveda de arista o cuatrimpartita, de base cuadrada o rectangular formada por cuatro arcos, situados sobre los lados perimetrales, y dos arcos diagonales. Si damos un corte transversal por el centro, y atendiendo a la altura relativa de la clave central, nos podemos encontrar con tres situaciones diferentes:

1.— La altura de la clave central está a la misma altura que la de los arcos laterales. El corte por la bóveda es una línea horizontal uniendo las tres claves que se encuentran a la misma cota (figura 1). Este es el caso de una bóveda de arista como intersección de

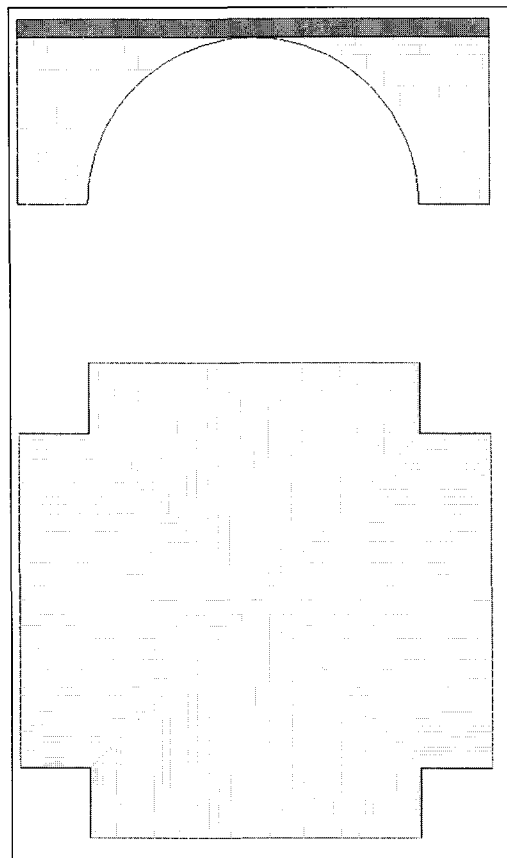


Figura 1

dos cilindros iguales de directriz horizontal, es decir el encuentro de dos bóvedas de cañón. Es la bóveda de arista romana. Teóricamente sobre las claves de los arcos laterales no se ejerce ningún empuje horizontal, pues la línea de fuerza no puede mantener esa dirección constante durante un recorrido por corto que sea.

2.— La altura de la clave central está a una altura inferior que la de los arcos laterales. El corte por la bóveda es una línea quebrada uniendo las tres claves normalmente compuesta por dos curvilíneas simétricas o más, en el caso habitual de existencia de terceletes (figura 2). Éste es el caso de una bóveda de arista gótica, cuatripartita, siendo cada una de dichas

partes una superficie reglada generada a partir de un semiarco lateral y un semiarco diagonal. Sobre las claves de los arcos laterales no se ejerce ningún empuje horizontal, pues las fuerzas que aparecen sobre el espinazo se dirigen directamente a la clave central, para discurrir posteriormente por el arco diagonal.

3.— La altura de la clave central está a una cota superior a la de los arcos laterales. El corte por la bóveda es una línea curva uniendo las tres claves (figura 3). Sobre las claves de los arcos laterales se ejerce un empuje horizontal, pues las fuerzas que aparecen sobre el espinazo se comportan de forma similar a como lo harían en una cúpula, cuya sección fuera una porción de casquete esférico. Este es el caso de

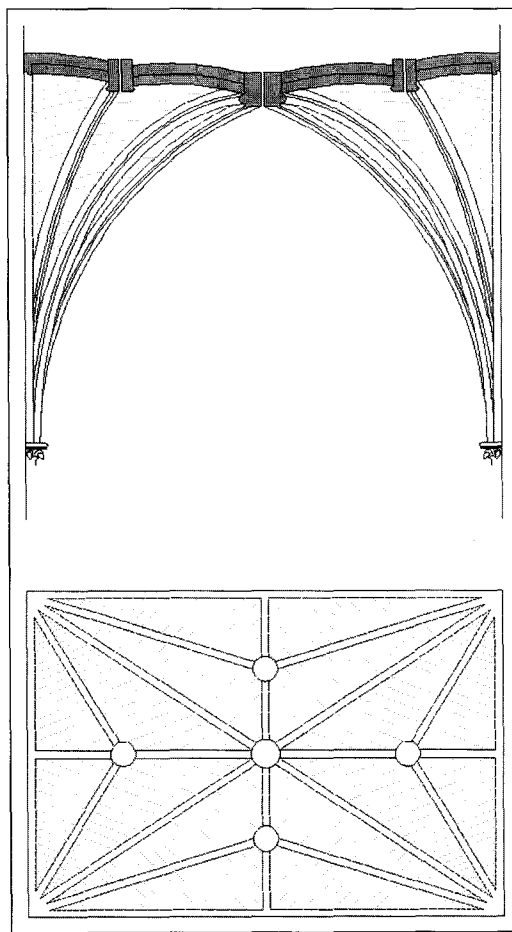


Figura 2

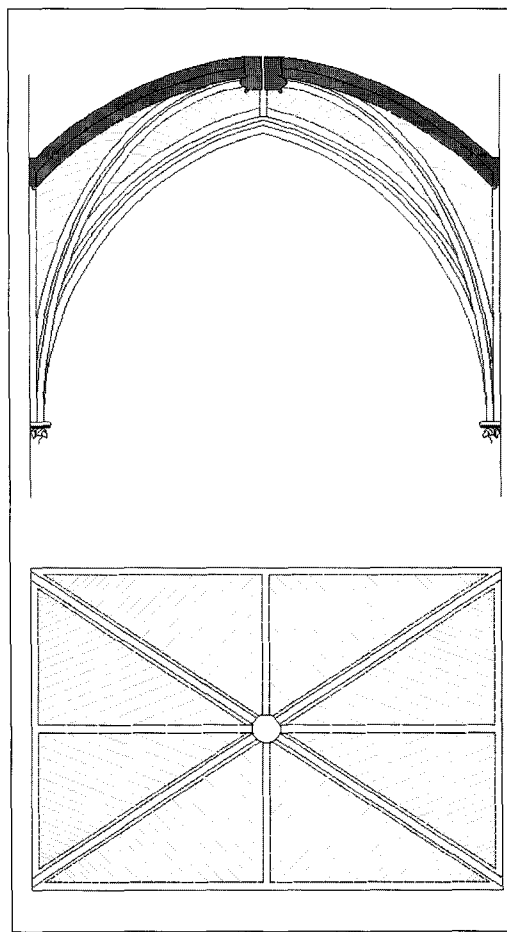


Figura 3

las bóvedas que nos ocupan en este trabajo. Unos las han llamado bóvedas peraltadas, en Extremadura se las conoce como bóvedas con retumbo. A falta de un nombre universal aceptado las hemos llamado en el título bóvedas de arista de doble curvatura.

#### ANTECEDENTES

La bóveda peraltada aparece en la arquitectura bizantina. Según Choisy contiene la explicación de la bóveda bizantina hasta en sus más aparentes extravagancias.<sup>1</sup>

La figura 4 nos muestra las líneas de cota en planta y la sección vertical por el centro de la bóveda según la versión del mismo autor. Las aristas son salientes y vivas en la zona de los arranques pero muy suaves en la clave, donde parecen borrarse poco a

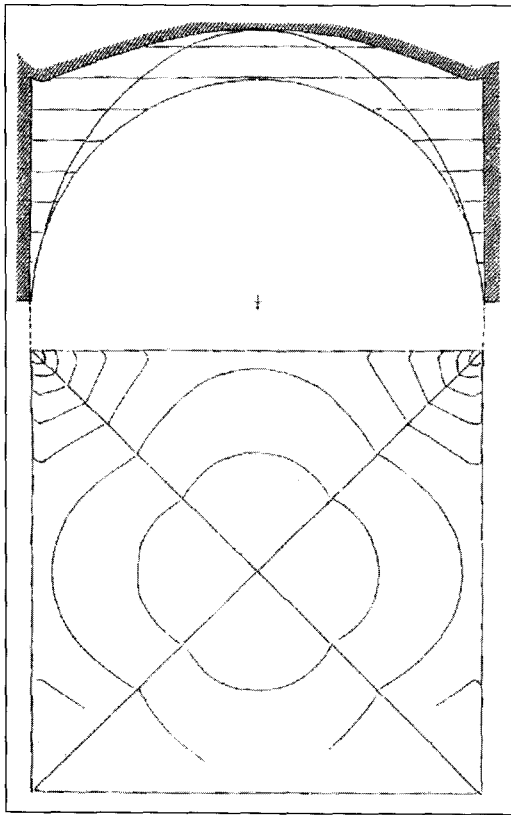


Figura 3

poco para fundirse en la concavidad de una superficie esférica. Esta transición extraña ha sido advertida desde hace mucho tiempo. Estas bóvedas pueden verse en las colaterales inferiores de Santa Sofía de Constantinopla, siendo el ejemplo más curioso que nos queda de esta concepción singular. Curiosamente la arquitectura otomana, representada fundamentalmente por el gran arquitecto Sinán, recupera mil años después la tradición constructiva bizantina de las cúpulas, olvidando estas curiosas bóvedas de aristas peraltadas, que sí las volvemos a reencontrar en Occidente.

Sin salir de Francia, que es donde se fraguan los principios góticos, es en la zona de Anjou y Poitiers donde más influencia bizantina se puede encontrar, dando lugar a un tipo de bóveda bastante extendida por toda la península ibérica cual es la siguiente: Supongamos que vamos a cubrir con una bóveda de nervios un espacio de base cuadrada. Para ello construimos dos arcos semicirculares en la dirección de las diagonales y cuatro arcos apuntados sobre los lados con la condición de mantener el mismo radio de curvatura que los arcos diagonales. El resultado es una bóveda de arista de doble curvatura, o bóveda peraltada.

#### COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El comportamiento de estas bóvedas ya ha sido explicado por varios autores. Choisy lo cuenta de la siguiente manera: «Una de las características esenciales de las bóvedas bizantinas que quizás más claramente las distinga de las bóvedas occidentales coetáneas, es que sus empujes se reparten por todo el perímetro del espacio que cubren. En una bóveda occidental sobre nervios el peso de los cuatro paños independientes que la constituyen reposa sobre los arcos diagonales, y éstos transforman los pesos en empujes concentrados en los cuatro ángulos, de manera que es suficiente reforzar estos cuatro ángulos con macizos de contrarresto. Los muros de cabeza no intervienen para nada en el equilibrio y ocupando su lugar hay habitualmente un simple ventanal de vidrio. En la construcción bizantina ocurre de forma completamente distinta. La bóveda, en vez de dividirse en paños sobre nervaduras, es una cáscara continua y peraltada que, al entrar en carga, ejerce sobre todo su contorno empujes en los sentidos indicados.

Esta bóveda tiende a reventar las paredes que la rodean. No es suficiente pues, contrarrestarla en sus cuatro ángulos; hay que estribarla en todo su perímetro»<sup>2</sup>.

La bóveda Extremeña es también una bóveda de arista peraltada, y por tanto de doble curvatura, de la cual ya dijimos que «la observación de los casos reales confirma que una bóveda de arista extremeña puede trabajar indistintamente como una de arista o como una cúpula. La elección o determinación por una de las alternativas de funcionamiento, no sólo depende de sus condiciones iniciales, sino también y sobre todo de las agresiones e intervenciones sufridas posteriormente a su construcción»<sup>3</sup>.

Volviendo a la bóveda de la fig 3, podemos considerar para las bóvedas de arista de doble curvatura dos suposiciones en cuanto a su comportamiento:

1.— Que trabaje como una bóveda de arista, esto es, considerando que dividimos cada paño en arcos independientes que descansan sobre las aristas, transmitiendo a éstas los empujes, verticales y horizontales, discurriendo por ellas hasta los arranques, donde finalizan todos los esfuerzos.

2.— Que trabaje como una cúpula, esto es, considerando que dividimos toda la bóveda en gajos radiales, transmitiendo cada uno sus esfuerzos en donde se apoya, unos sobre el muro perimetral y otros sobre los arranques. Lógicamente la dimensión de los empujes depende la dimensión del casquete esférico al que pertenece.

## PATOLOGÍA

Las grietas en una estructura son las deladoras de su comportamiento, señalando acusatoriamente sus fragilidades. Cualquier modelo elegido para explicar el funcionamiento estructural, es un modelo teórico, idealizado, con una lista de supuestos iniciales que nos facilita la simplificación del problema, que lo acota a una dimensión abarcable. La realidad es siempre infinitamente más compleja. La validez del modelo sanciona el comportamiento de la estructura real. Cuanto más próximo esté al previsto por el modelo más podremos confiar en él. Si la realidad difiere notoriamente del comportamiento previsto en el modelo, está claro que el modelo es inservible. Los métodos de cálculo del acero tienen un mayor grado de fiabilidad que los que utilizamos para el

hormigón, por la sencilla razón de que podemos vaticinar con mayor éxito el comportamiento de una estructura de acero que el de una estructura de hormigón.

Las bóvedas son estructuras de fábrica, compuestas por adición de elementos (generalmente de piedra o cerámicos) que soportan con comodidad las compresiones, pero no aptas para admitir tracciones. Las mayores magnitudes admisibles de tensiones de este tipo son las que sea capaz de absorber el mortero, que por lo general son tan bajas que no merece la pena su consideración. Por tanto, allí donde aparezcan fuerzas de tracción significativas aparecerá una grieta. Las grietas en las bóvedas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1<sup>º</sup>.— *Grietas de articulación*: Son las que se producen en un arco elemental, convirtiendo la estructura en un mecanismo. Donde la línea de empujes está en el límite de su frontera. Tienen forma de cuña en sentido transversal siendo su vértice el lugar por donde circulan agolpadas y desesperadas las fuerzas de compresión. Solo se aprecian por una cara, bien por el intradós bien por el extradós, pero nunca por las dos caras. Si ésta llegara a acontecer sobreviene el colapso.

2<sup>º</sup>.— *Grietas de independencia*: Son las que se producen en las cúpulas, dividiéndose ésta en gajos independientes, de ancho constante en sentido transversal y de cuña en sentido longitudinal. Al no presentar ningún punto de contacto entre los dos elementos no hay ninguna posibilidad de que las fuerzas puedan circular de una parte a la otra. Se aprecian en las dos caras de la cáscara, tanto en el intradós como en el extradós. Son grietas de separación, de independencia, de subdivisión de la estructura en diversas partes autónomas que le permite a cada una un mayor grado de libertad de movimiento desligado de sus compañeras.

Paul Abraham clasificó las grietas que se producen en una bóveda cuatrimpartita típica en los siguientes tipos, todas de forma lineal en el sentido longitudinal de la nave central: a) grieta en el cañón principal en la zona de la línea de la clave; b) grieta que denominó *fissures de Sabouret*, paralela al arco formero pero separada de él; y c) grieta de muro, justo en el encuentro entre la bóveda y el muro lateral. P. Abraham se ciñó exclusivamente a las grietas visibles desde el interior de la nave; ésto es, las que se aprecian en el intradós. Heyman,<sup>4</sup> en el estudio de la pa-

tología de estas bóvedas no sólo incluye todas las grietas, visibles desde el interior o no, sino que además hace la distinción entre las que son de articulación y las que no.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de una bóveda cuatrimpartita típica, entendiéndose por tal aquella que las claves de los formeros están ligeramente más altas que las claves de los arcos diagonales, las habituales en la región francesa de Ilè-de-Francese. Pueden apreciarse las grietas de articulación, una en la zona de la clave, a lo largo de todo el cañón, visible desde el interior, y la otra solo por el extradós situada sobre los riñones. El resto son grietas de independencia, una correspondiente a la grieta de muro y la otra a la definida por Abraham como grieta de Sabouret, evidenciando que la parte comprendida entre estas dos se conforma como un arco

separado del resto de la bóveda adquiriendo una independencia total de funcionamiento. Todas estas grietas son lineales en la dirección longitudinal de la nave principal. Obsérvese que ninguna de estas piezas independientes ejerce empuje alguno que no sea sobre los estribos; fuera de ellos, es decir, sobre los muros no se transmite ninguna fuerza.

Por el contrario, las bóvedas peraltadas o si se prefiere, las bóvedas de arista de doble curvatura son diferentes. Ya se ha explicado anteriormente su comportamiento, y esto, necesariamente, ha de traducirse también en una patología diferente. El camino de las fuerzas lo condiciona fundamentalmente la geometría, y en menor medida, pero no despreciable, la disposición de sus elementos, o dicho de otra manera, la forma en que ha sido construida. La elección entre el funcionamiento como una cúpula o una bóveda de

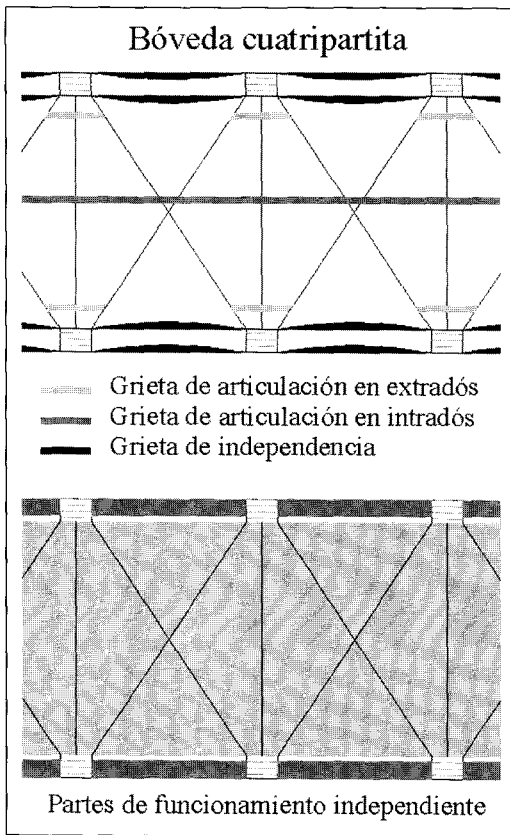


Figura 5

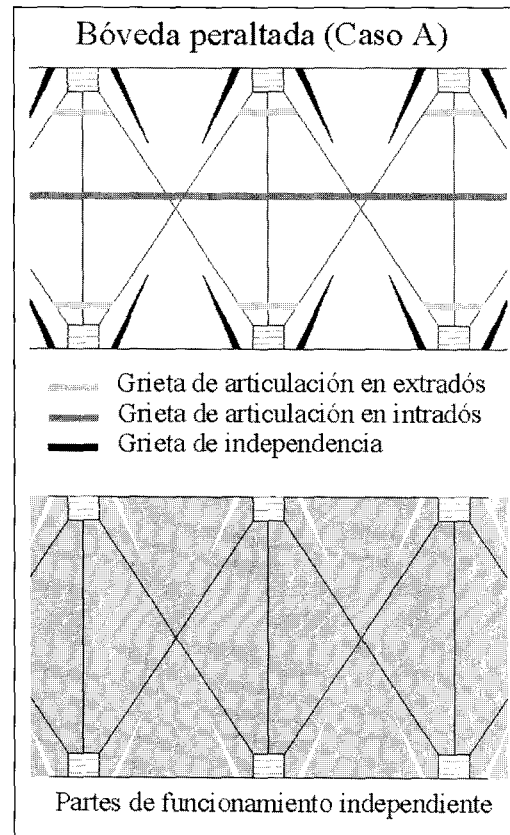


Figura 6

arista depende de estas circunstancias además de las condiciones externas. En cualquier caso idealicemos los dos modelos.

Un comportamiento similar al de una cúpula produciría unas grietas como las que se muestran en la figura 6. Las grietas de articulación serían muy parecidas al caso anterior, pues los arcos diagonales no tienen otra alternativa ni de trabajo ni de movimiento, quedando sólo afectados por la cantidad de carga que han de soportar.

Ahora bien, en este modelo la dimensión de las grietas de articulación serán menores, pues la carga a soportar también es menor ya que parte de ella ahora va directamente a los muros. Es más; en este supuesto los arcos diagonales casi no soportan más que su propio peso y por tanto casi serán inapreciables estas grietas de articulación. Por el contrario aparecerían unas grietas de independencia en sentido radial, evidenciando los cuerpos autónomos de funcionamiento. Como sucede en las cúpulas estas grietas tienen continuidad en los muros soportes.

El otro modelo o alternativa es considerando que los paños se apoyan sobre los arcos diagonales. En principio de manera parecida a la bóveda cuatropartita típica explicada anteriormente. Pero existe una diferencia fundamental; como decía Choisy esta bóveda ejerce empujes en todo su contorno. Las grietas de articulación son similares, incluso en dimensión, pues los arcos diagonales reciben unas cargas muy parecidas. Por el contrario las grietas de articulación son diferentes. Sobre cada arco formero aparece una sola grieta continua, de dirección curvilínea, poniendo de manifiesto que una parte del paño de la bóveda se ha independizado marchándose solidariamente con el muro de apoyo.

La figura 7 representa el comportamiento de este supuesto. A la vista del dibujo en planta estas grietas de independencia están a medio camino entre los dos casos explicados anteriormente. Si lo comparamos con la bóveda cuatropartita parece como si la grieta de muro y la de Sabouret se hubieran transformado en una sola de trazo curvo, arrancando en la posición de la grieta de muro y llegando hasta la tangencia de la grieta de Sabouret. Si lo comparamos con la figura 6, correspondiente a un comportamiento de cúpula, parece como si las grietas radiales se hubieran unido por parejas, cambiando su dirección, caminando hasta encontrarse con su compañera en lugar de dirigirse al centro.

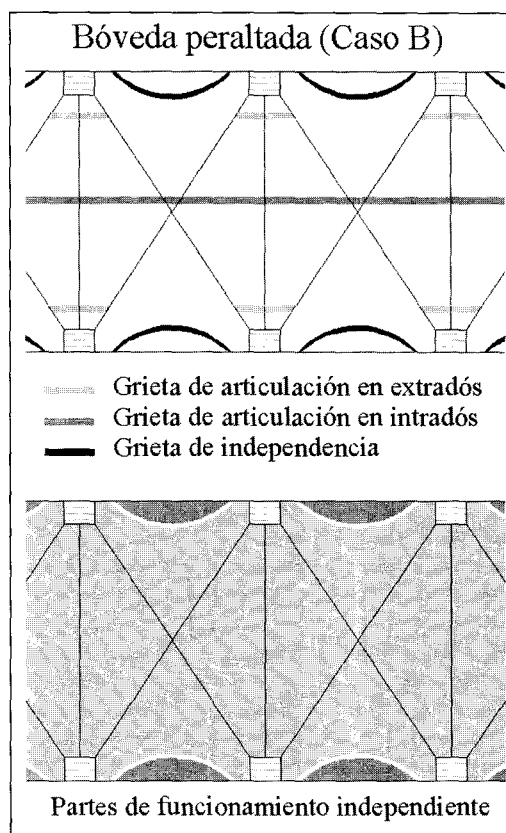


Figura 7

En la figura 8 se muestran los cuerpos independientes de la bóveda en una vista tridimensional según este modelo de comportamiento.

Volviendo al principio, en una hipotética primera visita a una iglesia desconocida y teniendo en cuenta estas consideraciones, podremos intuir su funcionamiento, e incluso parcialmente su geometría interpretando las fisuras en las bóvedas. Como ejemplo analizaremos dos casos concretos.

#### CONVENTO DE SAN FRANCISCO EN FREGENAL DE LA SIERRA

Según la historia de Fregenal escrita por D. José Quintero Carrasco<sup>5</sup> para la fundación del convento se «... señaló el sitio que llamaban el Alunado (en don-

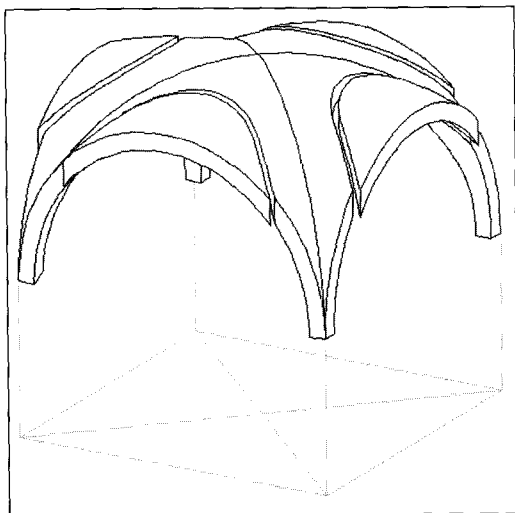


Figura 8

de hoy se encuentran sus ruinas, al final de la calle de San Francisco, dando sus traseras al Berrocal). Se comenzaron las obras el mismo año de 1563 y aunque casi todo se edificó de tapias, no obstante en Agosto del mismo año estuvo capaz (me parece muy pronto) de trasladarse la Comunidad, habiendo hecho pronto una regular Capilla para colocar al Santísimo Sacramento, el que en dicho mes se trasladó al nuevo convento procesionalmente asistiendo el clero, el cabildo, la nobleza y todo el pueblo, colocándose el Santísimo Sacramento en la Capilla que se había formado.

Siguió la obra (que en un principio, como antes se dice se había hecho provisionalmente a la ligera), ... Viendo los frexnenses que era muy costosa la obra, solicitó de S.M. la necesidad de algunos arbitrios para la conclusión y alcanzó la provisión en 1598 para ello por manera que, con estos arbitrios y limosnas del pueblo, la iglesia y lo principal del convento ya estaba concluido en el año 1619. El 21 de Julio de dicho año, que fue domingo, se colocó el Santísimo Sacramento en el Tabernáculo del Altar Mayor. Según los informes adquiridos, los frailes tuvieron que abandonar el convento en el año 1835, después de una ocupación de más de doscientos años, pero la iglesia siguió abierta al culto diciéndose Misa en ella, hasta que en 1880 aproximadamente en que, por el mal estado de la bóveda y ante el temor de que se

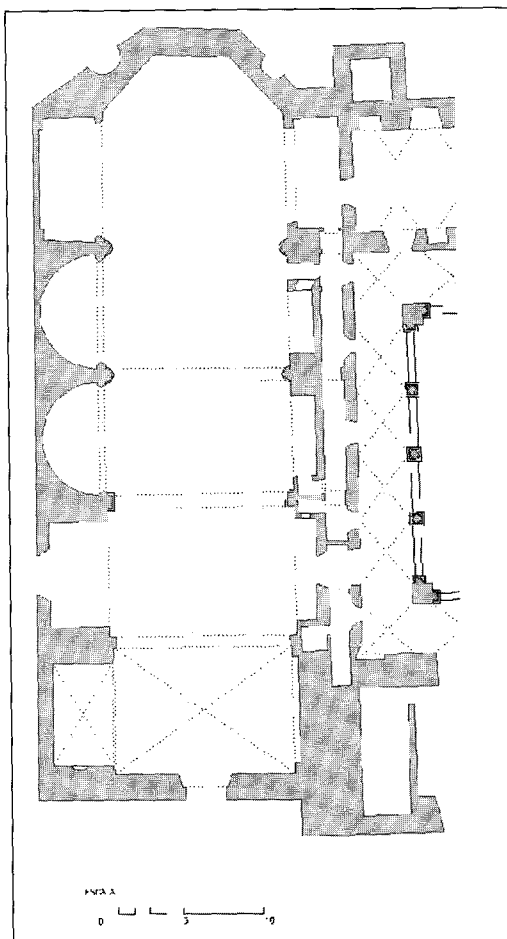


Figura 9

desplomara, la clausuraron para el culto, llevando a la iglesia de Santa Ana las imágenes ...»

Encontramos pues un caso característico de un sistema estructural que funciona con total normalidad durante un período de tiempo superior a los dos siglos y tras disolverse la comunidad que le dió vida se arruina en un plazo inferior a cincuenta años.

La estructura abovedada tiene una luz máxima de 10,60 metros y una altura hasta la clave de 16 metros, lo cual en principio, con unos elementos de contrarresto en torno a los cuatro metros de espesor bruto (apenas sin desplomes al día de hoy), nos dan un sistema estable que superó sin mayores contratiem-

pos el terremoto de Lisboa de 1755. La figura 9 nos ofrece la planta de la iglesia de dicho convento.

Los empujes horizontales de la bóveda se sitúan como máximo en torno a las 2,5 y 3,5 toneladas por metro lineal, que incluso para una hoja bastante esbelta (18 cm.) no plantea ningún problema mecánico si el trasdosado es correcto y el reparto de cargas uniforme.

En este caso y dado el buen contrarresto que ofrecen los abovedados de las capillas exteriores y la magnitud de fábrica del claustro, no aparecen claramente los procesos de agrietamiento analizados anteriormente, por lo cual podemos deducir que la ruina estructural se debe una vez más a la mala conservación de la cubierta sobre la que posteriormente se interviene retirando parte de los trasdosados y apoyando el pretendido aligeramiento sobre elementos de fábrica que trasladan a las claves una serie de cargas puntuales para las que el sistema no se encuentra preparado.

La figura 10 nos muestra el estado actual de las bóvedas.

#### CONVENTO DE SANTA CLARA EN LLERENA

Según la historiadora M<sup>a</sup> Pilar de la Peña Gómez,<sup>6</sup> el convento de Santa Clara situado en la calle Corredera de la ciudad de Llerena fue fundado por bula del papa Julio II de 7 de junio de 1.508. «En 1549 la iglesia del convento padece un deterioro notable y con pocas posibilidades de ser mejorado por falta de recursos: «Está caída por el suelo y descubierta porque no tiene tejado alguno y está por reedificar ..». Era preciso emprender su reforma para subsanar estos daños y ampliar su espacio «A de haçer la capilla principal de la dicha yglesia desde el arco toral adentro ynclusive de buena obra de manpuesto conforme a la traça dada por los ofiçiales que la empezaron a labrar». Los trabajos tenían que estar concluidos en noviembre de 1598. El retablo fue realizado entre 1597 y 1604 por Juan de Oviedo y de la Bandera y Juan Martínez Montañés. Por tanto a principios del siglo XVII la iglesia estaba del todo construida y las obras la dotaron de una fábrica con excelentes condiciones para su uso: «Quedo la iglesia con bastante espacio, qual convenía a tan grave convento: el altar mayor con un hermoso retablo y el coro alto y baxo de las mejores piezas de su género que ay en la provincia» ... «

La iglesia es una muestra del último Renacimiento español de finales del siglo XVI, en donde ya asoma

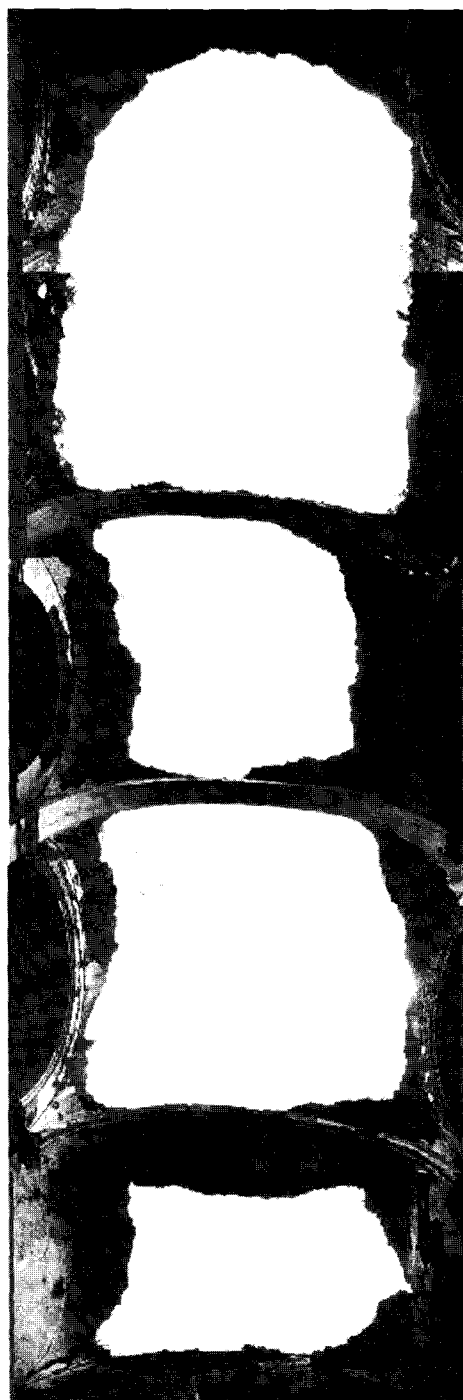


Figura 10



la ruptura con el clasicismo y los inicios del lenguaje barroco. Consta de una sola fachada construida a base de mampostería con verdugadas de ladrillo y una sola nave que se cubre con tres bóvedas vaídas decoradas con pintura al fresco, cuya planta se representa en la figura 11. Estas pinturas tienen por objeto la simulación de una serie de despieces de cantería con el que se disimula la «carencia» de material pétreo sustituido con gran acierto y economía de medios por la fábrica de ladrillo. También los arcos fajones y la parte de los muros situada sobre el nivel de la imposta reciben un tratamiento pictórico.

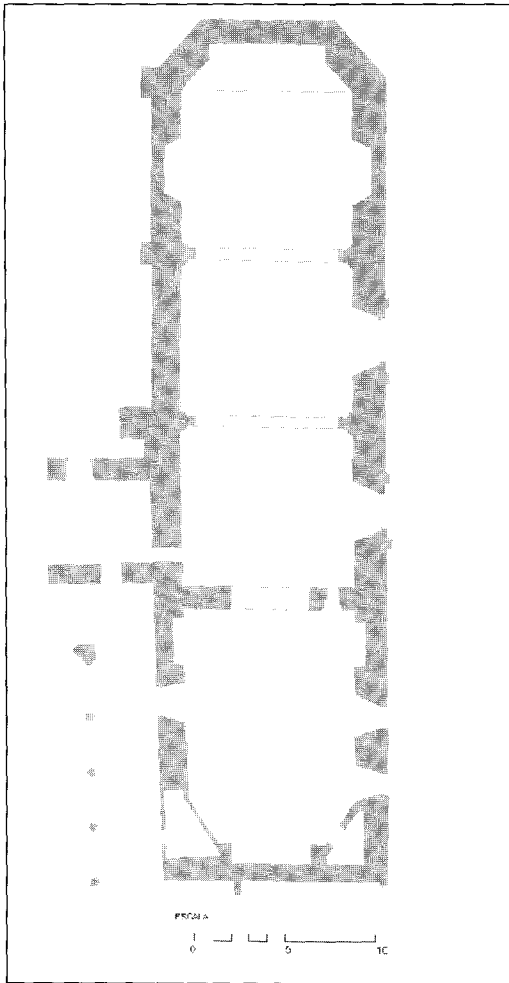


Figura 11

De características similares a la de San Francisco aunque algo menor en dimensiones tiene una luz máxima de 9,50 metros y una altura a la clave de 14 metros. En este caso los muros son continuos sin aligeramiento y apenas sin contrafuertes con un espesor bastante estricto: 1,80 metros aproximadamente.

Con una componente horizontal de los empujes en torno a las 2,7 toneladas por metro lineal en los puntos más altos de las bóvedas vaídas y 1,8 toneladas por metro lineal en los puntos más bajos. Es precisamente esta diferencia de empuje (en la que además el mayor está situado a mayor altura) la que nos hace pensar en un desplazamiento diferente en la cabeza de los muros según se encuentren frente al punto más alto de las bóvedas vaídas o frente a los arcos formeros. Estos últimos por lo tanto pierden buena parte de su función resistente convirtiéndose en elementos simbólicos y de apoyo para la construcción de las bóvedas mediante cimbras muy livianas o casi inexis-

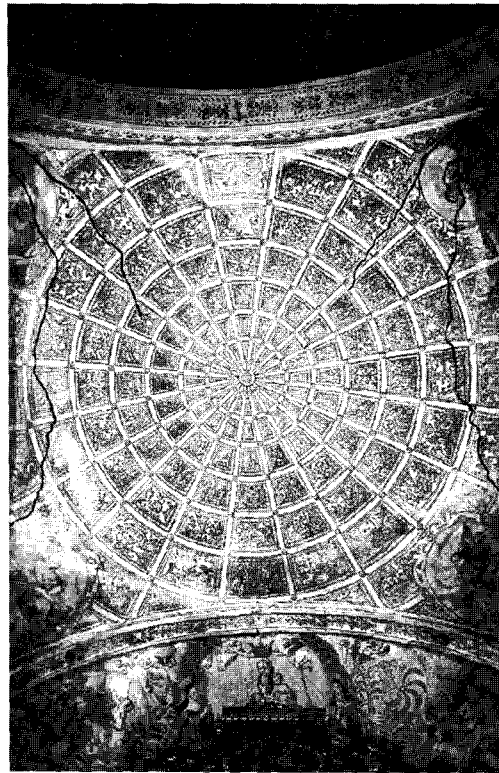


Figura 12

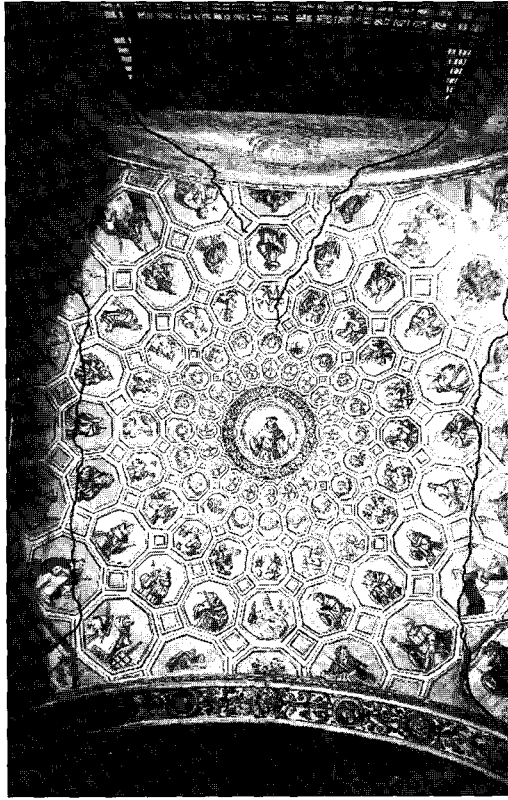


Figura 13

tentes. Estos arcos pasarán sin embargo a desempeñar una importante misión una vez aparecido el agrietamiento, cuando la plementería del casquete central pase a gravitar exclusivamente sobre él.

En la figura 12 y en la figura 13 podemos observar las grietas aparecidas en estas bóvedas. Como puede apreciarse la similitud de comportamiento entre el modelo teórico y la disposición de las grietas, una vez más confirma el acierto del método de análisis elegido y sobre todo el camino a seguir para la intervención y reparación de las lesiones aparecidas.

#### NOTAS

1. Choisy, A: *El arte de construir en Bizancio*. Instituto Juan de Herrera, Cehopu, Cedex. Madrid, 1997, p. 54
2. Ut supra, pp. 131-132
3. Fortea Luna, M, y López Bernal, V: *Bóvedas extremeñas, proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura, Badajoz, 1998, p. 40
4. Heyman, J: *El esqueleto de la piedra, mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Madrid. 1999, p.81
5. Quintero Carrasco, J: *Historia de Fregenal, incluidas tradiciones y leyendas*. Ed. autor. Don Benito, 1981.
6. Peña Gómez, M<sup>a</sup> Pilar de la: *Arquitectura y urbanismo de Llerena*. Universidad de Extremadura. Ayuntamiento de Llerena., Cáceres, 1991.