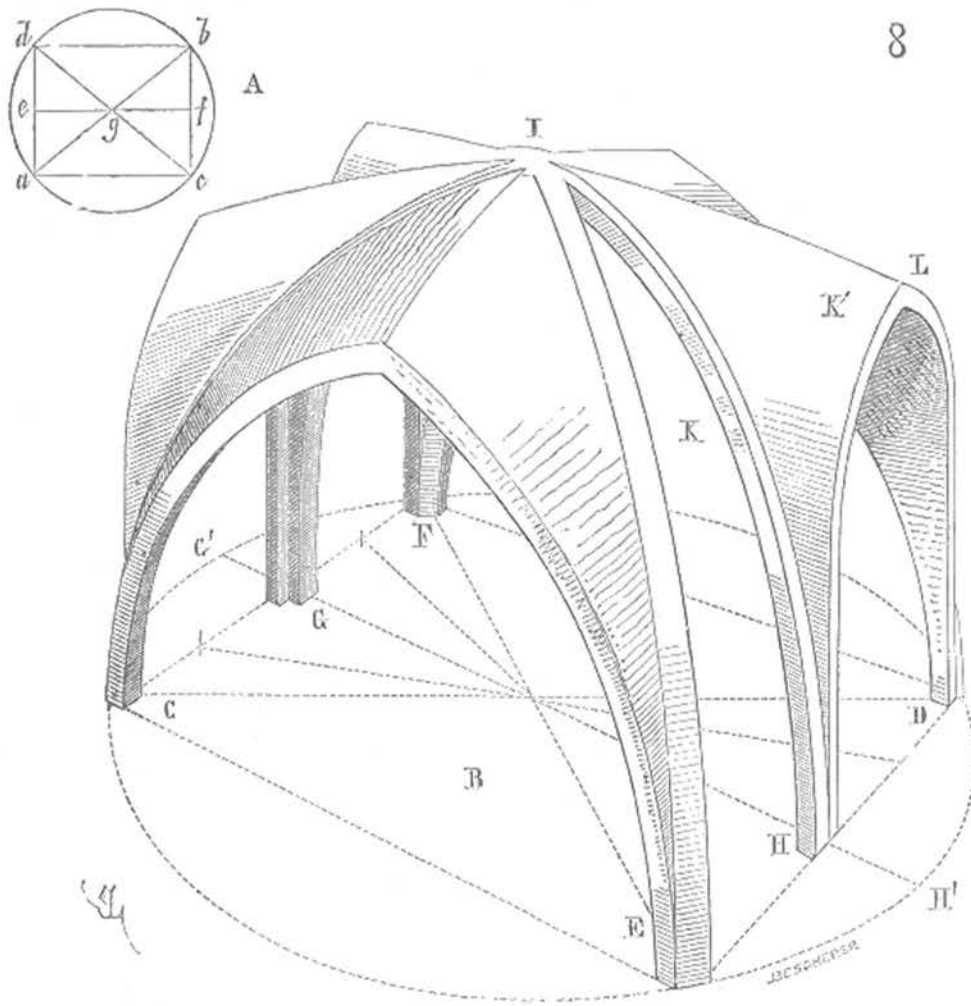


CONSTRUCCIÓN Y TRAZADO DE BÓVEDAS HISTÓRICAS EN ESPAÑA. PROPUESTA DE CONSIDERACIONES PREVIAS A SU INTERVENCIÓN.

Autora: María Dolores Pérez Espinar

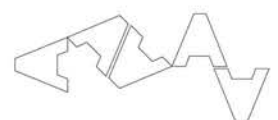
Tutor: Fernando Díaz-Pinés Mateo.



Trabajo Fin de Grado | Grado en Fundamentos de la Arquitectura | Curso 2018/2019 | Convocatoria Septiembre 2019



Universidad de Valladolid



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID

En este trabajo se recopila una síntesis de la forma, el **trazado** y el **comportamiento mecánico** de las **bóvedas** que se han considerado más trascendentes en la arquitectura española, por su reiterado empleo en las obras que significativamente han definido cada estilo arquitectónico y cada etapa en la historia, formando parte de la herencia cultural y del patrimonio histórico.

El presente documento describe cada una de estas **tipologías** y algunas de sus variaciones destacables dentro de las mismas, especificando algunos ejemplos de bóvedas en obras de arquitectura española relevantes. A través de su trazado y de un modo esquemático, se señalará la importancia del sistema de transmisión de los esfuerzos en cada tipo, analizando el comportamiento mecánico y estructural de cada uno, para, finalmente, estudiar y proponer una metodología de **intervención** y reconstrucción de estas bóvedas históricas.

This dissertation aims to gather a synthesis of the form, the **layout** and the **mechanical behaviour** of the **vaults** which have been considered as the most transcendent in Spanish architecture. This consideration is due to its repeated use in the architectural works that significantly have defined each architectural style as well as each phase of the history, becoming part of the cultural heritage and historic patrimony.

Each one of these **typologies** is described in the present essay, as much as some remarkable variations within the same, specifying some examples of vaults in significant Spanish architectural works. The importance of the loads transmission system for each type through its rule will be explained schematically. Finally, by means of studying and analysing mechanical and structural performance for each variation, a methodology for reconstruction and **intervention** in this historic vaults will be proposed.

Palabras clave: **bóvedas; tipologías; trazado; comportamiento mecánico; intervención.**

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.

2 LA BÓVEDA COMO SISTEMA CONSTRUCTIVO EN LA HISTORIA DE LA ARQUITECTURA Y SU EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN ESPAÑA.

2.1 La bóveda de cañón.

- 2.1.1 Orígenes y evolución histórica.
- 2.1.2 Sistema constructivo.
- 2.1.3 Comportamiento estructural.
- 2.1.4 Variaciones dentro de la tipología de bóveda de cañón.
 - 2.1.4.1 Bóveda de arista.
 - 2.1.4.2 Bóveda de cañón peraltada.
 - 2.1.4.3 Bóveda de cañón apuntada.
 - 2.1.4.4 Bóveda de lunetos.
 - 2.1.4.5 Bóveda anular.

2.2 La bóveda de horno o cuarto de esfera.

- 2.2.1 Definición, orígenes y evolución histórica.
- 2.2.2 Sistema constructivo.
- 2.2.3 Comportamiento estructural de las cúpulas y las bóvedas de horno. Concepto de bóveda y cúpula.
- 2.2.4 Variaciones dentro de la tipología de bóveda de cuarto de esfera.
 - 2.2.4.1 Capilla redonda en carpanel.
 - 2.2.4.2 Capilla redonda por cruceros.
 - 2.2.4.3 Capilla redonda por cruceros disminuidos.
 - 2.2.4.4 Media naranja en capilla redonda avenerada.

2.3 La bóveda en rincón de claustro.

- 2.3.1 Definición, orígenes y evolución histórica.
- 2.3.2 Trazado y sistema constructivo.
- 2.3.3 Comportamiento estructural.

2.4 La bóveda de crucería.

- 2.4.1 Orígenes y evolución histórica.
- 2.4.2 Sistema constructivo.
- 2.4.3 Comportamiento estructural.
- 2.4.4 Variaciones dentro de la tipología de bóveda de crucería.
 - 2.4.4.1 Bóveda sexpartita
 - 2.4.4.2 Bóveda estrellada

2.5 La bóveda vaída

- 2.5.1 Orígenes y evolución histórica.

- 2.5.2 Sistema constructivo.
- 2.5.3 Comportamiento estructural.

2.6 La bóveda catalana.

- 2.6.1 Orígenes y evolución histórica.
- 2.6.2 Sistema constructivo.
- 2.6.3 Comportamiento estructural.

2.7 La bóveda extremeña.

- 2.7.1 Orígenes y evolución histórica.
- 2.7.2 Sistema constructivo.
 - 2.7.2.1 Bóveda de arista con retumbo tabicada.
 - 2.7.2.2 Bóveda de arista con retumbo de rosca.
- 2.7.3 Comportamiento estructural.

3 Propuesta de consideraciones previas a la intervención en bóvedas históricas.

3.1 Lesiones más frecuentes

- 3.1.1 Lesiones debido a la degradación de los materiales.
- 3.1.2 Lesiones debidas a fallos en el comportamiento mecánico de la estructura.
- 3.1.3 Lesiones causadas por la acción humana.

3.2 Hipótesis. Determinación de las causas que han provocado la lesión.

3.3 Trabajos de restauración

- 3.3.1 Trabajos de limpieza y mantenimiento.
- 3.3.2 Soluciones para fallos en el comportamiento mecánico de la estructura.
- 3.3.3 Otras intervenciones no estructurales.

4 Epílogo.

5 Bibliografía.

1. INTRODUCCIÓN.

La naturaleza de las bóvedas, su significado, su morfología y comportamiento estructural son temas de amplia extensión que muchos expertos, como Santiago Huerta, Jacques Heyman, Rafael Guastavino o Gaudí u otros autores cuyas obras se encuentran en la bibliografía que acompaña y respalda este trabajo, han estudiado exhaustivamente.

Se recopila aquí una síntesis de la forma, el trazado y el comportamiento mecánico de las bóvedas que se han considerado más trascendentes en la arquitectura española, por su reiterado empleo en obras que significativamente han definido cada estilo arquitectónico y cada etapa en la historia, formando parte de la herencia cultural y el patrimonio histórico.

El presente trabajo describe cada una de estas tipologías y algunas de sus variaciones destacables dentro de las mismas, especificando algunos ejemplos de bóvedas en obras de arquitectura española relevantes. A través de su trazado, se señalará la importancia del sistema de transmisión de los esfuerzos en cada tipo de un modo esquemático, analizando el comportamiento mecánico y estructural de cada uno, para, finalmente, estudiar y proponer una metodología de intervención y reconstrucción de estas bóvedas históricas.

A lo largo de mi carrera, las bóvedas despertaron en mí un gran interés. A sabiendas de que se trata de un tema muy estudiado y en el que no parece que quede mucho por descubrir, sigue resultando para mí una cuestión particularmente atractiva, algo que ha formado parte de mi propia vocación por la arquitectura, singularmente por los monumentos históricos y catedrales. Puede ser que tal impulso se deba a mi procedencia salmantina y al especial interés de mi familia en el arte y la arquitectura, algo que ha estado siempre presente en mi vida. Así, a lo largo de mi formación, las asignaturas relacionadas con la historia del arte y la arquitectura han sido las que más me han incentivado a querer saber más.

El curso académico pasado tuve la oportunidad de vivir la experiencia de un programa Erasmus, con destino en la ciudad toscana de Florencia, cuna del Renacimiento y poseedora de un enorme patrimonio artístico y cultural. Allí, en la universidad Fiorentina, descubrí otro modo de ver, entender y proyectar la arquitectura desde el particular arraigo de Italia a su pasado histórico, por su apuesta por la conservación de la ruina, el estudio de lo antiguo y la conservación de la historia de la que procede su arquitectura. En la metodología de sus asignaturas siempre se procede con un análisis exhaustivo y estudio previo de la preexistencia, y no de la presencia a escala reducida o del emplazamiento concreto de un proyecto, si no de la historia que impregna el lugar en el que este se encuentra. Este estudio previo es a veces, incluso más importante que el desarrollo de la propuesta del proyecto.

Por tanto, el enfoque técnico adquirido a lo largo de mis estudios en la Universidad de Valladolid se ha visto complementado por el encuadre de la preexistencia más artístico e histórico que se desarrolla en Italia. En ese sentido, el año pasado cursé una asignatura denominada “*Laboratorio di Restauro*” en la que se propuso realizar un levantamiento entre toda la clase del monasterio de la Certosa en Florencia. Con motivo de este trabajo, el profesor me solicitó que investigara particularmente acerca de las bóvedas y de los arcos y cómo su trazado se vincula directamente a su comportamiento estructural.

Tras el estudio llevado a cabo durante ese trabajo, con la lectura y consulta de distintas fuentes bibliográficas, y desde lo ya expuesto en relación a mi particular afición por la forma abovedada, a la hora de elegir el tema para el Trabajo de Fin de Grado se ha fundamentado en ir más allá de lo desarrollado hasta ahora y convertir el presente trabajo en una manera de cerrar un capítulo formativo.

Debo admitir que el estudio de las bóvedas es un tema que ya ha sido estudiado en profundidad. En primera instancia, mi interés se centraba en realizar una propuesta de intervención para la restauración de bóvedas en la actualidad. Sin embargo, tras el estudio y la búsqueda específica de información acerca de la restauración contemporánea de las mismas, me he topado con una seria escasez de información existente. He estudiado diversos ejemplos, como el de la catedral de Noto (en Sicilia) y la reconstrucción de sus bóvedas, u otros como los de las iglesias en las que sus bóvedas se desplomaron por efecto de los bombardeos de la Segunda Guerra Mundial. Finalmente, se plantea la conclusión de que una bóveda – en el aspecto estructural- no tanto se restaura, como que se refuerzan sus condiciones de contorno o, directamente, se reconstruye, sea porque se haya producido ya su colapso debido a un fallo estructural o, como en el caso de las bombardeadas, producto de un impacto o un sismo, elementos estos últimos no previstos en su vida útil.

Asimismo, no he encontrado en España ejemplos reseñables de reconstrucción de bóvedas, ya que las labores de restauración en las mismas se limitan a intervenciones de carácter superficial como pueden ser la limpieza y mantenimiento de las mismas o el tratamiento de humedades en su superficie.

Ante la ausencia de ejemplos de bóvedas defectuosas, tras una búsqueda exhaustiva, me puse en contacto con el profesor arquitecto José Carlos Palacios, conocedor en profundidad del tema, el cual admitió igualmente, que el proceso de recuperación de bóvedas tras su colapso no sería tanto de restauración cuanto propiamente de reconstrucción, siguiendo una metodología similar a la de antaño, difiriendo no tanto en los materiales de construcción sino en los medios mecánicos y auxiliares de los que se dispone en la actualidad. La novedad se encontraría sobre todo en los procedimientos actuales previos a la restauración, técnicas modernas como la fotogrametría, aplicables tanto a bóvedas como a otros sistemas constructivos y nuevos materiales tales como la fibra de carbono para el refuerzo estructural.

El estado actual de la cuestión permite que se pueda hallar bibliografía específica de la materia de las tipologías de bóveda existentes en España con facilidad. Por ello, el trabajo desarrollado ha conllevado una búsqueda exhaustiva de la bibliografía. Hablar exprofeso de terminología de bóvedas hace inevitable hacer referencia a temas de cantería, tratados y estudios puramente estructurales o bibliografía específica de estereotomía. Además, se ha consultado bibliografía con un carácter más general e histórico del recorrido que han seguido las bóvedas en España. La recopilación, lectura y consulta de esta bibliografía es, en sí finalmente, uno de los elementos más importantes del trabajo, no solo en el aspecto de la aportación documental sino -durante el proceso- en lo que ha supuesto de aprendizaje. Se presenta en tres grandes bloques: la bibliografía de carácter general, que abarca distintos temas relacionados con las bóvedas (incluyendo los específicos mencionados previamente), otra bibliografía de consulta (libros, revistas, artículos y webs con información que finalmente no han sido fuentes de información directamente empleadas para este trabajo) y recursos electrónicos, como vídeos, webs y artículos en línea, entre otros.

Tras el estudio, lectura e investigación del recorrido de la bóveda en España he decidido explicar las tipologías que se describen a continuación, partiendo del argumento del movimiento –sea desplazamiento, traslación o giro- del arco como sistema generatriz en la proyección y el trazado de las bóvedas, iniciándose con la de cañón como el sistema más básico. Desde este punto de vista, planteo la concepción de la bóveda como la proyección de uno o varios arcos en torno a uno o múltiples ejes, ya sean longitudinales, intersecados o de revolución, originando en este último caso el concepto de cúpula.

En la historia de la arquitectura española, las tipologías estudiadas son las que aparecen con más frecuencia, aunque es innegable que dependiendo de la región de España en la que nos situemos se hallarán con más frecuencia unos modelos que otros.

La bóveda de cañón y la de crucería son esenciales a la hora de explicar la evolución del sistema abovedado a lo largo de la historia, ya que serían sus variaciones las que han dado lugar a otras tipologías. Habitualmente y en distintas zonas de España, los cambios se producen en el trazado del arco, que suele variar con un diseño más abierto y rebajado.

En nuestro país en particular, debido a la tradición cultural cristiana, muchas de las bóvedas que en el presente trabajo se explican, deben su origen y trazado a cuestiones simbólicas de los espacios que pretenden generar. Este interesantísimo tema, que espero poder desarrollar más en el futuro, fue analizado y estudiado brillantemente por el tristemente fallecido arquitecto Félix Escrig que lo reflejó en su libro “La cúpula y la torre”.

No he podido prescindir de mi punto de vista sobre la distinción entre cúpula y bóveda, además de la explicación de la bóveda en rincón de claustro mediante el análisis del diseño de la Catedral de Florencia, que tuve tan presente el año pasado durante mi experiencia Erasmus.

La metodología que he empleado a la hora de realizar este trabajo viene dada por el estado actual de la cuestión. Como ya he comentado, actualmente se dispone de abundante información acerca de las bóvedas, su cálculo, su comportamiento estructural, sus orígenes y su historia, inabarcable en un trabajo de Fin de Grado.

Son numerosas las tesis específicas sobre estos temas citados, pero mi intención es mostrar un enfoque general del sistema constructivo que se ha empleado para los espacios abovedados a lo largo de la historia en nuestro país, para posteriormente analizar modos de intervención actuales en las bóvedas.

El sistema que he seguido a la hora de organizar el presente trabajo se basa en primer lugar, en la definición de cada tipología escogida, explicando de un modo sencillo su sistema constructivo y haciendo una breve alusión al comportamiento estructural de cada una. Asimismo, en relación a ciertas tipologías, he considerado importante definir concisamente algunas variaciones de las mismas, ya que aparecen con frecuencia en obras de arquitectura significativas de nuestro país.

2. LA BÓVEDA COMO SISTEMA CONSTRUCTIVO EN LA HISTORIA DE LA ARQUITECTURA Y SU EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN ESPAÑA.

En el transcurso de su historia, la arquitectura española ha venido interactuando con la propia evolución de la bóveda, la cual ha sido un elemento determinante en la concepción de sus espacios, no solo como un mero sistema de cubrición o de definición constructiva de los mismos cuanto produciendo un efecto determinante tanto en sus trazas y proyectos como en su significación simbólica.

El espacio de la caverna generó en los hombres primitivos la sensación de máxima seguridad y, en cierto sentido, la idea de la bóveda se afincó en esa sensación ancestral. Las formas de las primeras edificaciones fueron extraídas de la naturaleza. En su origen, la bóveda surge por necesidades constructivas y limitaciones de material, lo que intrínsecamente unido al desconocimiento técnico, provocó que la inteligencia humana buscara distintas disposiciones de las piezas de distintos materiales, llegando en algunas culturas a la forma de arco. La funcionalidad y resistencia que proporcionaba esta forma y su progreso se fue trasvasando de unas culturas a otras, propiciando que el concepto de bóveda haya tenido un alcance que prevalece en la actualidad.

Con casi 2000 años de historia, el cristianismo en España remonta sus orígenes a la evangelización desde el siglo I, ligada desde la época de los romanos al concepto simbólico de las bóvedas y cúpulas.¹

Una bóveda es un elemento arquitectónico superficial generalmente elaborado por piezas de mampostería o fábrica, que sirve para cubrir un espacio comprendido entre 2 muros o una serie de pilares alineados. Su geometría se diseña mediante el movimiento de un arco generatriz a lo largo de un eje. Las piezas y componentes de este elemento constructivo trabajan principalmente a compresión.

La problemática a la hora de su construcción consiste en el cálculo de las dimensiones y resistencia de los muros adyacentes, o de los pilares sobre los que se apoyan, ya que deben soportar los empujes laterales de las bóvedas que sostienen.



Figura 1

El origen de la bóveda está en **Mesopotamia**. Debido a la carencia de otros materiales en la región (madera y piedra), los constructores tuvieron que emplear su ingenio, construyendo con pequeñas piezas como adobes y ladrillos. Debido a la escasa consistencia de las piezas no se podía realizar el arquitebe, por lo que se optó por la disposición radial, lo que ofrecía una mayor consistencia que la disposición horizontal de grandes piedras (*Figura 1: Bóveda mesopotámica de barro cocido*). De este modo nació el arco, y de ahí la bóveda, disponiendo una serie de arcos tras otros.²

¹ ESCRIG PALLARÉS, F. *La Cúpula y la torre*. Sevilla: Editorial Arquitectonic, 1994.

² RODRÍGUEZ AMIGO, A. “Bóvedas en España. Las bóvedas extremeñas”, asignatura *Sistemas Constructivos Tradicionales y Tipologías Históricas*. Badajoz: 2012, p.5. Material no publicado.

Hacia el siglo VII a.C la **arquitectura Griega** se impone, combinando elementos bárbaros y autóctonos se constituye el mayor triunfo del mundo antiguo. Se suceden los órdenes clásicos (*Figura 2*) y surgen las reglas de forma, escala y ornamento del edificio.

La cristianización llega a Hispania en el siglo I d.C, difundiéndose paralelamente a la Romanización. La **arquitectura Romana** permanece hasta el siglo IV, cuando se utilizó el arco en las grandes conducciones y vías de comunicación (puentes y acueductos), y en grandes espacios de edificios públicos como en las termas, los anfiteatros o las basílicas. (*Figura 3: Arcos y bóvedas en el Coliseo Romano*). El empleo de nuevos materiales como el cemento y el ladrillo cocido, les permitía una mayor flexibilidad y rapidez en sus obras.

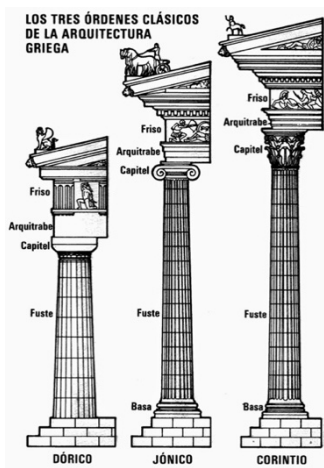


Figura 2



Figura 3

La **arquitectura Bizantina** en España no existió propiamente, sin embargo la influencia de la misma se manifestó entre los siglos V y XV³, periodo en el que se produjeron importantes avances en cuanto al desarrollo de las bóvedas y su modo de sostenerse, ya que se comenzaron a construir pechinas, medias cúpulas y otros elementos de sujeción y contrarresto más divulgados (contrafuertes, muros más gruesos etc.). Paralelamente a esta arquitectura, concretamente entre los siglos V y XI se desarrolla en España la arquitectura **Prerrománica**, con influencias e inspiraciones artísticas procedentes de la herencia clásica grecorromana en la ornamentación, la aportación cristiana e influencias occidentales de origen Bizantino⁴.

³ Esta arquitectura influye desde la construcción de la muralla de Cartagena (siglos IV y V), hasta las influencias más reseñables en la provincia de Zamora (siglo XII), el Címborrio de la catedral de Salamanca (S. XIII), y en Extremadura en el siglo XV. Asimismo, la Catedral Vieja de Plasencia se construyó entre los siglos XIII y XV.

⁴ RODRÍGUEZ AMIGO, A, op.cit. supra, nota 2. Pp. 7-8.



Distintas etapas se suceden dentro de este periodo Prerrománico, entre ellas la **arquitectura Visigoda o tardorromana**, que transcurre desde el siglo V hasta la llegada de los musulmanes a la Península en el 711. Su principal característica fue la introducción del arco de herradura en la arquitectura (*Figura 4: Arco de herradura en la iglesia de San Juan de Baños, Palencia.*), acompañada del empleo de bóvedas de cañón en plantas basilicales o cruciformes.

Figura 4

Las etapas dentro del Prerrománico es la **arquitectura Prerrománica Asturiana**. Se sucede durante primeros siglos de la invasión árabe. Este estilo es el claro precursor del Románico en España, por sus elementos, sus sistemas constructivos y la incorporación de la decoración al edificio. Entre sus rasgos más significativos se destaca el empleo de la bóveda de cañón, en ocasiones peraltada. (*Figura 5: Bóveda de cañón en la iglesia de Santa María de Lena, Asturias.*)



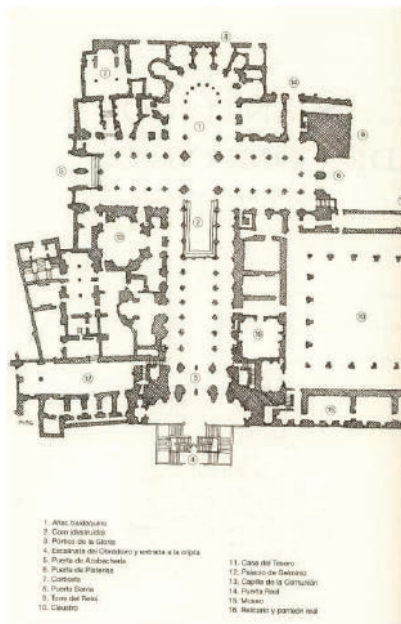
Durante los siglos VIII a XV la Península estuvo ocupada simultáneamente por las culturas cristiana y musulmana, cuando tuvo lugar el desarrollo de la **arquitectura Mozárabe** y la **arquitectura Islámica**. Ambas arquitecturas apostaron por el empleo de arcos de herradura y materiales pétreos, aparejando gruesos muros de diversos modos. En términos de bóvedas también siguieron corrientes similares, destacando la construcción de bóvedas gallonadas, caladas y califales. (*Figura 6: Bóveda califal en iglesia románica del Santo Sepulcro en Torres del Río (Navarra); Figura 7: Bóveda Gallonada en Mezquita de Córdoba.*⁵).



⁵ Ibídem. Pp. 11-15.

La **arquitectura Románica** en España comienza en el siglo XI, en el norte de la Península, extendiéndose de este a oeste. El periodo duró dos siglos aproximadamente, y conformaba una arquitectura de carácter fundamentalmente religioso, ya que lo que principalmente se construyó fueron templos y monasterios.

En el monasterio románico destacó la disposición de un claustro adosado a la iglesia de planta cuadrada, rodeado por una galería de arcos de medio punto sustentados sobre columnas.



La iglesia románica se levantó sobre una planta de cruz latina, cubriendo la nave central con una bóveda de cañón pétreo de gran peso, con arcos fajones y formeros dispuestos para su refuerzo. Estos arcos permitían una mayor altura del espacio y una mayor longitud, pero cuando el edificio tenía tres naves, el cañón de la nave central debía contrarrestarse con bóvedas de arista o de cuarto de círculo en las naves laterales, situando contrafuertes exteriores simultáneamente. La disposición de los contrafuertes permitió la construcción de galerías en las naves laterales⁶.

(Figura 8: Planta de la catedral de Santiago de Compostela y nave central).

⁶ *Ibidem*. Pp. 16-18.

La **arquitectura Gótica** (S.XIII-XV) nace en Francia en la segunda mitad del Siglo XII, sustituyendo el arco de medio punto por el ojival y la bóveda de cañón por la de crucería. Al estatismo y la horizontalidad del Románico le sustituyen el dinamismo y la verticalidad del Gótico.

Las catedrales góticas españolas más importantes son las de Burgos, León y Toledo, destacando las agujas caladas de la de Burgos, la sencillez del trazado y la amplitud de las vidrieras de la de León y la doble girola Toledana. (*Figura 11: Planta, alzado y sección de la catedral de Burgos; Figura 9: Planta y sección de la catedral de Toledo; Figura 10: Planta, alzado y sección de la catedral de León*).

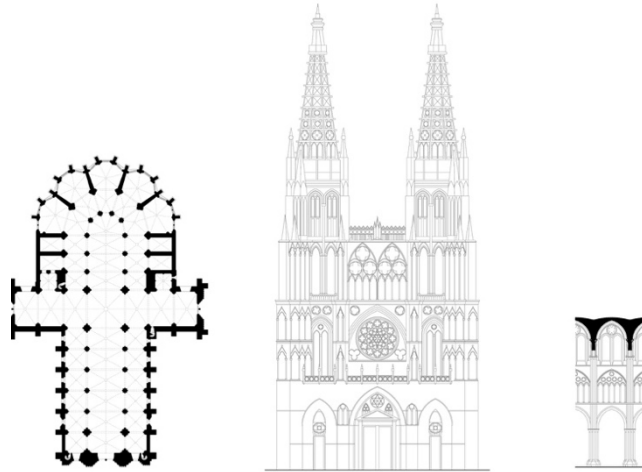


Figura 11



Figura 9

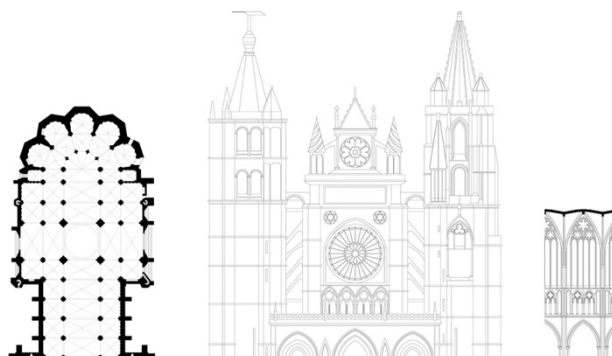


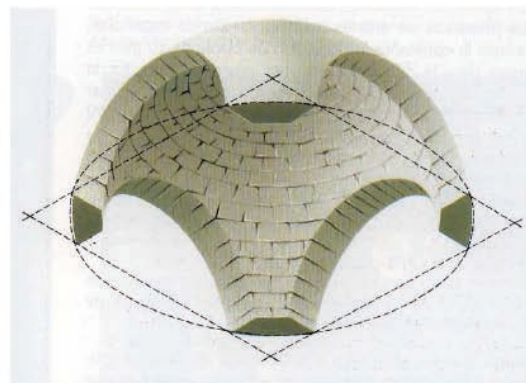
Figura 10

Durante los siglos XV y XVI sucede al Gótico la **arquitectura Renacentista**, que junto con el humanismo, procede de Italia. Dentro de esta concepción arquitectónica se desarrollaron dos claras vertientes destacables en España; el Plateresco y el Manierismo.



Figura 12

El Plateresco transcurre desde las últimas obras góticas hasta el afianzamiento de las formas propiamente renacentistas. Se trata de una vertiente en la que lo decorativo prevalece sobre lo arquitectónico. (*Figura 12: Fachada Plateresca de la Universidad de Salamanca*). Sin embargo, al hablar de clasicismo renacentista en arquitectura, prevalece lo espacial frente al ornamento. De esta época son importantes obras como la catedral de Jaén o la de Granada donde se ensayan las cúpulas vaídas (*Figura*

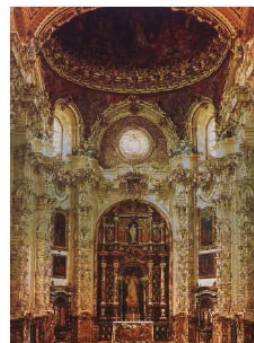
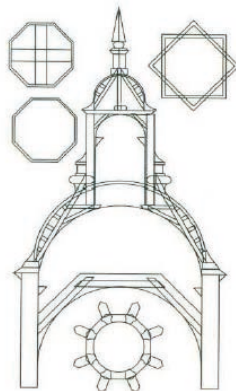


El **Manierismo**⁷ experimental en la arquitectura española surge avanzado el siglo XVI, cuando se produce la crisis del Renacimiento. Realmente no habría un claro estilo Manierista en España como el original italiano, sino que hubo intentos clasicistas renacentistas por parte de algunos autores españoles como Pedro de Machuca con el Palacio de La Alhambra de Granada (1527), (*Figura 14: Patio del Palacio de Carlos V, Granada.*), (considerado más clasicista que manierista), Andrés de Vandelvira con la Catedral de Jaén, o Diego de Siloé con las catedrales de Granada y Málaga. Estas obras que principalmente fueron construidas en Andalucía, forman parte del manierismo experimental español.



La **arquitectura Barroca** se desarrolla en España durante los siglos XVII y XVIII desde cierta contraposición a la arquitectura Renacentista, haciendo prevalecer lo recargado, lo ornamentado y lo complicado. Los ilustradores españoles compararon al autor Borromini en Italia con Churriguera en España. Es una mezcla entre ornamentación y sobriedad.

Se utiliza entonces el ladrillo de forma exclusiva y se construyen falsas cúpulas denominadas “encamonadas” en la meseta castellana, las cuales ofrecían la ventaja económica de fabricarse con madera y :



⁷CHUECA GOITIA, F. *La arquitectura del siglo XVI*. Madrid: Editorial Ars Hispania, XI, 1953, pp. 183-184.

Al mismo tiempo que se desarrolla esta arquitectura, se van produciendo una serie de transformaciones urbanas en las ciudades españolas.

El siglo XVIII en España fue un siglo de expansión demográfica. Con el progreso de la Ilustración la sociedad española va recuperando iniciativas de desarrollo y progreso. Todo parece truncarse con la llegada de la Revolución Francesa de 1789, comenzando una época de enfrentamientos. En esta tesitura emerge la **arquitectura Neoclásica**, que desde mediados del siglo XVIII intentó depurar las ostentosas formas del Barroco predecesor. Desde la Real Academia de Bellas artes española se impusieron las normas neoclásicas a la arquitectura de la época.

El arquitecto exponente español del Neoclásico fue Ventura Rodríguez, autor de la capilla del Pilar de Zaragoza. (*Figura 16: Interior de la Capilla del Pilar*).



Posteriormente se sucede el siglo XIX en España, en el que la nueva sociedad y cultura industrial demandaban una arquitectura que se adaptase a las nuevas necesidades. A la belleza depurada de las formas clásicas se opone la lógica mecánica de los nuevos materiales.

El vidrio y el hierro se van convirtiendo en protagonistas en la **arquitectura del siglo XIX**. Es entonces cuando se utilizan estos materiales en obras públicas, como en la Exposición Universal de París (1889) en la Galería de Máquinas (*Figura 17*). Es sorprendente por sus dimensiones (420x115m), con un único arco de dos medias parábolas que cubre la totalidad del espacio, conformando así la mayor luz de bóveda jamás construida.⁸



Galería de las Máquinas (París)

⁸ BASTERRA OTERO, L. A. “Técnicas de restauración de los edificios históricos”. Asignatura *Historia y teoría de la Restauración Arquitectónica*. Valladolid: 2018. Material no publicado, pp. 20-21.

En España estos nuevos materiales se comenzaron a emplear en las estaciones de ferrocarril, como en la Estación de Atocha (Madrid), obra de Alberto Palacio. Otro ejemplo significativo de esta arquitectura es El Palacio de Cristal del Retiro, en Madrid, del arquitecto Velázquez Bosco. (Figuras 18 y 19). En éste, sobre un espacio realizado en piedra y ladrillo, se realizó una cubierta de hierro y cristal, materiales exponentes utilizados en las bóvedas y cubriciones de la época.



Figura 18



Figura 19

La **arquitectura del siglo XX** o **arquitectura moderna** en España siguió corrientes muy variadas. A finales del siglo XIX aparece el cemento, hecho que influye directamente en la arquitectura del nuevo siglo. En esta época, tras la primera guerra mundial, se suceden las vanguardias, la Bauhaus, el “High Tech” y la arquitectura de los rascacielos, por lo que se emplearon diversas soluciones para la cubrición de los espacios.

Gaudí fue un exponente importante con la construcción de bóvedas catalanas en el siglo XX, como las que se encuentran en la Casa Milá en Barcelona (1906). (Figura 20).

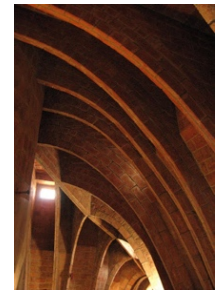
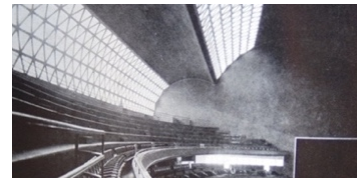
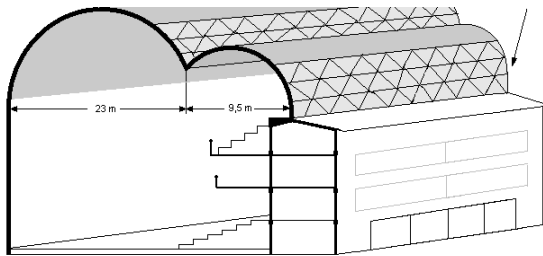


Figura 20

En este siglo destacan en España en términos de construcción de bóvedas, arquitectos como Eduardo Torroja con el Frontón Recoletos en Madrid (1936) (*Figura 21*), cubierto por una bóveda generada a partir de 2 cilindros cuya sección estaba formada por dos arcos semicirculares asimétricos que se cortaban perpendicularmente.



Otro arquitecto reseñable en el uso de la forma bóveda, ya en la arquitectura contemporánea, es Juan Navarro Baldeweg, el cual diseñó el Palacio de Congresos de Salamanca⁹ (*Figura 23*). Esta obra fue construida entre 1988 y 1992, y es destacable por su Sala Mayor (*Figura 22*) en la cual se dispuso una cúpula muy plana suspendida, a modo de bóveda vaída para su cubrición, la cual concentra las cargas en los vértices de los arcos portantes y a su vez permite la entrada y filtración de la luz cenital a través de los cortes generados por el perímetro de los arcos.



Figura 23



Figura 22

⁹ DÍAZ-ROMERAL, P. "Elevación de una cúpula de hormigón en el Palacio de Congresos de Salamanca." en *Informes de la Construcción*. Vol 41, nº 404, noviembre/diciembre 1989. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1989.



Figura 24

En el siglo XX la evolución en la construcción de bóvedas también dio lugar a nuevas tipologías como las bóvedas de cáscara, entre las que se distinguen las bóvedas en forma de paraboloides hiperbólicos del arquitecto español Félix Candela. (*Figura 24: Oceanográfico de la ciudad de las Artes y las Ciencias en Valencia (2003), última obra de Candela*).

(Figura 25: Cuadro cronológico de las bóvedas en España)

ESTILOS Y CULTURAS	APORTACIONES ARQUITECTÓNICAS
EGIPTO (3.000-0 a.C.)	CONSTRUCCION EN PIEDRA (SILLARES)
MESOPOMIA Y PERSIA (3.000-400 a.C.)	EL ARCO Y LA BÓVEDA CONSTRUCCIÓN CON BARRO (ADOBE Y LADRILLO)
ARTE GRIEGO (750-150 a.C.)	ORDENES CÁSICOS (DÓRICO, JÓNICO Y CORINTIO). ESCALA
ARTE CLÁSICO: ROMA (750 a.C. - IV)	EL ARCO EN PUENTES Y ACUEDUCTOS BÓVEDAS DE MEDIO CAÑÓN EN BASÍLICAS Y CUBIERTAS ABOVEDADAS EN TERMAS CONSTRUCCIÓN CON CEMENTO Y LADRILLO COCIDO
ARTE BIZANTINO EN ESPAÑA (V- m.XV)	UTILIZACIÓN DE PECHINAS, MEDIAS CÚPULAS, CONTRAFUERTE Y MUROS MÁS CRUESOS PARA EL SOSTENIMIENTO DE LAS BÓVEDAS CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA Y LADRILLO
ARTE PRERROMÁNICO: ESPAÑA (V-XI)	
ARTE DE LOS VISIGODOS	ARCO DE HERRADURA BÓVEDAS DE MEDIO CAÑÓN Y EN MENOR FRECUENCIA LA DE ARISTA CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA (SILLAR VISIGÓTICO)
ARTE ASTURIANO	ARCO DE MEDIO PUNTO BÓVEDAS DE MEDIO CAÑÓN (PERALTADA) CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA (MAMPOSTERIA O SILLAREJO)
ARTE MOZÁRABE	ARCO DE HERRADURA MÁS CERRADO BÓVEDAS DE NERVIOS DE TIPO CALIFAL Y GALLONADA CONSTRUCCIÓN EN LADRILLOS, MAMPOSTERÍA , SILLARES)
ARTE ISLÁMICO EN ESPAÑA (m. VIII-XVIII)	BÓVEDAS DE CRUCERIA, GALLONADAS Y CALADAS ARCOS DE HERRADURA, POLILOBULADOS
ARTE ROMÁNICO (XI-XII)	BÓVEDAS DE CAÑÓN Y DE ARISTA Y ARCOS DE MEDIO PUNTO CONSTRUCCIÓN EN SILLARES
ARTE GÓTICO (XIII-XV)	BÓVEDAS DE CRUCERÍA O OJIVAL Y ARCOS APUNTADOS O OJIVALES CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA
ARTE RENACENTISTA (XV-XVI)	
PLATERESCO Y MANIERISMO	CÚPULAS VAÍDAS
ARTE BARROCO (XVII-m. XVIII)	CONSTRUCCIÓN EN LADRILLO FALSAS CÚPULAS DE MADERA Y YESO DECORACIÓN INTERIOR
ARTE NEOCLÁSICO (m. XVIII)	DEPURACIÓN DE FORMAS
ARTE DEL SIGLO XIX	NUEVOS MATERIALES, HIERRO, VIDRIO Y CEMENTO ARCOS APUNTADOS Y ESTRUCTURAS ABOVEDADAS DE MAYOR ANCHURA
ARTE DEL SIGLO XX	EL RACIONALISMO Y EL ORGANICISMO CONTRUCCIÓN CON HORMIGÓN, ACERO, VIDRIO

Figura 25

2.1 La bóveda de cañón (Figura 26).



La bóveda de cañón es aquella generada por el desplazamiento de un arco de medio punto a lo largo de un eje longitudinal¹⁰. Se emplea generalmente para cubrir espacios alargados, tales como las naves de las iglesias. Por su facilidad de ejecución, las bóvedas de cañón han sido muy empleadas a lo largo de la historia, y continúan realizándose hoy en día¹¹.

Figura 26

2.1.1 Orígenes y evolución histórica.

Los orígenes de este elemento constructivo se remontan a la época de las antiguas civilizaciones como Mesopotamia, donde se construyeron las primeras bóvedas de cañón con adobe y ladrillos cocidos, empleadas en edificios auxiliares como almacenes o en estructuras subterráneas. Otras civilizaciones posteriores como los Etruscos o los Romanos (quienes fueron los primeros en utilizar sistemas auxiliares para su construcción, y así conseguir cubrir luces de mayores dimensiones), continuaron utilizando este sistema, lo que generalizó la difusión, evolución y desarrollo del mismo hasta nuestros días, a pesar de que en ciertas etapas, como durante el Gótico, su práctica se abandonara gradualmente y cayera temporalmente en desuso¹².

En España, encontramos las primeras construcciones de esta tipología en el periodo Prerrománico, concretamente en la arquitectura visigoda trasladando su arco característico. Ejemplo de ello es la bóveda de cañón construida en piedra en *Venta de Baños*, (*Palencia, España*,) Iglesia datada en el siglo VII (Figura 27).



Figura 27

¹⁰ PONTE BLANCO, F. *Tratado práctico de estereotomía, aplicaciones al corte de piedras, maderas y hierros*. La Coruña: Imprenta Garcybarra, 1921.

¹¹ DIETRICH WILDUNG, K. *Egypt, From Prehistory to the Romans*. Berlín. Editorial: Taschen, 2001.

¹² MAGRO MORO, J.V. y MARÍN SÁNCHEZ, R. *La construcción en la Baja Edad Media*. Valencia: Colección libro docente, Universidad Politécnica de Valencia, 2003, p.85.



Posteriormente, las bóvedas de cañón han sido frecuentes en las iglesias del Barroco y del Neoclásico español, donde normalmente aparecen reforzadas con arcos fajones intermedios, y con lunetos o aberturas laterales para la iluminación del espacio interior. También es frecuente en las iglesias del Barroco que su intradós presente decoración pictórica o de yeserías como en la nave de la *Iglesia del convento de Nuestra Merced* (Sevilla, España). (Figura 28).

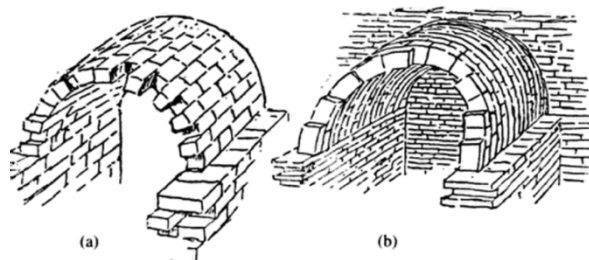
2.1.2 Sistema constructivo.

La construcción se realiza por tajados verticales de piezas que se colocaban a bofetón contra un muro de apoyo en el que se marcaba el eje generatriz de la bóveda. Sobre dicho muro se colocaban con argamasa las piezas hasta acabar la forma generatriz. Así se continuaba con todas las hiladas paralelas hasta que se acababa la primera rosca. Posteriormente se construía una segunda rosca apoyándose en la primera por medio de hiladas convergentes.

Para tener una mayor adherencia entre las piezas, las capas se disponen con cierta inclinación, para hacer que las mismas apoyen unas sobre otras durante el fraguado. Aún así y en el caso anterior también, los arranques de las bóvedas en los salmeres se disponían en capas horizontales que avanzan en desplome.

Para su construcción se pueden emplear cimbras, o prescindir de ellas si se construye la bóveda constituyendo cada anillo mediante la colocación de las piezas en planos inclinados, comenzando desde un muro de cabeza vertical. De este modo, cada anillo sirve¹³ como cimbra permanente para el siguiente.

(Figura 29: Izqda. Construcción de bóveda de cañón con cimbra; a) Construcción de bóveda de cañón sencilla y b) construcción alternativa sin cimbraje).



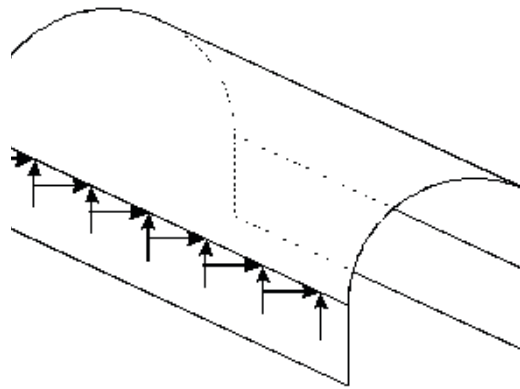
¹³ MOYA BLANCO, L. *Bóvedas Tabicadas*. Madrid: Ministerio de la Gobernación, Dirección General de Arquitectura, Servicio de publicaciones, 1947. Pp. 15-16.

2.1.3 Comportamiento estructural.

Como en su definición se indica, las bóvedas de cañón se generan a partir de la sucesión lineal de arcos de medio punto, por lo que su comportamiento estructural se resume al estudio estructural del arco. Dependiendo del tipo de sección de bóveda de cañón y de su geometría, se condiciona la distribución de las cargas que ésta soportará¹⁴.

El empuje resultante que el peso de la bóveda ejerce se distribuye tanto vertical como lateralmente en los muros laterales que la sostienen. Para contrarrestar estos empujes existen varias opciones:

- Aumentar el grosor de los muros sobre los que se apoya la bóveda.
- Uso de arcos fajones apoyados en columnas o pilastras distribuidos a lo largo de la bóveda.
- Utilización de contrafuertes apoyados en las caras externas de los muros.



(Figura 30: Reacciones horizontales y verticales en una bóveda de cañón, conceptualizada como una serie de arcos de medio punto).

Una de las contrariedades que con mayor frecuencia ocurren en este tipo de cubriciones es la separación de sus apoyos, lo que puede producir agrietamientos y deformaciones en su geometría.

Para su restauración se debe recurrir al análisis del modelo estructural, estudiando la geometría de la bóveda así como analizando las cargas gravitacionales y externas a las que puede estar sometida.

¹⁴ GARCÍA CASCO, A. Tema 8: Fallos en la estructura, asignatura *Restauración de monumentos/ Restauración de materiales pétreos*. Petrología y Geoquímica de la Universidad de Granada. Material no publicado. Granada, 2007. [Consultado el 7 de julio de 2018]. Disponible en: https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/0_restauracion.htm

2.1.4 Variaciones dentro de la tipología de bóveda de cañón.

2.1.4.1 Bóveda de arista (Figura 31).

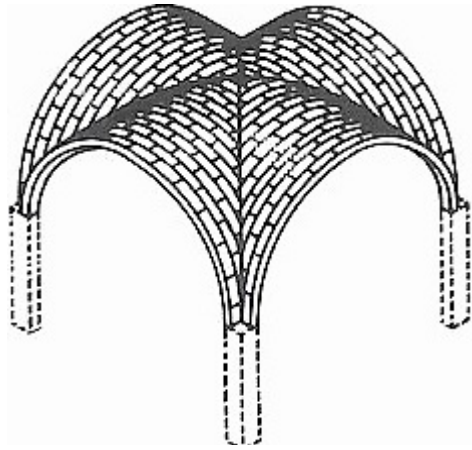


Figura 31

Se trata de una cubrición utilizada principalmente para plantas cuadradas, con una geometría configurada por la intersección de dos bóvedas de cañón.

Son bóvedas de fácil construcción mediante cimbraje o estructuras auxiliares, o gracias al apoyo en muros laterales¹⁵.

Su construcción se remite a la época de los antiguos romanos, siendo posteriormente muy utilizada durante el periodo Románico, quedando suplantada en el Gótico por la bóveda de crucería, cuando se apostó fuertemente por las estructuras arqueadas apuntadas.

Posteriormente se retomó su utilización en el Renacimiento, gracias a artistas como Brunelleschi, pero su construcción entonces fue realizada con técnicas más avanzadas.

A lo largo de la historia se ha utilizado principalmente para la cubrición de espacios situados en las naves laterales de iglesias, catedrales y basílicas.

Uno de los primeros ejemplos que podemos encontrar de este tipo de bóvedas es en las termas de Diocleciano en Roma (Figura 32), a finales del Siglo III, y más adelante encontramos bóvedas de arista en la Catedral de Santiago de Compostela¹⁶ (Figura 33).



Figura 32



Figura 33

¹⁵ MORALES Y MARÍN. *Diccionario de la Arquitectura Española*, vol.6 en *Historia de la Arquitectura Española*. Barcelona: Editorial Planeta, 1947.

¹⁶ CAPITEL, A. *Metamorfosis de monumentos y teorías de la restauración*. Madrid: Alianza Forma Editorial, 1988.

2.1.4.2 Bóveda de cañón peraltada.

Bóveda de cañón cuya generatriz a lo largo de un eje longitudinal es un arco peraltado. En este tipo de cubriciones la flecha es mayor que la mitad de la distancia entre los apoyos o estribos¹⁷. (Figura 34: Variantes del arco de medio punto).

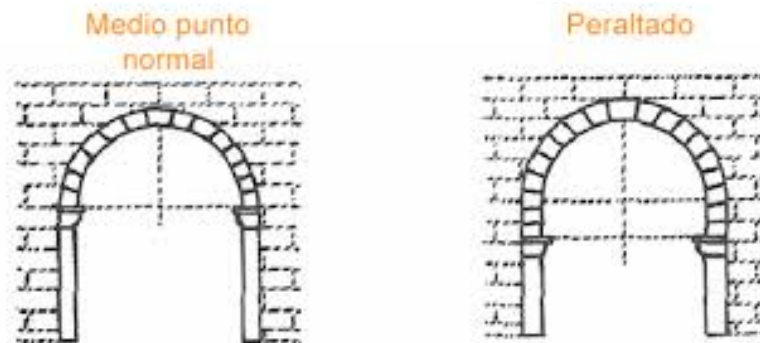


Figura 34

El ejemplo más significativo del uso de este tipo de cubriciones en la península es la nave central de la iglesia de Santa María del Naranco (Oviedo, Asturias) (Figura 35), aunque también se ha utilizado este tipo de bóvedas en la Iglesia de Santiago del Burgo en Zamora (Figura 37), o en la Basílica de San Isidoro en León (Figura 36).



Figura 35



Figura 37

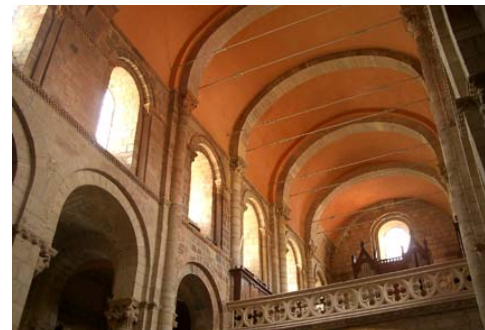


Figura 36

¹⁷ MORALES Y MARÍN, op. cit. supra, nota 15.

2.1.4.3 Bóveda de cañón apuntada.

Se trata de aquella que forma un arco apuntado en su desplazamiento a lo largo de dos muros paralelos o su eje longitudinal, cubriendo el espacio que hay entre ellos¹⁸. (Figura 39: Esquema de una bóveda de cañón apuntada).

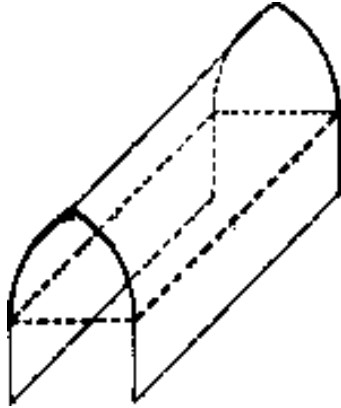


Figura 39



Figura 38

Algunas muestras de este tipo de bóvedas las encontramos mayoritariamente en el norte de España, como en la iglesia del monasterio trapense de Oseira, en San Cristóbal de Cea (Orense) del Siglo XII. (Figura 38).

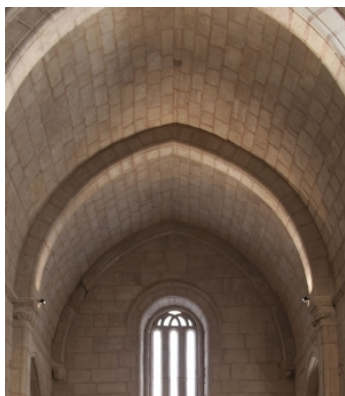


Figura 40

Este tipo de bóvedas muestran la transición entre el periodo Románico y el Gótico en la arquitectura española. En la Ermita de Santa María de Sorejana (La Rioja) la cabecera de dos tramos consta de una bóveda de cañón muy apuntada reforzada bajo arcos fajones asimismo apuntados (Figura 40), sin embargo, la nave central de tres tramos, está cubierta por una bóveda de crucería más característica del Gótico del siglo XIV. En este ejemplo, la transición de ambos periodos se aprecia claramente en las ventanas, ya que la Ermita consta de vanos de medio punto, pero también se aprecian ventanas con arcos incipientemente apuntados en su muro sur.

En el monasterio Cisterciense de Santa María de Valbuena (Valbuena de Duero) (Figura 41), también se encuentran bóvedas de cañón apuntadas y arcos apuntados. El complejo es mayoritariamente de estilo Románico, aunque durante su construcción evolucionó posteriormente hacia las formas góticas. El comedor de los monjes (Figura 42), es el espacio donde la presencia de este tipo de bóvedas se hace más evidente. El espacio se divide en 4 tramos marcados por los arcos perpiaños apuntados, de este modo se consigue un gran espacio diáfano. Los arcos descansan sobre ménsulas en los muros laterales.

¹⁸ Ídem.



Figura 41



Figura 42

En la Iglesia de Santa Maria D'Aneu (La Guingueta d'Aneu, Cataluña) (Figura 43), que se data en el siglo XI, aunque durante los siglos XIV y XV se unificaron en una única nave las 3 naves primitivas. Esta nave se corona con una bóveda de cañón apuntada y cuenta con arcos ciegos decorados por pinturas lombardas, las cuales le otorgan la fama a este monasterio.

La restauración de esta iglesia¹⁹, realizada durante el 2014 es de notable importancia. Con una inversión de 360.000€ se consolidó la estabilidad de la estructura gracias a:

- Refuerzo de los arcos mediante platabandas de acero y entramados de madera.
- Colocación de tirantes en el sentido longitudinal de la nave, perforando los muros laterales para su incorporación.
- Inserción de tensores e inyección de cemento fluido sin retracción.
- Rehabilitación de las cubiertas mediante la sustitución de los elementos en mal estado tales como vigas y tableros de apoyo. Posterior colocación de losas de pizarra.
- Sellado de juntas y relleno de grietas en las paredes interiores.
- Reposición de los paramentos defectuosos.
- Enlucido y enfoscado del zócalo exterior entre otros.



Figura 43

¹⁹DELEGACIÓ MCS. “El Departamento de Cultura y la Obra Social “La Caixa” presentan la restauración de seis monumentos románicos de los valles de Aneu” en *Bisbat d’Urgell*. Urgel, 2015. [Consultado el 13 de julio de 2018] Disponible en: <https://www.bisbaturgell.org/index.php/es/mitjans-de-comunicacio/noticies/2015/7674-inauguracio-dels-treballs-de-restauracio-de-sis-esglesies-de-la-vall-d-aneu>

2.1.4.4 Bóveda de lunetos.

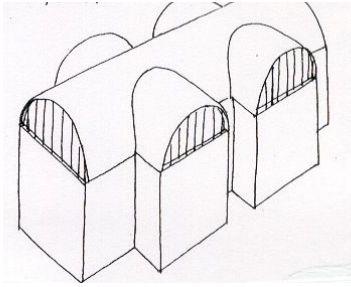


Figura 44

Una bóveda de lunetos (Figura 44), es aquella conformada por la intersección de 2 o más bóvedas a distinta altura. Los lunetos son pequeñas bóvedas con forma de media luna que generalmente se utilizan para incluir vanos que proporcionen luz a la bóveda principal²⁰.

La Iglesia de San Martín Obispo y San Antonio Abad (Figura 45), es uno de los ejemplos de cubrición con bóveda de lunetos más característicos en España. Se trata de una iglesia inicialmente gótica construida en el siglo XII sobre los restos de una mezquita musulmana. Fue en el siglo XVI (en el periodo del Renacimiento español), cuando se incorporó la bóveda de cañón con lunetos a la iglesia, reforzada mediante arcos fajones, y decorada en toda su superficie con relieves dorados de elementos vegetales y animales.



Figura 45



Figura 46

Otros ejemplos de bóvedas de lunetos los encontramos en la iglesia barroca de San Nicolás de Bari (Casbas de Huesca) o en Sevilla, en la Iglesia de la Trinidad (Figura 48), en el interior de la iglesia del monasterio de la Cartuja (Figura 46), o en la iglesia de la Magdalena (Figura 47).



Figura 48

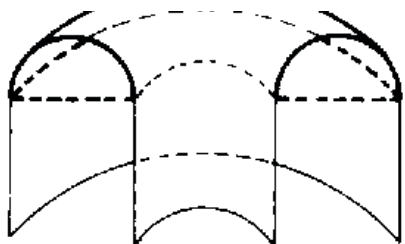


Figura 47

²⁰ MOYA BLANCO, L. op.cit. supra, nota 13.

2.1.4.5 Bóveda anular.

Se trata de una tipología de bóveda de cañón, la variación es su geometría en forma de anillo. Se monta sobre paredes circulares concéntricas. Se empleó para cubrir deambulatorios y girolas en obras de arquitectura cristiana, sin embargo los romanos las utilizaron en edificios destinados a ofrecer espectáculos como teatros y anfiteatros. (Figura 49: Esquema de una bóveda anular).



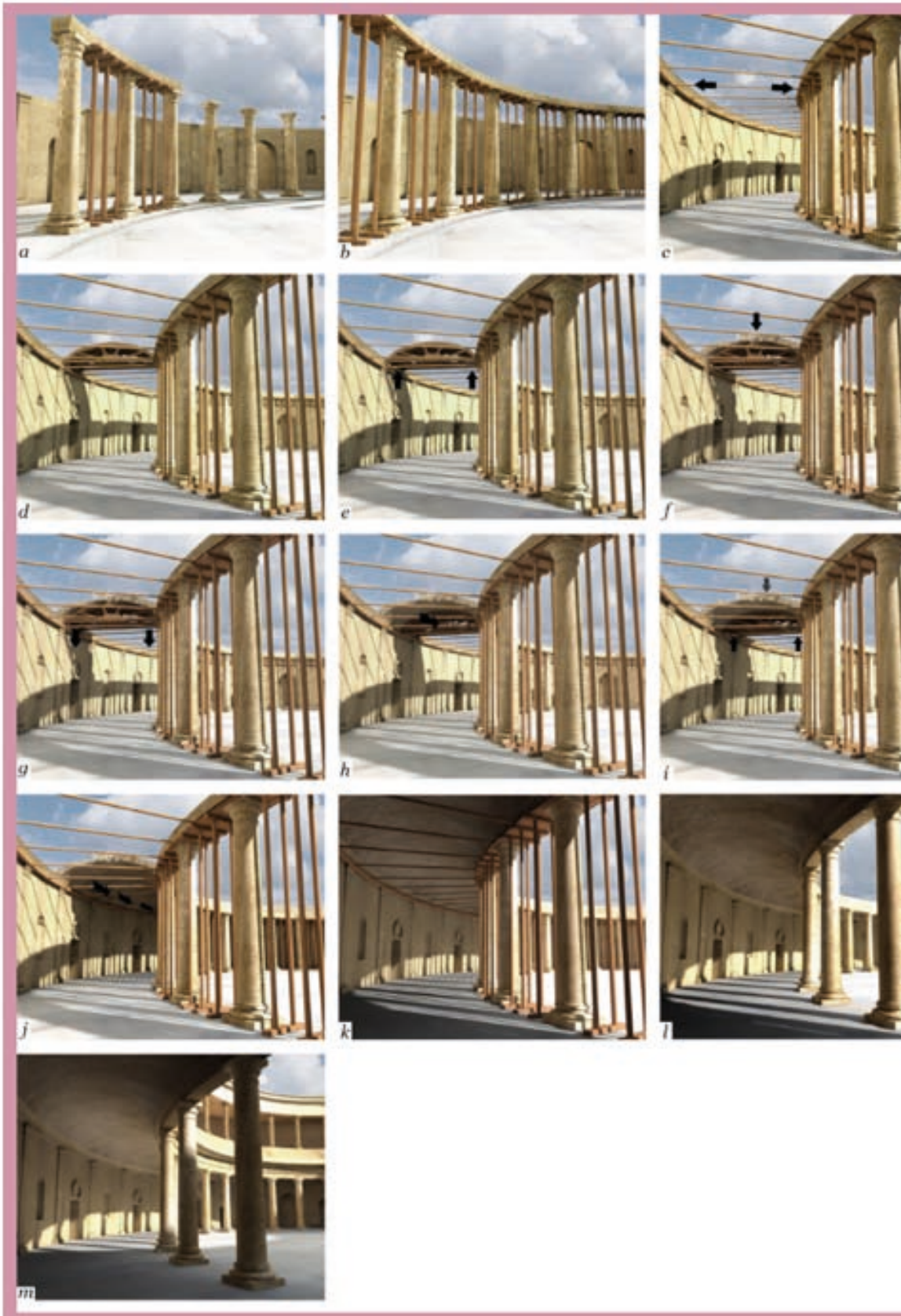
La bóveda anular más significativa y representativa en España es la del Palacio de Carlos V en Granada²¹ (Figura 50). Se trata de un sistema estructural mecánicamente autoestable una vez finalizada la construcción, sin embargo, durante su construcción la estructura resultaba inestable. De este modo, los empujes hacia el exterior se equilibran por el peso de la masa del perímetro, mientras que los empujes que van hacia el interior son absorbidos por las dovelas que forman el arco plano apoyado sobre las columnas.

Se intentó imitar la estructura y construcción del Teatro Marítimo de la Villa Adriana (Tivoli, Italia).

Construida en piedra calcarenita bioclástica, se traza sobre un arco carpanel por tranquil muy rebajado y sin contrafuertes en uno de sus apoyos, lo que constituye el mayor logro estructural del proyecto.

(Figura 51: Esquema del proceso constructivo de la bóveda anular del palacio de Carlos V; a. - Replanteo de las columnas., b. - Cimbra del arco plano., c. - Colocación de los dos anillos de cerchas y acodamiento perimetral., d. - Montaje de la cimbra sobre las vías de deslizamiento, e. - Acuña de la cimbra para facilitar el descimbrado., f. - Construcción del primer tramo de la bóveda., g. - Descimbrado, h. - Desplazamiento de la cimbra., i. - Acuña y construcción del segundo tramo de bóveda., j. - Repetición del proceso., k. - Finalizada la construcción del toroide, solo falta retirar la cimbra del anillo y los codales., l. - Bóveda anular concluida, autoestable., l. - Bóveda anular concluida, autoestable., m.- Construcción del segundo anillo de columnas y entablamento).

²¹ LÍNDEZ, B., RODRÍGUEZ, M. “La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada. Hipótesis constructiva” en *Informes de la Construcción*. Granada: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015. Vol 67, nº 540: e125. [Consultado el 16 de julio de 2018] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.004>.



2.2 La bóveda de horno o cuarto de esfera.

En el arco radica el parentesco entre bóveda y cúpula, pero también su diferencia. A continuación, en el del comportamiento estructural quedará explicado lo que se entiende por cada uno de los términos, ya que en ciertas tipologías como la bóveda de horno, en rincón de claustro o la bóveda vaída se asemejan hasta tal punto de resultar el mismo concepto.

2.2.1 Definición, orígenes y evolución histórica.

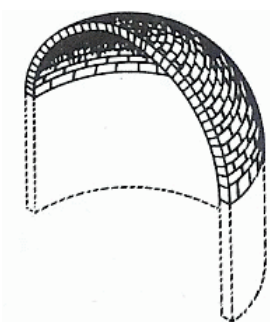


Figura 52

Una bóveda de horno o de cuarto de esfera es una bóveda semiesférica cortada por un plano vertical (Figura 52). Parece entonces natural construirla como tal bóveda esférica, es decir, por lechos troncocónicos que serán, según los materiales, o bien hiladas de dovelas, o bien de ladrillo. Su proyección semicircular la hace perfecta para cubrir ábsides semicirculares²².

Se comienza a construir en la época de los romanos, que desarrollaron las bóvedas de mampostería en sus formas puras. Más tarde se utiliza en la época románica y en la bizantina.

2.2.2 Sistema constructivo



Figura 53

Como se ha indicado anteriormente, la bóveda de cuarto de esfera es una bóveda semiesférica (cúpula), cortada por un plano vertical, y por tanto se construirá como ésta. El diseño de una cúpula requiere tomar una serie de decisiones previas, como por ejemplo la elección del diámetro de la base, lo cual determina inmediatamente su altura. En segundo lugar el reparto de dovelas en el plano de impostas. Finalmente y lo más importante, se dispone el número de hiladas para el cierre de la cúpula²³.

(Figura 53: *El cielo de Salamanca, bóveda de cuarto de esfera en el Patio de Escuelas Menores de Salamanca*).

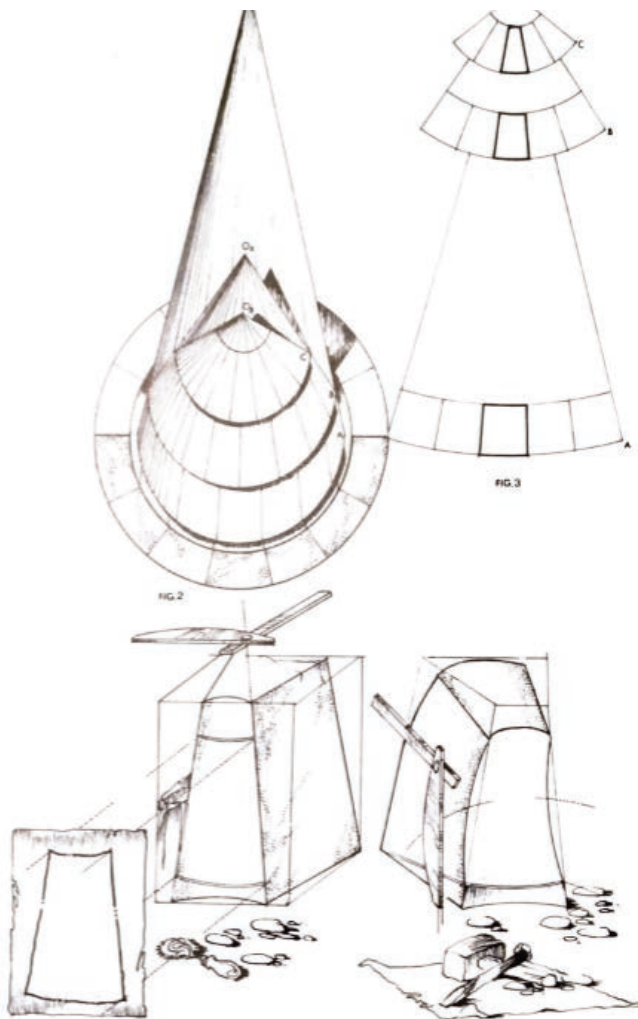
Uno de los métodos constructivos más simples y antiguos consiste en levantar hiladas sucesivas de mampuestos, cerrándose progresivamente hacia el centro. Este sistema es antiquísimo, y permite cubrir espacios de diámetro relativamente pequeño. La construcción resultante suele denominarse falsa cúpula o aproximación de hiladas al conseguirse por este medio. En este sistema cada anillo de mampuestos logra al “cerrarse” la estabilidad necesaria, y el comportamiento estático es el de una estructura adintelada, sin esfuerzos horizontales relevantes. Están conformadas por dovelas, con una clave superior que equilibra los esfuerzos²⁴.

²² DE LA PLAZA ESCUDERO, L. *Diccionario visual de términos arquitectónicos*. Madrid: Ediciones Cátedra, 2012.

²³ PALACIOS, GONZALO J.C. *Trazas y cortes de cantería en el Renacimiento español*. Madrid: Ministerio de Cultura. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, 1990, pp.137-160.

²⁴ CHOISY, A. *El Arte de Construir en Bizancio*. Edición a cargo de Santiago Huerta Fernández y F. Javier Girón Sierra, Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1997.

(Figura 54: Construcción de bóveda de horno por el método de baivel)



Para la talla de las dovelas se hará uso del método que tiene el baivel²⁵ como protagonista. El proceso será común a todas las bóvedas de rotación, por tanto será aplicable a todos los casquetes esféricos que tengan sus dovelas dispuestas en hiladas concéntricas alrededor de un eje.

Una vez construido el baivel, se escogerá un bloque de piedra capaz. Con una rodela podría calcarse la silueta de la dovela dibujada en el patrón a una de las caras del prisma de piedra. Una vez dibujada ésta, se acometería la talla del bloque desde su cara superior con el baivel, cuidando que el inglete de éste vaya recorriendo el dibujo de la dovela sobre la piedra. En todo momento el baivel nos irá dando una orientación de la masa de la piedra a descantillar. De una sola pasada se obtiene una aproximación a la curvatura interior y a la vez el derrame de la cara lateral. Si se da la vuelta al baivel y se repite el proceso por la otra arista de la dovela, será el derrame de la cara opuesta lo que se obtiene.

Finalmente, quedarían por labrar los lechos superior e inferior. Para ello, de nuevo, se usará el baivel colocado en posición vertical. El baivel debe girarse a lo largo de su movimiento, y este giro permite obtener exactamente la curvatura esférica de la cara interior de la dovela²⁶.

²⁵ Baivel o Baivel: Escuadra falsa con un brazo recto y otro curvo empleada para labrar piezas de cantería.

²⁶ PALACIOS, GONZALO J.C. op.cit. supra, nota 23.

2.2.3 Comportamiento estructural de la cúpula y la bóveda de horno. Concepto de bóveda y cúpula.

El mecanismo resistente de las cúpulas tiene una particularidad que las hace superar ampliamente la capacidad estructural de los arcos. Cada meridiano se comporta como si fuera un arco funicular de las cargas aplicadas, es decir, resiste las cargas sin desarrollar tensiones de flexión para cualquier sistema de cargas²⁷ (Figura 55).

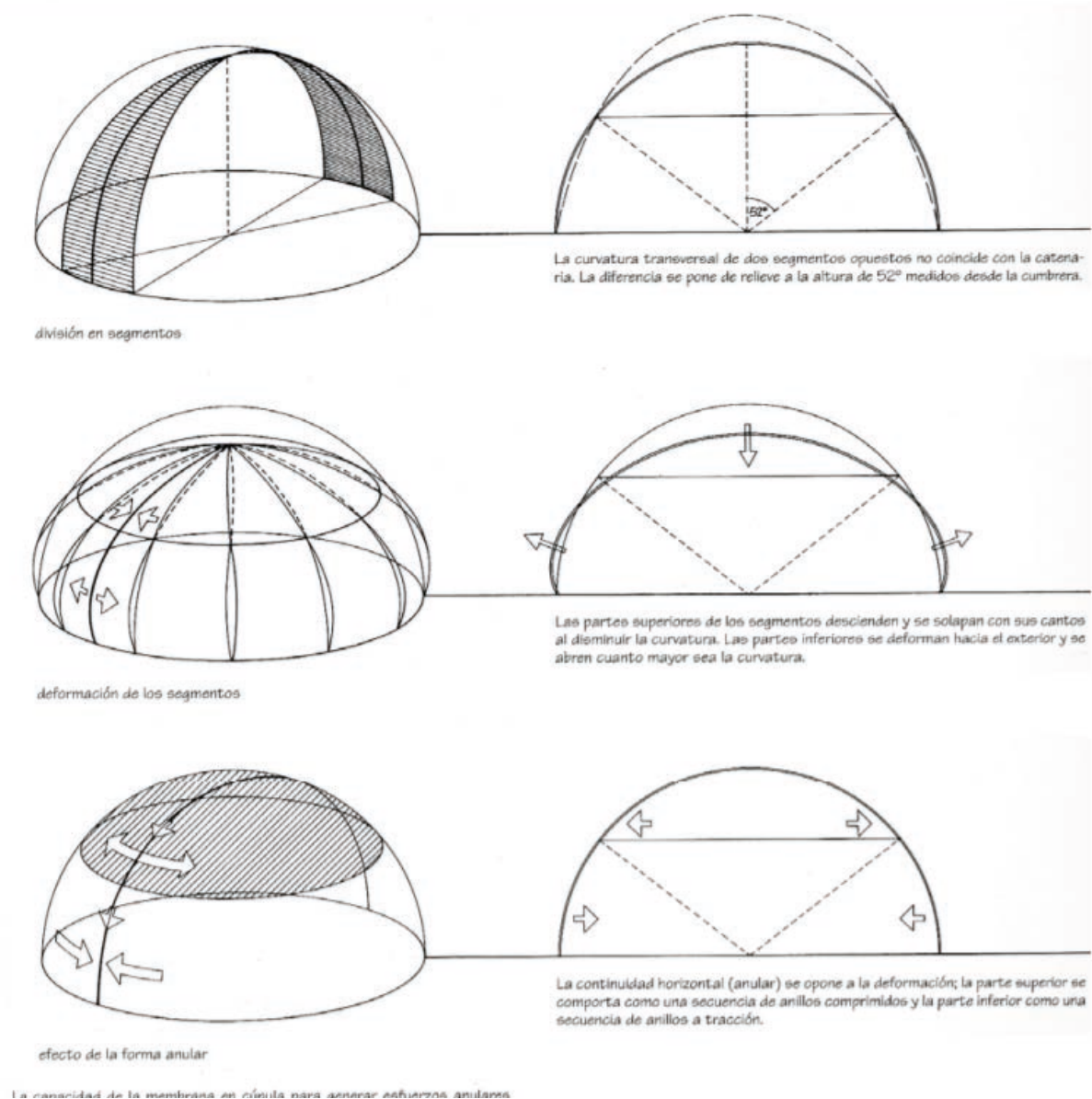


Figura 55

²⁷ REQUENA RUIZ, I. *Análisis de tipologías estructurales. Bóveda, lámina, cúpula y paraboloides*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2004. Material no publicado.

La dirección esférica da lugar a tracciones en los meridianos paralelos de riñones, y la dirección rebajada genera tracciones en el anillo extremo, por lo que requiere estribos muy fuertes. La cúpula posee unos paralelos que restringen su desplazamiento lateral desarrollando tensiones en anillo y haciendo posible un comportamiento de membrana. Para que todo esto tenga lugar y la cúpula solo posea esfuerzos propios de membrana, los bordes han de poder experimentar libre movimiento horizontal en sus apoyos. En caso de que fuera empotrada se presentarían unas pequeñas flexiones en los arranques que la propia cúpula amortiguaría rápidamente²⁸.

La cúpula puede imaginarse como unos gajos o arcos meridianos cuya flexión está impedida por los anillos horizontales. En las zonas en las que los gajos quieren hundirse hacia dentro, los paralelos se lo impiden trabajando a compresión, mientras donde los gajos quieren abrirse, el paralelo ha de evitarlo resistiendo en tracción (Figura 56).

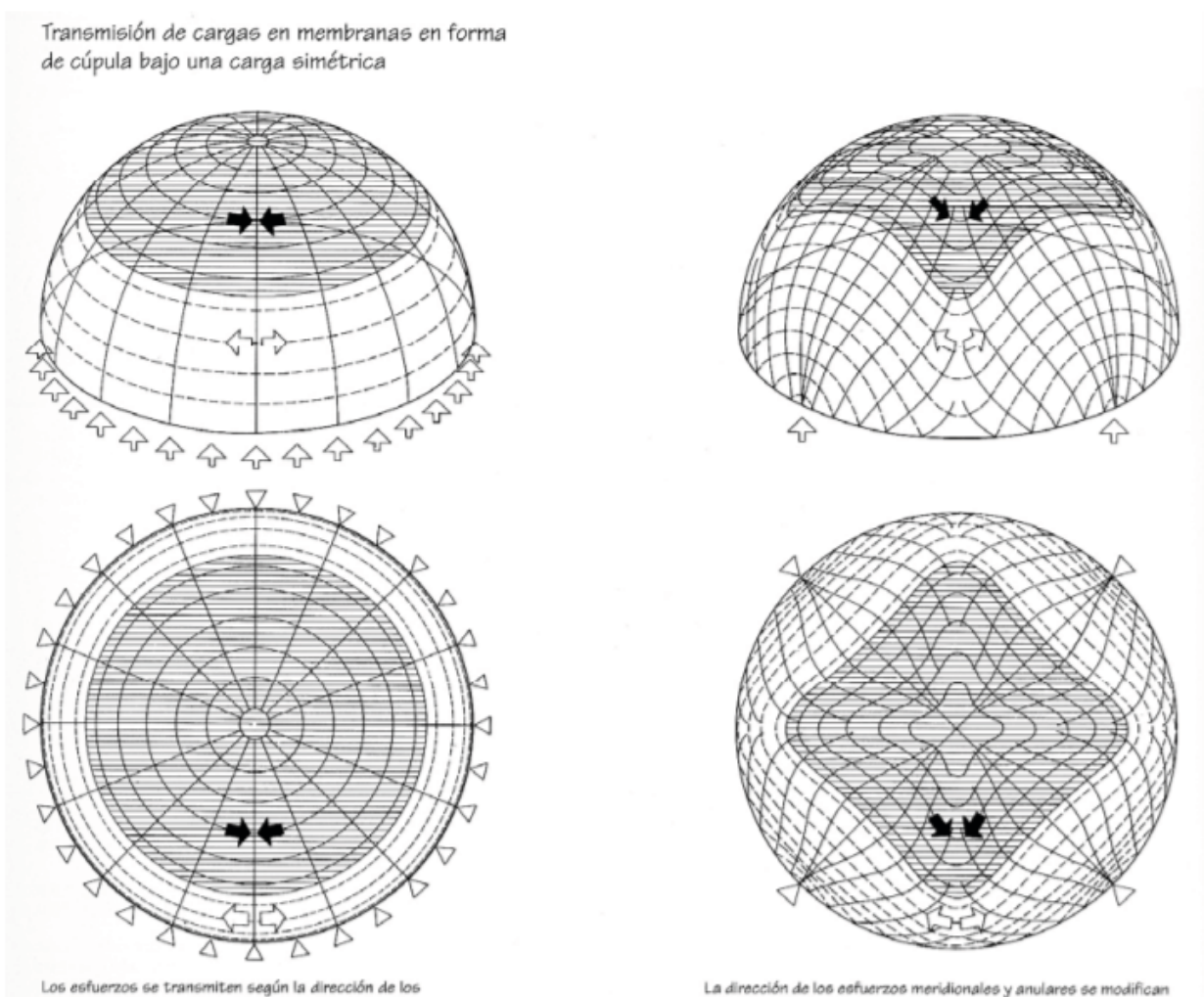
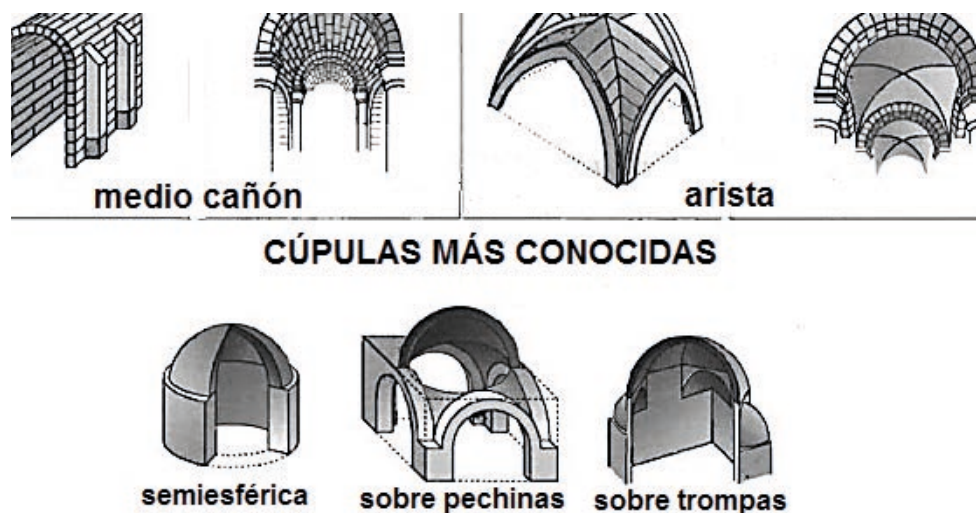


Figura 56

²⁸ Ídem.

Las deformaciones de la lámina ya no son lo suficientemente pequeñas para poder prescindir de ellas, ya que la obligada continuidad entre su superficie y el anillo exterior provoca una flexión de los meridianos. El anillo de borde, bajo las componentes radiales, sufre una dilatación, mientras que la lámina, para seguir este movimiento, necesitará deformar sus meridianos, para amoldarse a la nueva dimensión del anillo. La banda continua es la que más flexiones sufre, además de las tracciones que produce la dilatación circunferencial, que tiende a producir, en esa zona periférica, grietas radiales. En cúpulas de poco espesor, la diferencia de temperaturas entre el trasdós y el intradós es importante al igual que las sobrecargas repartidas desigualmente, ya que pueden producir el colapso de la estructura²⁹.



Como se ha expresado anteriormente, las similitudes y diferencias entre cúpula y bóveda residen en la proyección del arco. La generatriz de la cúpula la forma un solo arco en rotación, mientras que la bóveda puede servirse de varios arcos que se entrecruzan en su proyección. La cúpula tiene además leyes constructivas propias y se sirve de elementos auxiliares estructurales exclusivos como tambores, trompas o pechinas y en muchas ocasiones se coronan cimborrio, pieza que les confiere una identidad distinta (Figura 57).

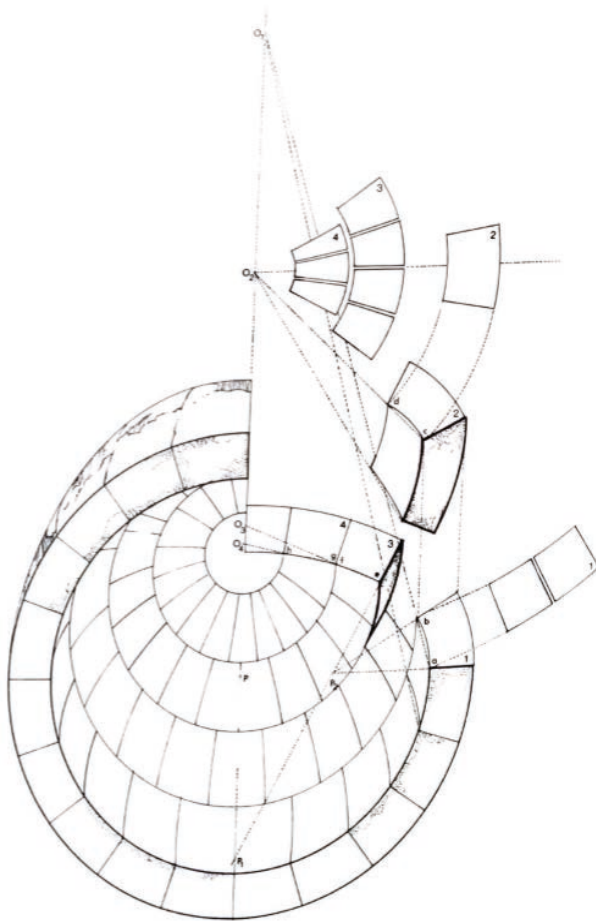
Cuando la cúpula presenta la forma característica de semiesfera, la diferencia con la bóveda salta a la vista, pero si aquella reduce su flecha hasta el punto de convertirse en casquete se confunden con facilidad hasta el punto de denominar bóveda vaída a lo que realmente es una cúpula rebajada.

Actualmente para estas tipologías de bóvedas de morfología esférica, los expertos reconocen ambas denominaciones.

²⁹ Ídem.

2.2.4 Variaciones dentro de la tipología de bóveda de cuarto de esfera.

2.2.4.1 Capilla redonda en carpanel (Figura 58).



“Su planta es circular, mientras que su sección dibujaría un arco carpanel, es decir un arco oval, trazado mediante tres centros. La sección de este arco se ha dividido en cuatro hiladas de dovelas a las que habría que añadir la dovela de la clave”³⁰.

“Dibujada la bóveda, se pasará a calcular los diversos patrones. El patrón de la primera dovela queda proyectado sobre el plano que pasa por sus cuatro vértices interiores”³¹. Se trazan dos curvas y sobre ellas se llevará la longitud de la dovela medida en la planta. Al unir estos puntos con el centro se obtiene el dibujo del patrón de las dovelas de la primera hilada.

La dovela número dos seguirá un patrón similar, es decir, el plano de su cara interna define el punto desde el cual se trazarán los círculos que definen las curvaturas inferior y superior de estas dovelas.

Siguiendo los pasos del proceso anterior, obtendremos el patrón correspondiente a todas las dovelas de la segunda hilada. Lo mismo ocurrirá con las dovelas de la tercera y la cuarta hilada.

Obtenidos los patrones de todas las hiladas, resta acometer la talla de las dovelas. Lógicamente la clave tiene como patrón un círculo que coincide con su perímetro por lo que esta pieza no ofrece dificultades.

Calculados los patrones, se comienza con la talla del dovelaje, pero antes se ha de construir el baibel., que en este caso no es únicamente un baibel, como en el caso de la cúpula semiesférica, aquí serán necesarios cuatro³².

³⁰ PALACIOS, GONZALO J.C. op.cit. supra, nota 23, p.142

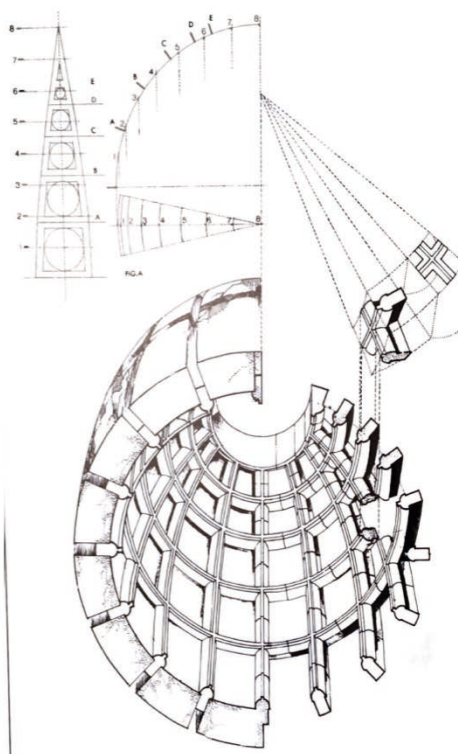
³¹ *Ibidem*, p.143

³² *Ídem*.

2.2.4.2 Capilla redonda por cruceros (Figura 59).

Se trata de una bóveda clásica a la “romana” de las llamadas de casetones. No obstante, para su construcción, se usarán nervaturas medievales que van a configurar una trama de recuadros que posteriormente se tapará con una pieza de piedra.

Para su ejecución ha de procederse, en primer lugar, al diseño formal de la propia bóveda y al consiguiente reparto de su superficie en los casetones que se estimen oportunos. Lo primero a decidir es los que se quiere construir.



A continuación se ejemplificará una capilla redonda por cruceros en la que se ha fraccionado la semiesfera en dieciséis nervios:

Para hallar el trazado de la nervatura horizontal, se tomará un sector de la esfera comprendido entre dos meridianos en el cual se sobre un plano horizontal. Esta operación se efectuará dividiendo una sección en partes iguales y trazando, a través de su proyección sobre el radio, los arcos de círculos que correspondan a estas partes.

A continuación se traza una línea recta que se dividirá, a su vez, en ocho partes de igual magnitud que aquellas con las que dividimos la sección de la esfera. Luego por cada uno de estos ocho puntos, se trazarán líneas perpendiculares a la vertical. Sobre estas líneas se llevará la magnitud, medida en planta, de los correspondientes arcos de circunferencia en los que el sector de círculo se hubo dividido.

Hecho esto y uniendo los puntos obtenidos entre sí, es posible reconstruir en plano la figura extendida de uno de los gajos de la esfera.

Se procede entonces a diseñar los casetones sobre la figura plana resultante (triángulo esférico). Se empezará por rebordear este triángulo por su interior con otra línea paralela a sus lados y separada de ésta una distancia igual a la mitad de la anchura de la moldura elegida para formar las nervaturas.

Hecho esto, y empezando por la parte más ancha, se irán inscribiendo una circunferencia que sea tangente a los tres lados antes obtenidos. Éste círculo determinará, por su parte superior, la posición del nervio horizontal. Se repite el proceso para obtener la posición del resto de nervios y desabatiendo en sección, se dibujarán los casetones³³.

“Este tipo de bóvedas por cruceros se construyen mediante nervios de piedra que, en su entrecruzamiento, forman precisamente los cruceros”³⁴.

³³ *Ibidem*, pp. 144-147

³⁴ *Ibidem*, p. 146

(Figura 61: Cúpula de la iglesia del Salvador, Úbeda (Jaén). Andrés de Vandelvira bajo las trazas de Diego de Siloé).

(Figura 60: Detalle del despiece de los cruceros y plementos).



2.2.4.3 Capilla redonda por cruceros disminuidos.

La lejanía en el tiempo y la pérdida de sensibilidad respecto a las arquitecturas pasadas hacen, a veces, pasar por alto pequeños detalles que en su momento tuvieron importancia. Tal es el caso de esta bóveda, aparentemente similar a la anterior, cuya diferencia reside en que aquella fue diseñada con todos los nervios de igual espesor, mientras que el rigor clásico del “romano” ordena que la nervatura en esta tipología, tanto vertical como horizontal, debe ir disminuyendo de anchura a medida que se aproxima a la cúspide de la cúpula.

Se trata de un problema formal más que constructivo, ya que el modo de obtener los patrones de las sucesivas hiladas de cruceros y sus entrepaños es igual que en la bóveda anterior, salvo en la forma, ya que cada vez más son más estrechas³⁵.

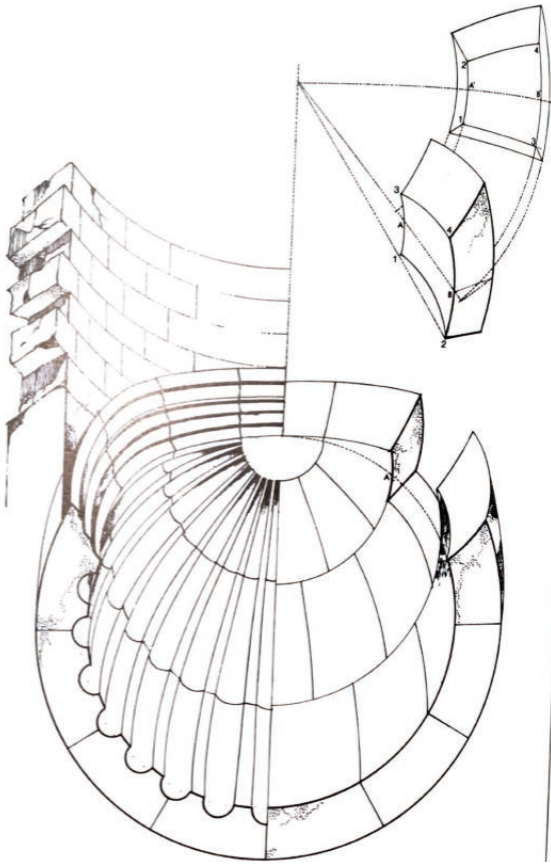
(Figura 63: Cúpula de la Capilla Real de la Catedral de Sevilla).

(Figura 62: Detalle del despiece).



³⁵ *Ibidem*, pp. 148-149

2.2.4.4 Media naranja en capilla redonda avenerada.



una cúpula esférica seccionada por una superficie lítica. Ello plantea, desde un punto de vista geométrico, dos problemas ya conocidos.

El primero se trata de la traza y monte de patrones del arco esférico, y el segundo sería definir los detalles del dovelaje de un arco sobre una pared curva.

El primer problema se resolverá de la misma manera que en la *Capilla redonda de vuelta de horno*, estudiada previamente.

En la *Figura 64* se ha sacado el patrón de una dovela de la segunda hilada que, como puede verse, habrá de adaptarse si se quiere que esta pieza participe del curvo.

Al tallar el arco en torre cavada es necesario hallar correspondientes saltarreglas de sus juntas, y si la intención del arquitecto es extender molduras sobre la testa de este arco, le será imprescindible dibujarse la planta del arco extendida, y sobre ella ir dibujando las molduras que tendrán que ir adaptándose a la deformación que sufre la testa de este arco³⁶.

(Figura 65: Ábside en media naranja avenerado sobre trompas y pechinas, planta y embocadura sobre arco de medio punto en Las Bernardas de Jesús, Salamanca).

(Figura 66: Monasterio de la Santa Espina, Valladolid).



³⁶ *Ibíd.*, pp. 150-151

2.3 La bóveda en rincón de claustro.

2.3.1 Definición, orígenes y evolución histórica.

La Bóveda en rincón de claustro es aquella que representa la intersección de dos bóvedas de cañón seguido iguales, de arco de medio punto de directriz, sobre una planta cuadrada. Si se suprimen las partes superiores de la intersección, se obtiene la bóveda de rincón de claustro, solución que se empleaba en los rincones de los claustros románicos abovedados. Si por el contrario, las partes que se suprimen son las inferiores, la bóveda resultante es la de arista. La primera es cerrada, mientras que la segunda es abierta. Es una bóveda que representa cuatro líneas de arranque y un punto en la clave, y suele apoyarse sobre una planta cuadrada o rectangular (*Figura 67*). Según la forma de su arco directriz, la bóveda puede ser: bóveda de rincón de claustro en arco de medio punto, bóveda de rincón de claustro en arco rebajado o bóveda de rincón de claustro en arco apuntado.

La planta puede ser también un polígono regular. Cuantos más lados tenga este polígono, más se asemejará a una cúpula, pero siempre con aristas entrantes. Así resulta la bóveda triangular o la bóveda sobre planta octogonal³⁷

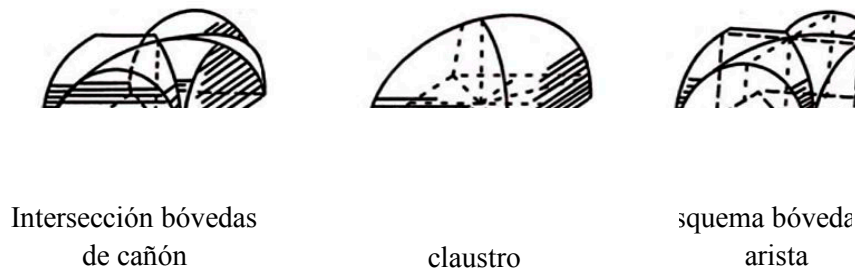


Figura 67



ello son las bóvedas en rincón de claustro en el Colegio de Monforte de Lemos en Madrid (*Figura 68*).

³⁷ RODRÍGUEZ AMIGO, A, op.cit. supra, nota 2. Pp. 34-35.

2.4.3 Trazado y sistema constructivo.

Supondremos la bóveda formada por el encuentro de dos cilindros con directrices iguales de arco de círculo, generando en su intersección arcos de elipse. Igual que en las bóvedas de arista, en el sencillado³⁸ sólo deben cortarse piezas de rasilla en el encuentro y en las claves.

Las rozas se dispondrán en los arranques de cada bóveda cilíndrica de las que constituyen el rincón. En la (Figura 69), podemos ver que, se dejan las rozas en AB BD DE y EA. Se emplean cerchas en las diagonales CB CD CE y CA con la forma elíptica del rincón. Pueden arriostrarse estas cerchas con reglas colocadas según las generatrices, ayudando a la forma del conjunto. También pueden emplearse cerchas con la forma de la directriz o de parte de ella, que servirán además para apoyar porciones de bóveda. Colocando cordeles bien tirantes y mejor con visuales o “entreguarts”, según las generatrices de cada bóveda se obtienen referencias para la colocación de rasillas.

Puede construirse la bóveda en rincón de claustro sin cerchas, siguiendo el mismo proceso constructivo de las bóvedas de arista. Se disponen dos alambres según las diagonales con sus correspondientes plumas deslizantes, marcando en los paramentos las direcciones de las directrices de los cilindros. La intersección de dos generatrices en un mismo plano horizontal, obtenidas por “entreguart” irá dando puntos del rincón.

Los aparejos más cómodos para el trabajo son los que se muestran en la (Figura 70), según la colocación de las rasillas para adaptarse mejor a la curvatura de la bóveda. Estos aparejos dan continuidad de juntas según las generatrices y las arcos directores. También se opera a temple junta³⁹.

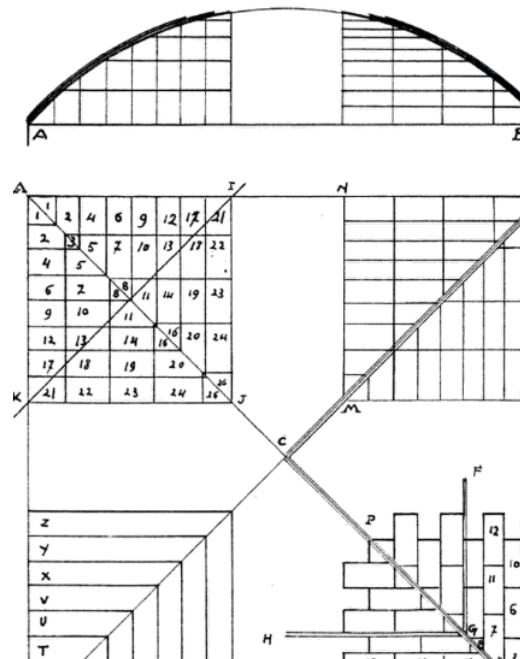


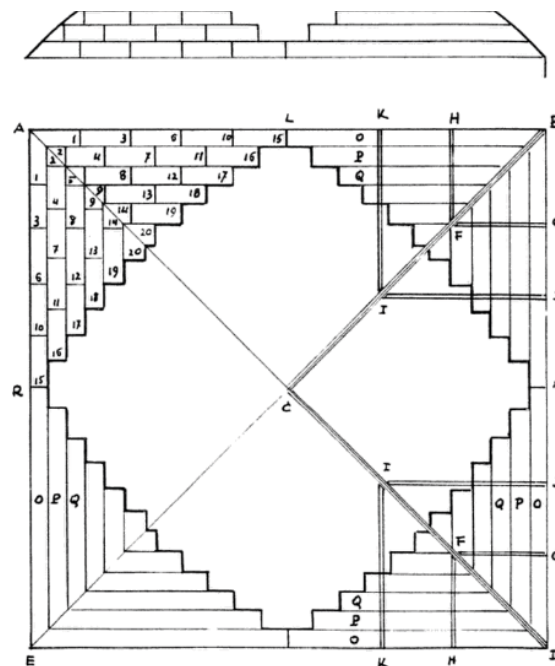
Figura 69

³⁸ Sencillado: Tendido de la primera hoja o hilada de piezas que conforman la bóveda. – Ángel Truño.

³⁹ TRUÑO, A. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Editorial Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.

En la construcción de encuentros de bóvedas de esta clase se tiende también a la construcción por arcos que encuentran su contrarresto en arcos de otras bóvedas. De esta manera la forma se va sosteniendo sola y se puede prescindir de elementos auxiliares de apoyo. Una vez establecidas las rozas y colocadas las cerchas, se empiezan a tender arcos simultáneos a partir de los extremos de las diagonales. El orden de colocación de las rasillas para cada uno de ellos en los aparejos es el que da el orden natural de la numeración, procediendo de este modo hasta cerrar la bóveda.⁴⁰

Así pues para construir la bóveda se pasan arcos, que apoyándose en las rozas de arranque, caigan ligeramente en las cerchas⁴¹.



⁴⁰ HESS, F. Construcción y forma en arquitectura. Versión de la 3ª edición alemana por Antonio Munné Arquitecto. Buenos Aires: Ediciones G. Gili S. A., 1954. Pp. 94-95.

⁴¹ TRUÑÓ, A, op.cit. supra, nota 39.

2.4.4 Comportamiento estructural

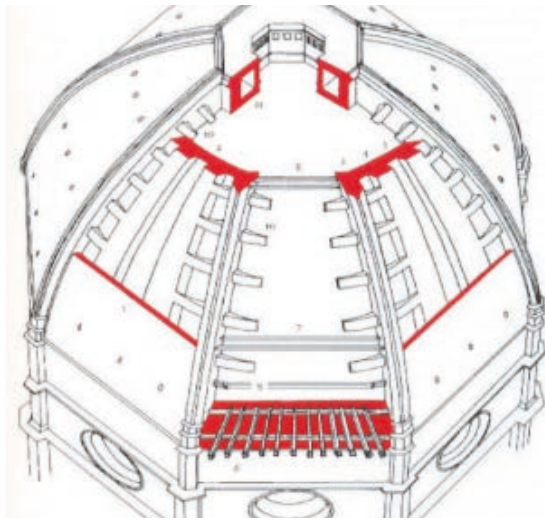


Figura 71

con la altura. La diferencia de radios de curvatura contribuye a que las fuerzas se distribuyan siguiendo una curva llamada “pétalo de flor”, con un punto de máxima tensión en el cual se colocó un anillo de refuerzo con vigas de madera para soportar los esfuerzos requeridos.

Entre ambas capas se encuentra la capa o cámara de aire con los nervios y anillos que forman la estructura de la bóveda. Esto permite aligerar casi un tercio del peso total de la bóveda. La combinación de las tres capas y la forma apuntada permite así mismo, una reducción del 45% respecto a una cúpula semiesférica. Desde el punto de vista mecánico y dinámico las capas actúan como una sola.

Esta bóveda en rincón de claustro está formada por 24 nervios de ladrillos dispuestos en forma de espina de pez. Los ocho que recorren los vértices de la bóveda son los nervios principales, ya que recogen el peso de la estructura. Dos nervios más por cara ayudan a repartir el peso de la bóveda⁴². Este total de 24 nervios parten de un anillo de piedra y ladrillo en la base de la bóveda, el cual recoge sus esfuerzos y los transmite al tambor. Paralelo al anillo de la base, se encuentran once anillos formados por arcos de ladrillo entre nervio y nervio, que distribuyen las fuerzas tangenciales de manera uniforme y transmiten el peso de las estructuras a los nervios.

Los ocho nervios de piedra y mármol que se ven en el exterior son decorativos y no cumplen ninguna función estructural, ya que los nervios que sujetan la bóveda no se ven ni desde fuera ni desde dentro de la misma. Sirven para definir los ocho triángulos que conforman la bóveda rompiendo la definición de una cúpula semiesférica⁴³.

de los ejemplos más conocidos de bóveda en rincón de claustro es la cúpula de Santa María dei Fiore en Florencia (Figura 71), que realmente no es una bóveda, sino una bóveda de rincón de claustro de base octogonal. A pesar de no ser una bóveda española, se obligó el análisis del comportamiento estructural de esta famosa obra como ejemplo.

nuevo, aparece la controversia entre la terminología bóveda y cúpula, debido al trazado de la nervadura.

La cúpula del “Duomo” es apuntada y está rematada por una gran linterna con una estructura realizada con nervios sobre una base octogonal y compuesta de dos niveles de arcos paralelos.

Debido a que la capa interior al tener un radio menor, se hace más gruesa antes, la anchura de la segunda capa aumenta

⁴² HESS, F, op.cit. supra, nota 40.

⁴³ WIKIARQUITECTURA, *Santa Maria dei Fiore*. [Consulta el 27 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/santa-maria-del-fiore/>

2.4 La bóveda de crucería (Figura 72).

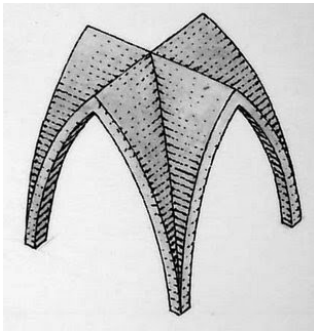


Figura 72

Cubrición formada por la intersección de dos bóvedas de cañón apuntado. Su estructura está formada por arcos o nervios que refuerzan sus aristas y que convergen en la clave. Los espacios intermedios se cubren con plementería apoyada en los nervios. Se trata de un elemento arquitectónico característico de la arquitectura gótica.⁴⁴ La principal diferencia con la bóveda de arista son los arcos generatrices de la bóveda, que en este caso son apuntados, y la existencia de nervios estructurales.

2.4.1 Orígenes y evolución histórica.

Sus orígenes se remiten al desarrollo de la bóveda de arista románica, aunque también se han encontrado cubriciones de arcos apuntados entrecruzados en arquitecturas islámicas. Los primeros antecedentes de este tipo de bóvedas los encontramos en las regiones de Inglaterra y Lombardía. (Figura 73: *San Ambrosio de Milán, Lombardía*). No está muy claro cuál fue la primera bóveda de crucería, pero se tiene constancia de que en la Catedral Durham (1100-1130) (Figura 74), se encuentra una de las primeras que aún no incorpora arcos formeros y los perpiaños son no apuntados (como en el gótico clásico). En Normandía, su uso se generalizó en la primera mitad del siglo XII, es entonces cuando comienza la difusión de este tipo de bóvedas.⁴⁵



Figura 74



Figura 73

⁴⁴ MORALES Y MARÍN, op.cit. supra, nota 15.

⁴⁵ ALEGRE CARVAJAL, E., MARTÍNEZ PINO, J., MONTEIRA ARIAS, I., PERLA DE LAS PARRAS, A. y VIDAL ÁLVAREZ, S. *El Arte en la Baja Edad Media occidental: arquitectura, escultura y pintura*. Madrid: Editorial Ramón Areces, 2014.

En España las primeras bóvedas de crucería se encuentran en el entorno del Camino de Santiago, en las abadías y monasterios Cistercienses. (*Figura 76: Bóveda de crucería simple, monasterio de Veruela, Vera de Moncayo, Zaragoza; Figura 75: Galería del Claustro del monasterio de Poblet, Tarragona*).



Figura 76

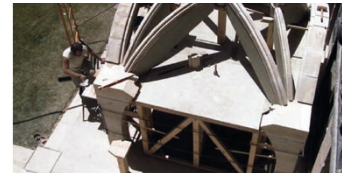


Figura 75

2.4.2 Sistema constructivo.

Según Rodrigo Gil de Hontañón -arquitecto clave del Renacimiento español- el modo de proceder con la construcción de una bóveda de crucería sería el siguiente⁴⁶ (Figura 77):

- Se establece una plataforma horizontal de tablonos
- Sobre ella se traza la proyección horizontal de la nervadura
- Donde ha de ir la clave se sitúa un pie derecho con la altura adecuada, sobre el que se coloca la pieza, que se apoya en una zapata.
- Colocación de cimbras entre los pies derechos para sujetar las cimbras de los nervios.
- Relleno de los huecos con plementería.



Las bóvedas apoyadas sobre arcos y compuestas por plementería pueden ser completamente independientes entre sí. Los arcos deben ser cruzados, para que todos apoyen sobre los muros de la caja de la bóveda, así cada arco tiene su apoyo independientemente de los demás y se puede construir cuando convenga sin la necesidad de cimbras auxiliares exigida por la construcción de arcos apoyados unos sobre otros.

Cuando se apoyan unos arcos sobre otros, se necesita una cimbra que puede ser muy ligera, pues sobre ella apoya la primera vuelta de rasilla con yeso, y si el arco es muy grande, se apoya otra con otra más de rasilla o de ladrillo hueco con cemento, las cuales refuerzan la cimbra y permiten el apoyo de las siguientes vueltas, que conviene que sean de ladrillo macizo.⁴⁷

⁴⁶ RABASA, E. "Principios y construcción de las bóvedas de crucería" en *Revista Loggia Arquitectura y restauración*. Nº 20. Valencia: UPV, 2007, pp. 86-97.

⁴⁷ MOYA BLANCO, L. op.cit. supra, nota 13. Pp. 25-27.

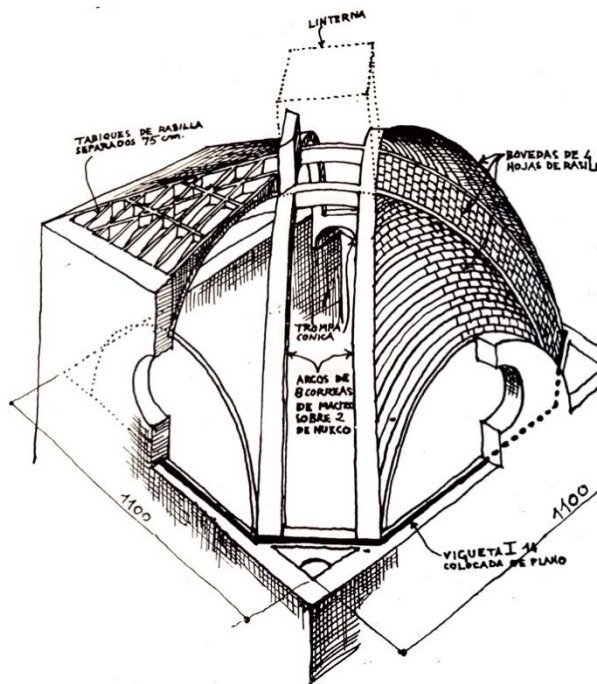


Figura 78

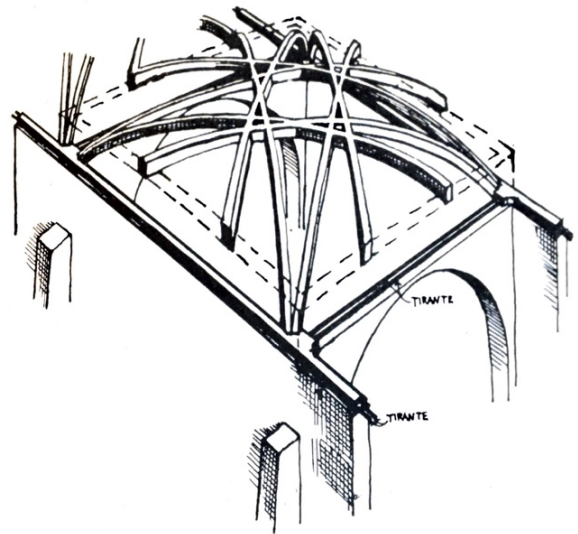


Figura 79

Si las luces o las cargas que ha de soportar el arco en su sección más forzada son importantes, hay que elegir entre varias soluciones; ampliar la altura de la sección, ampliar el ancho, o prescindir de rasillas y ladrillos huecos. Con las dos primeras soluciones se pueden conseguir arcos de hasta 12 metros de luz.

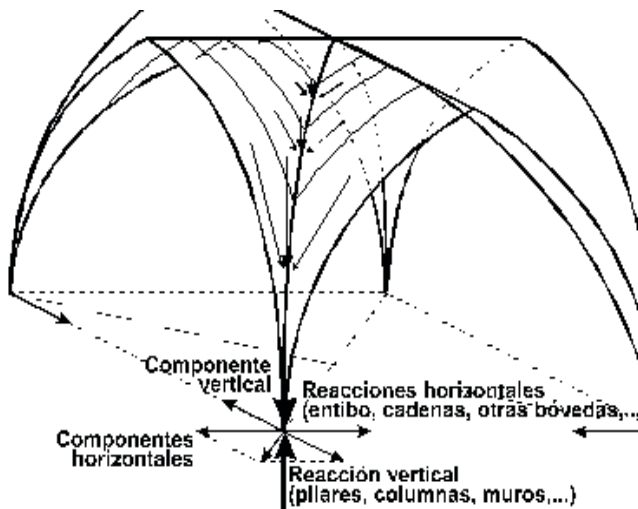
En el caso de arcos con arranques a distintas alturas se debe prestar atención al zuncho perimetral de contrarresto. Puede tratarse de un único zuncho colocado en un plano inclinado o de varios zunchos dispuestos en planos horizontales, ligados entre ellos mediante elementos verticales de hierro o de hormigón armado, de modo que el conjunto de los zunchos forje una jaula rígida que trabaje de modo solidario.

Este sistema tiene la ventaja de la ayuda que mutuamente se prestan los arcos en términos de empujes, por ello la calidad de los materiales influye.⁴⁸

(Figura 78: Iglesia de Manzanares. Cúpula de arcos cruzados de 13,30 metros de luz cuadrada, con linterna; Figura 79: Nave compuesta de tramos cubiertos con bóveda de arcos cruzados, con zuncho para absorción de empujes en cada tramo y, apoyados sobre arcos fajones contrarrestados por contrafuertes).

⁴⁸ *Ibidem*, p.29

2.4.3 Comportamiento estructural.



Las bóvedas de Crujería, en contraposición a las bóvedas de cañón Románicas trabajan a tracción. Viollet-Le Duc sustenta que existe un equilibrio de fuerzas que sustituye a la estabilidad inerte propia del Románico. En este caso las fuerzas se transmiten desde las nervaduras de la propia bóveda a los puntos específicos (pechinas), que son reforzados mediante arbotantes o arcos torales. Los arcos fajones del Románico son sustituidos en este caso por arcos torales y arcos formeros laterales. Se podría entonces concluir que una bóveda de crucería es un entramado tridimensional de arcos, nervios y soportes.

(Figura 80: Distribución de esfuerzos en una bóveda de crucería. Componentes verticales y horizontales debidas al peso de dos de las bovedillas. Reacciones correspondientes que garantizan la estabilidad de la bóveda.)

Esta bóveda, resultante de la intersección de dos bóvedas de cañón apuntadas, está formada por cuatro bovedillas, cada una de las cuales puede concebirse como una sucesión de arcos continuos que descargan en las limatesas (nervios). Si la bóveda es de planta cuadrada, las componentes horizontales generadas por cada bovedilla son idénticas, mientras que si la planta es rectangular existirán mayores componentes horizontales resultantes del peso de las bovedillas mayores.⁴⁹

En las bóvedas de crucería cada arco simple sostiene una parte de la plementería.⁵⁰

El análisis del comportamiento estructural de estas bóvedas góticas indica que la elección del material es un factor relevante y no solo un elemento de relleno de la superficie entre los nervios. Se deben elegir materiales ligeros para la cubrición, ya que así los empujes serán verticales y se disminuirán los empujes horizontales, aminorando de este modo el trabajo de los contrafuertes y arbotantes.

Las reposiciones de cal eran también un problema importante, ya que constituían un problema estructural.⁵¹

⁴⁹ GARCÍA CASCO, A. op.cit. supra, nota 14.

⁵⁰ TARRAGÓ, S. *Miscel·lània*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: Iniciativa digital Politècnica, 2013.

⁵¹ HUERTA, S. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.

2.4.4 Variaciones dentro de la tipología de la bóveda de crucería.

2.4.4.1 Bóveda sexpartita.

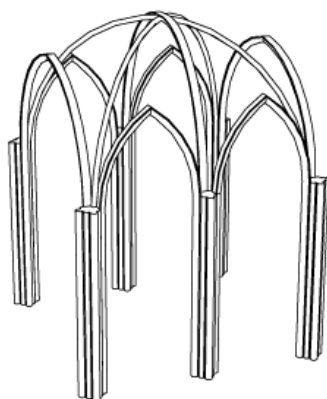


Figura 81

Se trata de una bóveda de crucería cuyos nervios dividen la superficie de cubrición en 6 paños (Figura 81). Presenta problemas de apoyo para el nervio central que obliga a la disposición de una ménsula para el apoyo, o una doble disposición de soportes. Se inscribe en un cuadrado y cumple la función en las catedrales góticas de cubrir el espacio que une la nave central con el transepto.

Surgen y caracterizan a la arquitectura del alto Gótico de las catedrales del siglo XII en Francia, más adelante fueron imitadas en Inglaterra y otros países europeos. Su apogeo predomina en el periodo clásico, en el que encontramos más ejemplos, y durante la mitad de este periodo se da un mayor dominio técnico de esta tipología, ya que se le añaden una serie de arcos denominados terceletes que permiten mayores luces y constituyen un refuerzo a mayores para la bóveda.⁵² (Figura 82: Bóveda sexpartita en la Catedral de Cuenca).



Figura 83



Figura 82

⁵² ALEGRE CARVAJAL, E., MARTÍNEZ PINO, J., MONTEIRA ARIAS, I., PERLA DE LAS PARRAS, A. y VIDAL ÁLVAREZ, S, op.cit. supra, nota 45.

Como en todas las etapas de transición, el paso del Románico al Gótico va a tener en España tiempos en los que no exista un claro estilo definido, en los que se van a experimentar distintas soluciones arquitectónicas hasta que se adopten definitivamente las principales características procedentes del estilo que llega desde Francia a comienzos del siglo XIII.

Existe entonces un grupo de iglesias y catedrales que presentan la característica común del uso de la bóveda sexpartita, todas ellas influidas por la Escuela del norte de Francia, donde se impusieron los modelos normandos, no solo en las iglesias sino también en monasterios como Las Huelgas en Burgos (*Figura 84*) o Santa María de Huerta en Soria (*Figura 83*).



Figura 84

Todas coinciden en el uso de este tipo de cubrición que permitía elevar más el techo para conseguir una mayor entrada de la luz, lo que significaba un acercamiento más próximo a la divinidad, que se identificaba con la luz en este periodo.

La *Catedral de Cuenca* es el único edificio español que conserva íntegramente este tipo de bóvedas, fechada en el siglo XII.

Esto confirma que este tipo de bóvedas se encuentran en la etapa de transición, ya que las primeras catedrales propiamente góticas, concretamente la de Burgos, no comienza sus obras hasta el siglo XIII.

2.4.4.2 *Bóveda estrellada (Figura 85).*

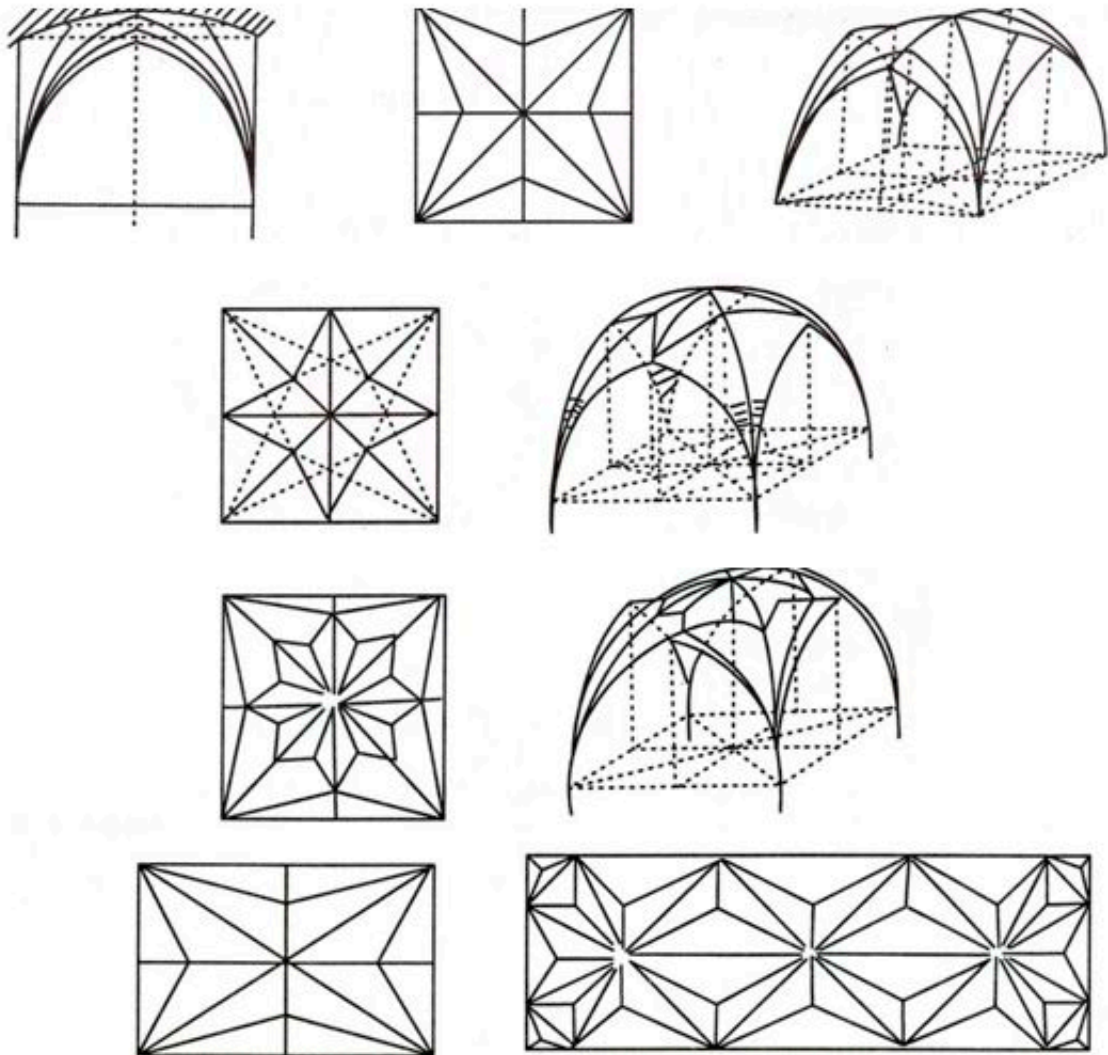


Figura 85

Es la evolución de la bóveda sexpartita durante el gótico tardío. En este caso a la cubrición se le añaden más terceletes, lo que permite la cubrición de espacios de luces mayores. (En las iniciales solo se añadían 4).

De este modo, la bóveda de crucería simple consta de 4 nervios, el siguiente paso sería la incorporación de un espinazo central que una las claves de estos 4 nervios generando 6 paños (bóveda sexpartita), y posteriormente la incorporación de terceletes (nervios transversales de descarga que dividen a la mitad los anteriores paños), generando una geometría estrellada.

Los ejemplos más característicos de este tipo de bóvedas en España son la *Catedral de Burgos (Figura 86)*, la *Catedral de Salamanca (Figura 87)*, la *Catedral de Sevilla (Figura 89)* o la *Catedral de Toledo (Figura 88)*.



Figura 86



Figura 87



Figura 88



Figura 89

2.5 La bóveda vaída.



Figura 90

La bóveda vaída (*Figura 90*), es la bóveda resultante al seccionar un hemisferio o casquete con cuatro planos verticales cuyas trazas en planta corresponden al cuadrado circunscrito en la base de dicho hemisferio. En la bibliografía anglosajona se denomina “*sail vault*” o “*sail dome*” (“bóveda de vela” o “cúpula de vela”), ya que se asemeja a la forma de una vela de barco cuadrada inflada por el viento.

Se suele sujetar a las paredes colindantes mediante pechinas. Debido a su planta, frecuentemente se utiliza para cubrir espacios cuadrados. Se caracteriza por definir arcos de medio punto en su encuentro con los planos verticales que la contienen⁵³.

(*Figura 91: Bóveda vaída en la Catedral de Granada.*)



Figura 91

2.5.1 Orígenes y evolución histórica.

En el Renacimiento arquitectónico se desarrolla una tendencia donde lo espacial prevalece sobre lo decorativo. En esta época se construyen obras importantes como la Catedral de Jaén (1540) donde se ensayan las cúpulas vaídas⁵⁴.

Su concatenación lineal formando galerías o naves fue introducida por Filippo Brunelleschi. En España fue usada primeramente por Andrés de Vandelvira, y posteriormente se empleó en edificios de época barroca⁵⁵.

(*Figura 92: Bóveda en Sacra Capilla del Salvador, Úbeda*)

(*Figura 93: Bóveda vaída en Iglesia de Santiago Apóstol, Orihuela.*)



Figura 92

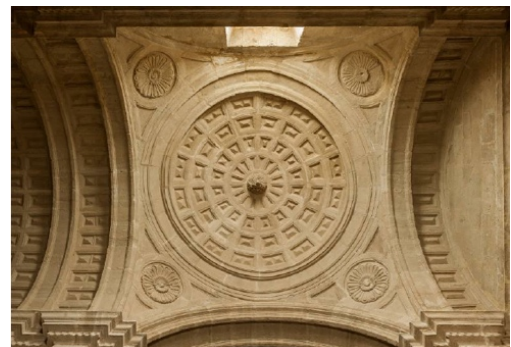


Figura 93

⁵³ GIEDION, S. *Espacio, tiempo y arquitectura*. Barcelona: Editorial Reverté, 2009, p. 74.

⁵⁴ RODRÍGUEZ AMIGO, A, op.cit supra, nota 2.

⁵⁵ GIEDION, S, op.cit supra, nota 53.

2.5.2 Sistema constructivo.

En primer lugar, para la construcción de una bóveda o cúpula vaída es necesario calcular el área de la semiesfera general de la bóveda y el cálculo de su casquete esférico. Se procede diseñando y construyendo una formaleta o cimbra como guía para la construcción de la misma (*Figura 94*). Posteriormente se disponen los pilares que transmitirán las cargas y sobre los cuales se va a apoyar la bóveda (*Figura 95*). Una vez construidos dichos pilares, se procede a la colocación de las pechinas, previamente medidas y cortadas (*Figura 96*).

A continuación se procede con el armado de las dovelas en el ángulo de cruce de los dos arcos de medio punto que conforman la bóveda. Por último se procede a la colocación de la pieza principal, es decir, la clave (*Figura 97*)⁵⁶.

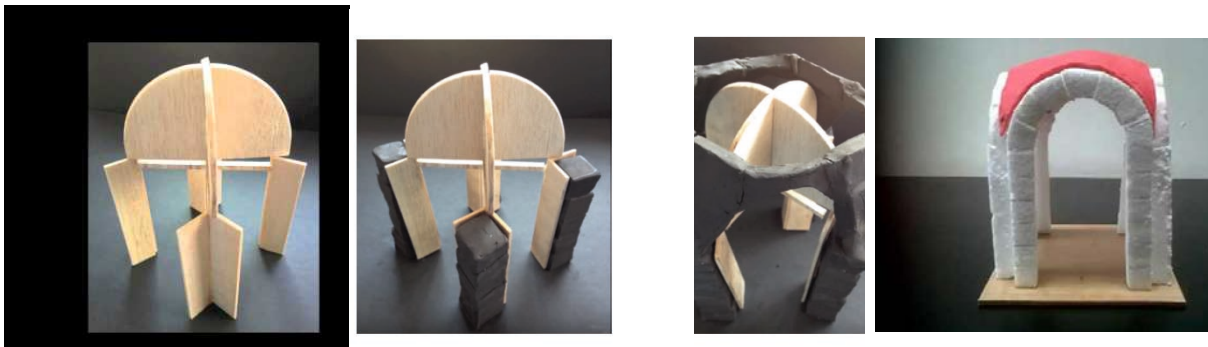


Figura 94

2.5.3 Comportamiento estructural.

Aparte del empleo de bóvedas vaídas en monumentos e iglesias reconocidas, en España se han utilizado con mucha frecuencia para la construcción de forjados, por ello resulta interesante analizar su comportamiento estructural a grosso modo en este caso concreto. Posteriormente las bóvedas vaídas evolucionarán en otras tipologías de bóveda distintas dependiendo de la región en la que se hayan desarrollado.

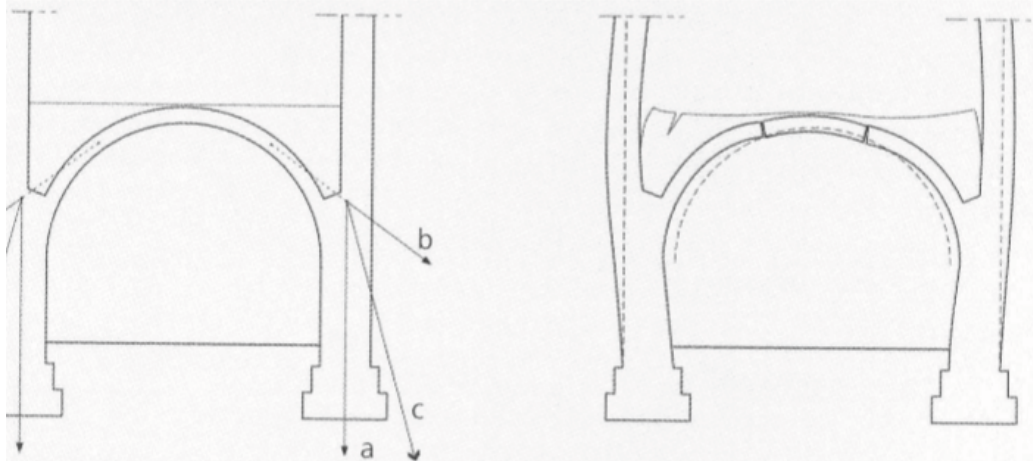
Generalmente, los forjados, dado que se apoyan en los muros, se ven directamente afectados por los asentamientos y otras deformaciones del conjunto formado por los cimientos y las paredes.

Los riesgos se amplifican debido a la humedad de los suelos y si el forjado está más o menos contaminado por la humedad de la pared a nivel de los apoyos, cuya podredumbre puede provocar la ruptura.

El peso de los forjados depende de sus dimensiones, de su peso propio variable según los sistemas constructivos, y de las sobrecargas de uso. El peso se transmite al muro mediante los apoyos, donde las cargas son verticales, mientras que las estructuras primarias, arcos y bóvedas, no se deforman.

⁵⁶ YOUTUBE, “BOVEDA VAIDA” en Youtube. [Consulta el 20 de agosto de 2018]. Disponible en https://www.youtube.com/watch?v=l_tuFUVjZXM

Con respecto al peso propio de un forjado sobre una bóveda, de hasta unas 2 t/m², las sobrecargas de uso distribuidas son despreciables (el 10% del peso propio). Los apoyos continuos sobre las paredes laterales del forjado benefician el reparto de cargas, sin embargo pueden producirse daños en ciertas condiciones:



(Figura 98
provocada:

iones

Las modificaciones a posteriori pueden producir sobrecargas concentradas, como las transmitidas por el apoyo de una planta añadida. Esta sobrecarga puede perforar el abovedado y producir un daño evolutivo. Los morteros de bloqueo pueden retrasar la aparición de los daños.

También el forjado sobre bóveda puede verse deformado por asientos verticales en sus paredes portantes.

Las obras en ambientes húmedos son las más conflictivas para este tipo de estructuras, ya que la humedad disminuye la resistencia de los morteros y que, cuando está cerca de la tasa de saturación, aumenta el peso propio del conjunto del 15 al 20%, aportando más del doble a la sobrecarga normal de uso.

Cuando las bóvedas cubren espacios de la planta baja y ejercen un empuje en las paredes sobre rasante, y no se disponen tirantes metálicos transversales ni contrafuertes para contener el empuje transmitido a las paredes de carga, estos empujes pueden provocar su inclinación (la colocación óptima y la fijación de cadenas es un método de reparación eficaz)⁵⁷.

⁵⁷ RODRÍGUEZ AMIGO, A, op.cit supra, nota 2. Pp. 64-65.

2.6 La bóveda catalana (Figura 99).

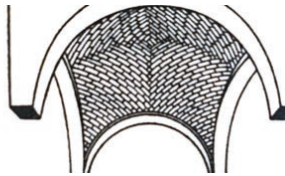


Figura 99

Técnica basada en la construcción de bóvedas rebajadas a partir de piezas cerámicas planas. Estas se unen “de plano” (por sus cantos) con yeso para formar la primera capa, que fragua con rapidez y no necesita cimbraje. Una vez terminada la primera capa, se realizan las sucesivas por adhesión de mortero de fraguado rápido (cal o cemento) con los arcos previos o muros de borde⁵⁸.

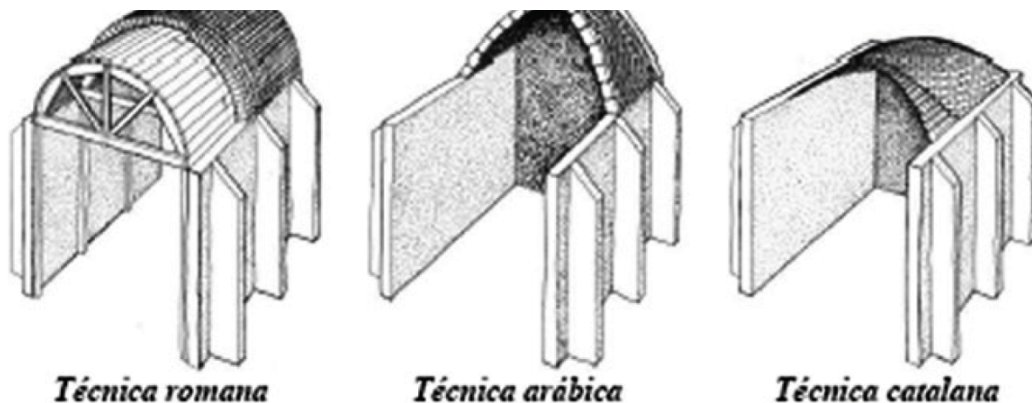
Suelen ser de espesores pequeños (10cm que son 2 hojas + capa de mortero + recubrimiento), o de una hoja (5 cm).

sbeltas, de notable rapidez de ejecución y con un buen comportamiento ante los incendios.

2.6.1 Orígenes y evolución histórica.

Actualmente existe un debate abierto respecto a su perspectiva histórica; el debate sobre los orígenes y antecedentes de las bóvedas tabicadas.

Hasta hace unos años, la corriente que prevalecía era aquella que apostaba por los antecedentes romanos de este tipo de cubriciones, que llegaron a España desde Italia durante la época renacentista. Sin embargo, los investigadores actuales defienden el origen árabe de estas construcciones y su desarrollo en España durante los 8 siglos de etapa musulmana, ya que cada vez se encuentran ejemplos más tempranos del siglo XIV en la zona de Valencia⁵⁹.



⁵⁸ BUENAVENTURA BASSEGODA. IN. *La Bóveda Catalana* (Discurso leído). Barcelona: Escuela Superior de Arquitectura y Real Academia de Ciencias y Artes, 1946.

⁵⁹ REDONDO MARTÍNEZ, E. *La Bóveda tabicada en España en el Siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo*. Tesis Doctoral dirigida por el Doctor Arquitecto Santiago Huerta. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2013. [Consultado el 12 de agosto de 2018]. Disponible en: <http://oa.upm.es/22064/>

(Figura 100: Orígenes: Tres métodos de construcción de bóvedas de ladrillo : a) las bóvedas del norte de Europa con cimbra de madera, b) las bóvedas de ladrillos inclinados (África y México), consiguen eliminar la cimbra, c) las bóvedas tabicadas del Mediterráneo construidas sin cimbra).

No existe ningún dato que nos indique que las primeras bóvedas tabicadas se construyeran en España, pero sí que es el país en el que alcanzaron el mayor grado de desarrollo desde su aparición en el siglo XIV hasta bien entrado el siglo XX.

Se puede asegurar que en España aparecen las primeras en la zona de Levante en el siglo XIV, y debido a sus ventajas se extiende con rapidez hacia el centro y el sur de la península. Durante el siglo XVI su uso es frecuente principalmente en bóvedas y cúpulas de iglesias. En Castilla utilizaron bóvedas de una hoja con armadura de madera por encima, mientras que en Valencia fueron más utilizadas de 2 hojas, con la exterior funcionando como base del tejado.

En el siglo XIX se produce el desarrollo importante de esta tipología debido a la aparición de nuevos materiales, nuevos tipos constructivos (para su variedad de formas y tamaños) y nuevas teorías estructurales que permiti



(Figura 101: Bóvedas tabicadas en la capilla de los Jofre, en el convento Santo Domingo, Valencia. Primeros ejemplos documentados de la existencia de este tipo de bóvedas en España).

⁶⁰ Ídem.

2.6.2 Sistema constructivo.

Son obras de fábrica, realizadas con ladrillo y aglomerante (generalmente yeso, cal o mortero). Se suelen utilizar ladrillos finos, casi siempre rasillas colocadas de plano configurando una o varias hojas unidas entre sí ejecutadas sin cimbra. Mientras se cierran, la adhesión de los ladrillos se consigue gracias al mortero de fraguado rápido, con los anillos previos ya terminados o gracias a los muros de borde⁶¹.

Sintetizando, las ventajas más destacables del empleo de este sistema constructivo se exponen a continuación:

- **BAJO COSTE** de ejecución, ya que no necesita cimbra ni mucho material, que puede ser propio del entorno en el que se esté construyendo.
- **VERSATILIDAD**. La técnica puede emplearse para construcciones de grandes o pequeñas luces.
- **COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL**. Se pueden salvar grandes luces con poco material.
- **SOSTENIBILIDAD**. Se trata de una técnica sostenible ya que la fabricación de ladrillos no implica la contaminación del medio ambiente.
- **RESISTENCIA AL FUEGO** de los materiales empleados, que además no son propensos a los ataques de insectos o a la descomposición.

La puesta en obra (ejecución) se realiza de la siguiente manera⁶² (Figura 102):



⁶¹ MOYA BLANCO, L, op.cit. supra, nota 13.

⁶² HUERTA, S, op.cit. supra, nota 51.

2.6.3 Comportamiento estructural.

En el siglo XVI, los arquitectos e ingenieros comienzan a necesitar una justificación teórica para tomar sus decisiones a la hora de construir. Es entonces cuando se desarrolla la teoría científica de las estructuras, basada en las leyes de la mecánica. Estas nuevas teorías coexisten con las reglas de proporción geométrica durante 2 siglos, y no empiezan a aplicarse de modo práctico a las bóvedas (incluidas las catalanas), hasta finales del Siglo XIX⁶³.

La aparición del cemento en el siglo XIX y su supuesta resistencia a tracción marcó la división actual entre los científicos y autores que defienden la teoría del análisis límite para este tipo de estructuras, y los que defienden el enfoque elástico-resistente⁶⁴.

La teoría de análisis límite, defendida por autores como Jacques Heyman, establece que existe un equilibrio perfecto en compresión, por lo que la estructura de fábrica es estable si encontramos una línea de empujes en el espesor de la bóveda.

Se trata de los métodos de estática gráfica que utilizaba Gaudí, basados en las leyes de Hooke, Mery, etc. En ellos se desprecia la resistencia a tracción del conjunto de la fábrica, y se establecen líneas de empuje y mecanismos de colapso que permiten descomponer el polígono de fuerzas que actúa sobre la membrana.



Figura 103

(Figura 103: Maqueta de polígono funicular empleado para el cálculo y diseño de la Sagrada Familia, Barcelona).

⁶³ Ídem.

⁶⁴ REDONDO MARTÍNEZ, E, op.cit. supra, nota 59.

El enfoque elástico-resistente, teoría más compleja que profundiza en los datos del material y en sus condiciones de apoyo, defiende que debido su bajo peso propio y a su espesor, existen tracciones en el conjunto.

Para determinar el comportamiento estructural de las bóvedas catalanas también se han realizado numerosas pruebas de carga a lo largo de la historia, las cuales se siguen utilizando hoy en día para determinar empíricamente cómo se comporta una estructura.

Cabe destacar a Rafael Guastavino (1842-1908), ya que fue un importante ingeniero que estudió las diferentes teorías que explicaban el comportamiento estructural de este tipo de bóvedas (teoría monolítica, líneas de empuje, teoría de la membrana, análisis elástico... entre otros)⁶⁵. Principalmente defendía la relación intrínseca entre geometría y estabilidad, en vez de la dependencia del material del que puedan estar construidas. De este modo las variables serían las cargas, el volumen y la geometría de las mismas, y los límites serían el equilibrio y la estabilidad⁶⁶.



(Figura 104: Convent dels Angels, Barcelona, S.XV, bóvedas catalanas de Rafael Guastavino).

⁶⁵ CHOISY, A, op.cit. supra, nota 24.

⁶⁶ HUERTA, S, op.cit. supra, nota 51.

2.7 La bóveda extremeña.

La bóveda extremeña es una cubrición de geometría compuesta formada por la intersección de 2 semitoroides, en la que la clave central se encuentra en un punto más alto que las claves de los arcos laterales. Esta diferencia de cota se denomina “**retumbo**”. Se ejecuta sin cimbra, aunque en ocasiones es necesaria para la realización de los arcos laterales.

Se trata de una evolución de la bóveda de arista simple romana, motivada por la escasez de medios para la construcción (escaseaba la madera y por ello decidieron construir sin cimbra)⁶⁷.

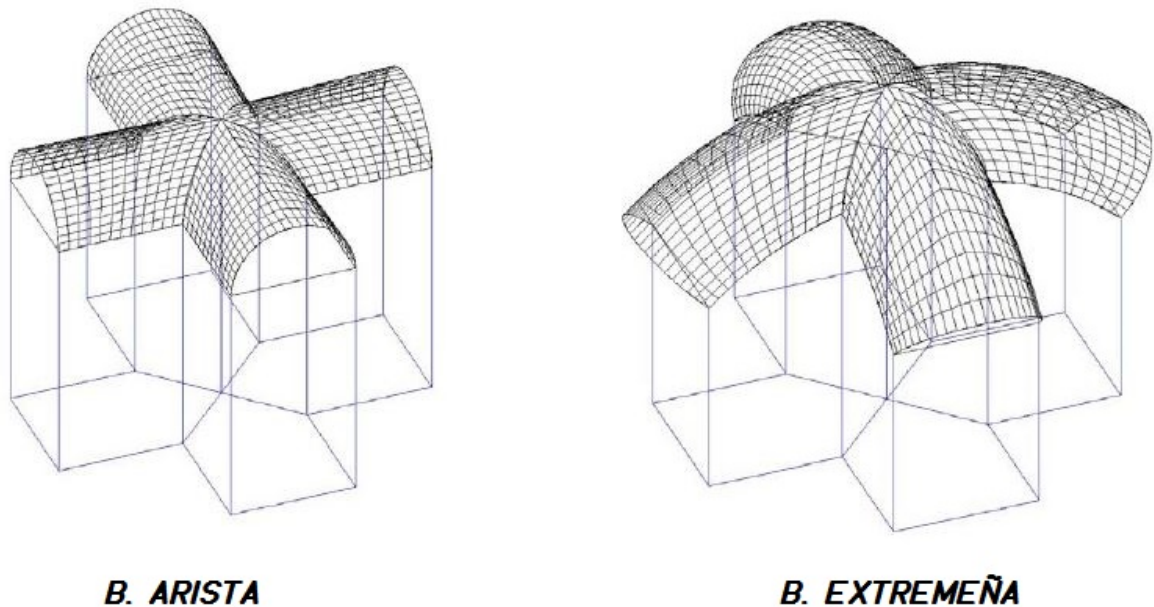


Figura 105

(Figura 105: Esquemas geométricos en los que se aprecia la diferencia entre la bóveda de arista y la extremeña).

2.7.1 Orígenes y evolución histórica.

Las bóvedas extremeñas se construían sin cimbra, tradición que se transmitió desde el Mediterráneo hacia España. La construcción sin cimbra tabicada es característica de Extremadura y de Cataluña, la de rosca sin cimbra es típicamente extremeña, pero es un hecho que también se construyó gran número de estas bóvedas en el resto de España.

⁶⁷ FORTEA LUNA, M y LÓPEZ BERNAL, V. *Bóvedas Extremeñas: proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Badajoz: Edición COADE. Delegación de Badajoz, 1998.



Figura 106

(Figura 106: Esquema cronológico del desarrollo de la bóveda extremeña).

Los extremeños son mayoritariamente descendientes de los repobladores tras la Reconquista, a los que se le sumaron aquellos colectivos que se negaron a abandonarlas como moriscos y judíos.

Sus orígenes coinciden con los de las bóvedas tabicadas previamente explicadas en el apartado anterior, la diferencia es, como su propio nombre indica, que este tipo de cubriciones se desarrollaron principalmente en la región de Extremadura, donde tuvo lugar este tipo de sistema debido a los recursos disponibles de la región (principalmente la piedra y el ladrillo).

Hoy en día en Extremadura las técnicas de construcción de bóvedas tradicionales están en peligro de extinción debido a los nuevos métodos constructivos que se impusieron de forma aplastante a las técnicas tradicionales, en este caso la sustitución de la bóveda por el forjado⁶⁸.

2.7.2 Sistema constructivo

2.7.2.1 Bóveda de arista con retumbo tabicada⁶⁹

Se ejecutan en primer lugar los cuatro muros laterales, de espesor variable, según sean intermedios o extremos, y el número de plantas. Su composición interior más común es el tapial, hecho de tierra, excepto las partes bajas, compuestas por piedras y barro, y los recercados de los huecos, hechos con fábrica de ladrillo (por la dificultad que tiene el tapial de perfilar las jambas y la imposibilidad de fabricar con ella un dintel).

Estos muros se apoyan en unos cimientos, normalmente de doble grosor que el muro.

La bóveda se ejecutará posteriormente sin cimbra por lo que es preciso que los muros vayan soportando los empujes que aquella le vaya transmitiendo. Por ello, los muros se realizan en toda su altura desde el principio, y no por plantas como se realiza actualmente. Los muros suelen ser de piedra en el arranque y, dependiendo de los recursos económicos y de la calidad de la construcción, la piedra puede llegar hasta la bóveda.

⁶⁸ RODRÍGUEZ AMIGO, A, op.cit supra, nota 2. Pp. 43-44.

⁶⁹ *Ibidem*. Pp. 48-51.

Una vez levantados los muros, se determinan los arranques y el **punto** de la bóveda (diferencia de altura entre los arranques y las claves de los arcos laterales). Así, se trazarán 4 elipses que determinarán los lados de la bóveda. Estas elipses o arcos rebajados, soportan mejor las cargas en los extremos. (Se utilizan los arcos rebajados cuando la bóveda se cubre un piso superior, para no elevar en exceso la cubierta).

El punto más el retumbo, no deben superar la altura de 1,50m, para que el andamiaje se encuentre en un plano accesible para los operarios

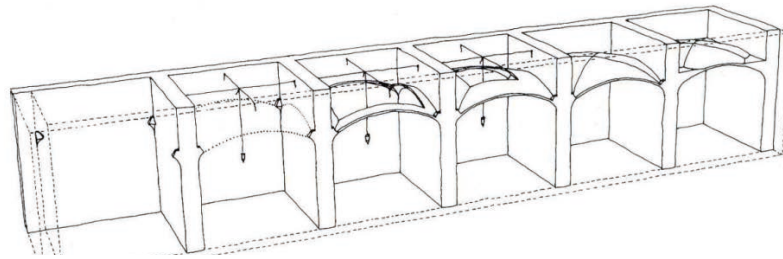


Figura 107

(Figura 107: Dibujo sencillo del método constructivo de la bóveda de arista con retumbo tabicada).

En las esquinas se realizan 4 agujeros donde se situarán las pechinas, realizadas con ladrillo y mortero de cal.

Posteriormente, en la elipse trazada en el muro se practica una roza. Empotrado ligeramente en ella y apoyado en la pechina se ejecuta un arco de una hilada de ladrillo a panderete tomado con yeso. El proceso continuaría del mismo modo que se ha explicado previamente en el apartado 2.6.2.

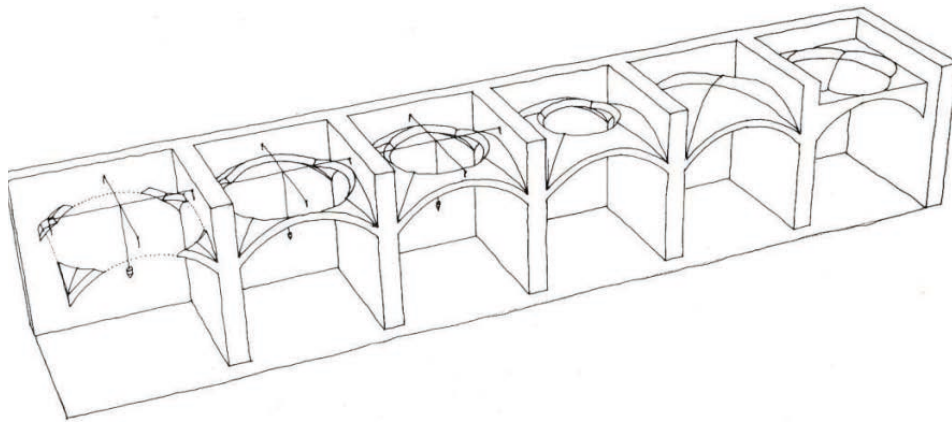


Figura 108

2.7.2.2 *Bóveda de arista con retumbo de rosca.*

El proceso de la bóveda de rosca es sustancialmente similar al de la bóveda tabicada, con las lógicas diferencias debidas al proceso de aparejo y a su propio peso. Las hiladas no son paralelas a los muros, sino circulares, comenzando por las aristas hasta llegar a los muros, con un proceso similar al seguido en una cúpula. Al mismo tiempo las hiladas van inclinadas respecto a la horizontal un ángulo aproximado de 40°, de forma que el rozamiento con la hilada anterior la mantenga estable sin necesidad de ningún apoyo, ni un mortero de fraguado rápido como el yeso.

Los ladrillos se toman con mortero de cal, de las mismas características que el utilizado para las pechinas, y dependiendo de la calidad de aquella y su adherencia en fresco, se puede modificar el ángulo de inclinación de la hilada.



(Figura 109: Dibujo sencillo del método constructivo de la bóveda de arista con retumbo de rosca).

Las bóvedas tabicadas que van a soportar cargas importantes se doblan. Esto consiste en colocar por el trasdós y sobre las aristas de la bóveda una hilada de ladrillos también a panderete de 1 pie de ancho. Así se aumenta la sección de las aristas, constituyendo de este modo unos nervios ocultos. Por lo tanto, existirían 2 soluciones para esta tipología: Bóvedas de una sola hoja y bóvedas con nervios ocultos.

Una vez cerrada la bóveda se hombrea para que adquiriera resistencia, es decir, se rellenan los senos hasta aproximadamente la mitad de la altura con material pesado (normalmente tierra y piedra).

En este punto la bóveda ofrece por la parte superior una superficie plana excepto la parte central que sobresale un abultamiento casi esférico. Para conseguir una superficie útil es preciso rellenar hasta la cota de la clave central. Este relleno se hace con material aligerante para no cargar en exceso la bóveda (carbonilla o anteriormente deshechos de vasijas y tierra).

(Figura 110: Fotografías de algunos ejemplos de esta tipología construidos en la actualidad).



Bóveda por arista de rosca encalada en planta rectangular perteneciente a habitación de Vivienda Tradicional en Montijo (Badajoz)



Bóveda por arista de rosca sin encalar en planta cuadrada perteneciente a La Casa del Navegante (BIC) en Montijo (Badajoz)

El intradós de la bóveda es irregular, por ello se revestían con mortero de cal y en ocasiones se decoraban. Con el revestimiento se corrigen las deficiencias de la ejecución y se remarcan las aristas aunque en la fábrica no se aprecie.

A veces se recurre al tirante superior oculto en el relleno. Suelen ser barras de hierro de sección cuadrada en la parte exterior del muro. Con la mecanización, el extremo de la barra se convierte en una rosca y la cruceta en una pletina agujereada con una tuerca exterior, con lo que se puede tensar el tirante.

Cuando el espacio a cubrir es excesivamente largo se recurre a la doble, triple, cuádruple... bóveda.

En la unión de las dos bóvedas (dónde no existe muro) se fabrica un arco de ladrillos sobre cimbra. Entonces se ejecutan las dos bóvedas simultáneamente (para no producir empujes perpendiculares al arco), y una vez hombreadas se puede retirar la cimbra. Es muy frecuente encontrar un tirante oculto sobre este arco, pues si los empujes perpendiculares a él (de las dos bóvedas contiguas) se contrarrestan, los que se van en su misma dirección se suman. Los espacios a cubrir no siempre son regulares. Descuadres provocados por las lindes divisorias u otras circunstancias definen formas y figuras peculiares. Con el recurso de la cola se pueden reducir a rectángulos regulares casi todas ellas. Se trata de una pechina que se alarga desproporcionalmente en una dirección. Encubre el apoyo de un arco como el descrito para las bóvedas dobles. La diferencia con aquella es que se sustituye una de las bóvedas de arista por una simple de cañón, con lo que su final puede tomar la forma y la dirección que quiera sin condicionar el punto ni la geometría esencial de la bóveda.



Figura 111

*(Figura 11
Cáceres).*

VH en

2.7.3 Comportamiento estructural.

Una de las características principales de las bóvedas extremeñas es que se ejecutan al aire, esto quiere decir que no se necesita una cimbra completa para la construcción de la totalidad de su superficie, aunque a veces se recurra a ella para la ejecución de algunos arcos auxiliares.

Una bóveda o arco ejerce unos empujes laterales sobre sus apoyos que deben ser contrarrestados para mantenerse en equilibrio.

El contrarresto, cuando es importante, no se confía a un solo elemento, permitiéndole a dichas fuerzas varios caminos o alternativas. Normalmente el encargado de este cometido en las bóvedas es el muro de apoyo, pero cuando éste es insuficiente se utilizan otros recursos como el tirante, la cola, una sobrecarga superior o el contrafuerte.

La bóveda no se caracteriza por su forma sino por el empuje. El contrarresto es la forma de anularlo o contrarrestarlo. Dicho empuje se produce aproximadamente a la altura del arranque de la bóveda. Los romanos los solucionaron con gruesos y pesados muros, los góticos con elegantes arbotantes y botareles. La bóveda extremeña no lo soluciona contundentemente sino que recurre a varios artificios llegando incluso a aparentar que no lo necesita⁷⁰.

(Figura 112: Esquema de fuerzas de contrarresto)

Existen varios modos de ejecutar el contrarresto en bóvedas extremeñas:

- Aumentando el grosor de los muros de apoyo.
- Recurriendo al recurso de la cola (previamente explicado en el apartado 2.7.2.2 de este trabajo).
- Sobrecargando la parte superior del muro, bien añadiendo otra planta a la edificación (antes de la construcción de la bóveda), o con un paño de baranda.
- Colocando un tirante oculto en la parte superior de la bóveda entre los 2 muros paralelos.
- Contrafuertes, utilizados a veces en edificaciones colindantes (sujetándose unas a otras).

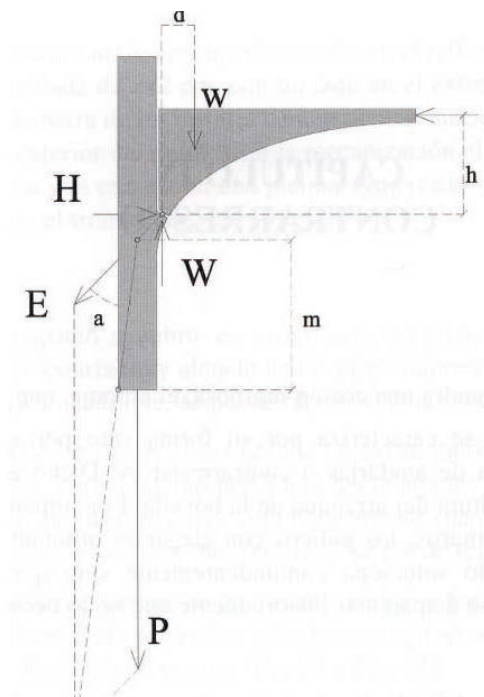


Figura 112

⁷⁰ *Ibidem*. p.46.

3. PROPUESTA DE CONSIDERACIONES PREVIAS A LA INTERVENCIÓN EN BÓVEDAS HISTÓRICAS.

Aunque al iniciar el presente trabajo había una intención -que ciertamente resultaba demasiado ambiciosa para los límites del mismo- de trazar una metodología general aplicable a la restauración de bóvedas históricas, tras el estudio tipológico previamente expuesto, resultó infructuosa la recopilación de casos de tales restauraciones. A continuación, a partir de las fases del método científico, se hace una propuesta esquemática de las consideraciones previas a la intervención en bóvedas históricas en este apartado que se divide en tres partes, correspondientes a las distintas etapas que se sucederían a la hora de reparar los daños o lesiones que pueden aparecer en una bóveda.

3.1 Observación de la lesión

En primer lugar, se procede al análisis de las lesiones o imperfecciones que se hallen en la superficie de la bóveda mediante un detenido examen y contemplación de la misma. Las que podemos encontrar son:

3.1.1 Lesiones debidas a la degradación de los materiales⁷¹:

1. Alteraciones cromáticas (*Figura 113*)



Variación de uno o más parámetros que definen el color del material. Puede presentarse de diversas formas, únicamente en zonas localizadas, o cubriendo áreas amplias del material.

2. Depósito superficial (*Figura 114*)



Acumulación de materiales de naturaleza diversa sobre la superficie, su espesor varía en cada caso.

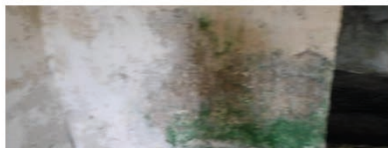
⁷¹ PARADISO, M. y TESI, V. “Il Palazzo Acciaiuoli nella Certosa di Firenze. Analisi della consistenza statica” del *Capitolo VI: Analisi del degrado*. Firenze: Università degli studi di Firenze, Facoltà di Architettura, Dipartimento di Costruzioni, 2008. Material no publicado.

3. Eflorescencias (*Figura 115*)



Formación de manchas blanquecinas debido a la cristalización de las sales sobre la superficie del material.

4. Manchas (*Figura 116*)



Contaminación accidental y localizada sobre la superficie del material.

Figura 116

5. Erosión (*Figura 117*)



Desgaste en la superficie del material debido a la acción de procesos de diversa naturaleza, como los vientos atmosféricos o el hielo-deshielo del agua que actúa sobre la superficie y en las juntas del material.

6. Falta de material (*Figura 118*)



Caída, pérdida o destrucción de parte del material.

7. Pátina biológica (*Figura 119*)



Figura 119

Modificaciones sobre la superficie del material debidas a fenómenos biológicos ajenos a la degradación, y perceptible como una modificación del color. Se podría definir también como “película” o “incrustación”

8. Fiebre de grietas (*Figura 120*)



Fenómeno físico consistente en la aparición de grietas o grietas lineales sobre la superficie del material. Pueden deberse también a fallos en el comportamiento mecánico de la estructura.

9. Deformación (*Figura 121*)



Figura 121

Variación de la geometría de la bóveda (en este caso), o de su espesor.

10. Presencia de vegetación (*Figura 122*)

Aparición de líquenes, musgos, hierbas u otros seres vegetales sobre la superficie del material.



Figura 122

3.1.2 Lesiones debidas a fallos en el comportamiento mecánico de la estructura⁷²:

11. Fisuración (8 Grietas) (Figura 123)



Explicadas previamente, pero esta vez debidas a otras causas.

12. Fracturas (Figura 124)



Rotura violenta de la complejidad de la bóveda o de una parte de la misma.

Figura 124

13. Desplomes (Figura 125)



Pérdida de la verticalidad de los muros que sostienen la bóveda.

⁷² RUSSO, C. *Lesiones de los edificios (Síntomas – causas – efectos – remedios)*. Barcelona: Salvat Editores, 1934.

14. Desplazamientos y deformaciones (Figura 126)

Variación de la posición inicial de la bóveda en su totalidad o de uno o varios elementos que la componen.

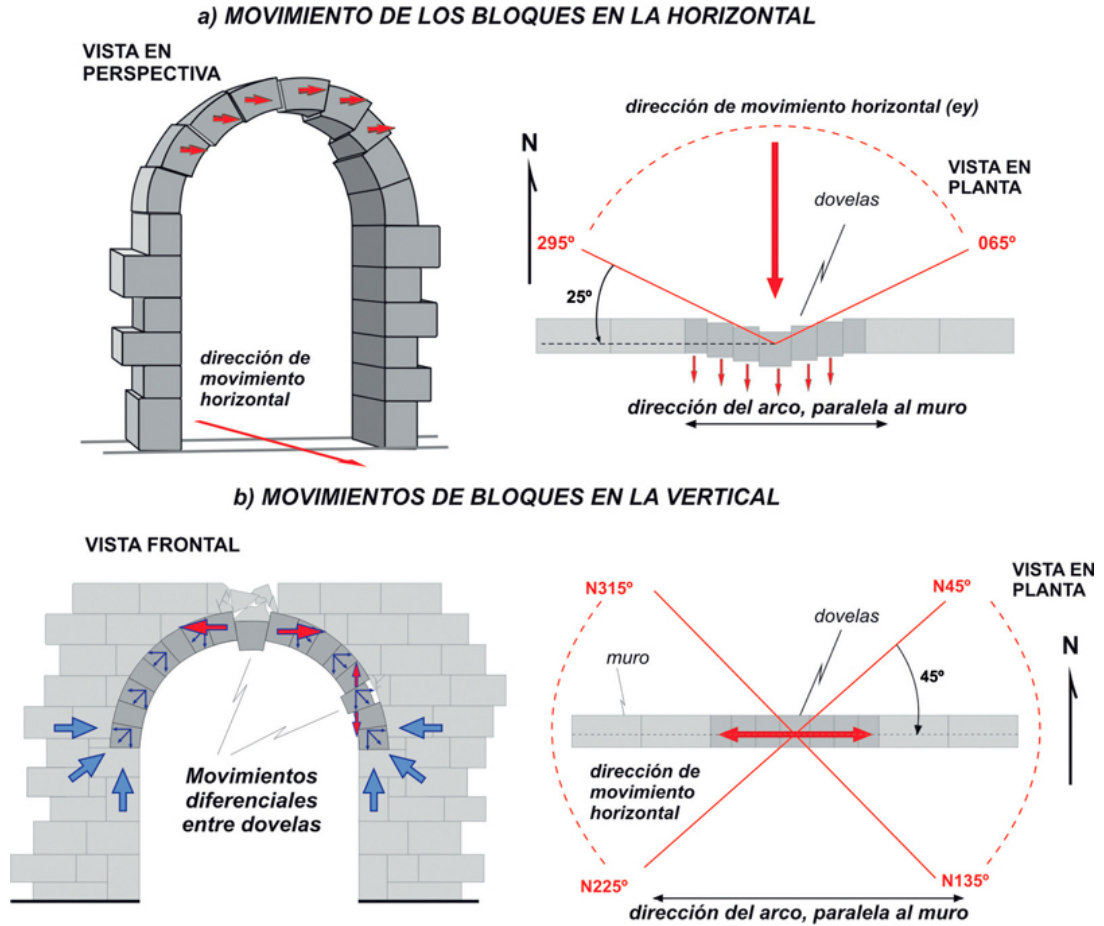


Figura 126

3.1.3 Lesiones causadas por la acción humana.

Por último, aunque menos probable, también pueden existir imperfecciones en las bóvedas causadas por la actividad del hombre, ya sea voluntaria o involuntariamente.

3.2 Hipótesis. Determinación de las causas que han provocado la lesión.

En segundo lugar, se procede con el planteamiento del origen de las lesiones en la bóveda de estudio, elaborando una explicación provisional de las posibles causas.

Para ello, es importante conocer tanto el comportamiento mecánico y estructural de las bóvedas, como los agentes externos y ajenos a ellas a los que se encontrarán expuestas.

La solidez y la estabilidad de las bóvedas, al igual que en los arcos, viene dada por las reacciones que se dan entre las distintas hiladas de dovelas que tienden a descender por su propio peso y se sostienen por las hiladas colindantes que las delimitan.

Los puntos donde se localizan las fracturas suelen ser la clave y los 2 riñones del arco.

El número, forma y ubicación de las roturas en las bóvedas dependen de las causas que las producen.

En general se suelen dar las expresadas a continuación⁷³:

1. Acomodamiento (Figura 127)

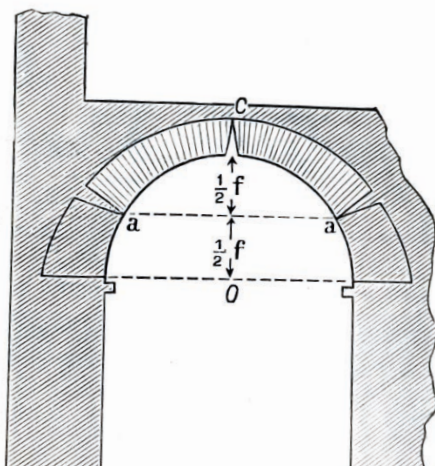


Figura 127

Fenómeno que ocurre inmediatamente o al poco tiempo de descimbrar la bóveda. Se da en nuevas construcciones. Las grietas se suelen presentar en la clave y en los riñones de la bóveda, aunque generalmente no afectan a la solidez de la construcción.

Depende del encaje de las piezas durante la construcción y después del descimbrado.

⁷³ PARADISO, M. y TESI, V, op. cit. supra, nota 71.

2. Insuficiencia de espesor (Figura 128)

Cuando el grosor de la bóveda es escaso, ésta colapsa en los riñones y en el vértice.

Dependiendo del tipo de arco y de la posición de la carga, las fracturas se localizaran en un sitio u otro.

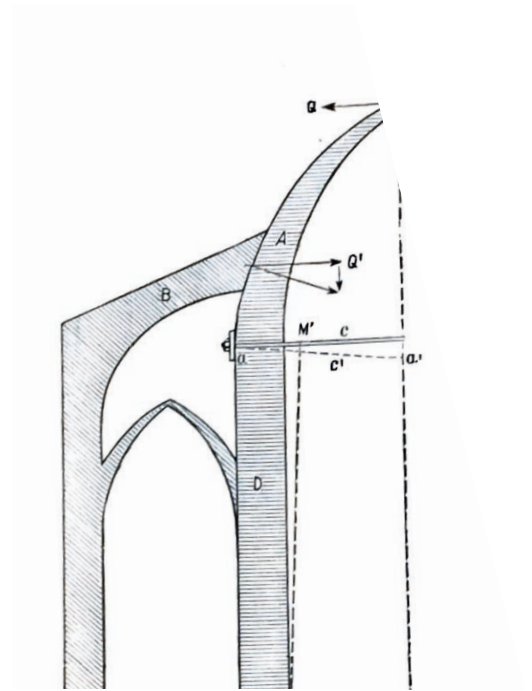


Figura 128

3. (Figura 129)

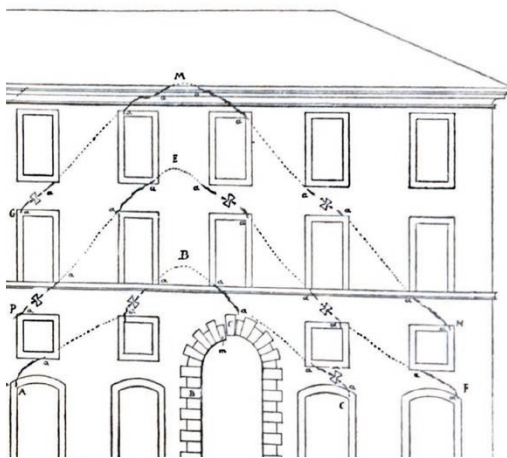


Figura 129

Provoca lesiones en la clave, (suele descender)⁷⁴, similares a las producidas por acomodamiento. Para diferenciarlas hay que saber que este tipo de lesiones en nuevas construcciones sí que comprometen la solidez y estabilidad de la construcción, nunca se presentan aisladas (van acompañadas de otros síntomas como rotura de platabandas, lesiones en los vanos, etc.).

En construcciones antiguas se descarta la opción de lesiones provocadas por acomodamiento o encaje.

⁷⁴ MOYA BLANCO, L, op.cit. supra, nota 13. Pp. 45-48.

4. Aplastamiento de la obra

Se da en bóvedas de construcción antigua, cuando se observan lesiones en todas las direcciones y se constata que los muros de apoyo se mantienen sólidos y libres de lesiones. Se produce por una sobrecarga excesiva, por la vejez de la estructura o por la mala calidad de la construcción. Para verificar que las lesiones se han dado debido a este fenómeno, se debe proceder a escuchar el sonido característico que presenta la obra ante la percusión y ante la disgregación de los morteros.

5. Rotación de los apoyos (Figura 130)

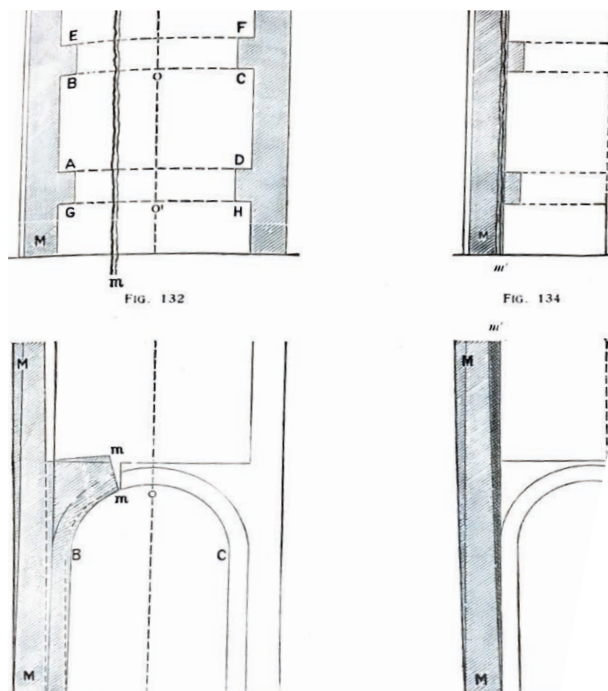
Cuando un muro se desvía de su plano vertical, se suceden alteraciones en las bóvedas que apoyan sobre él. Éstas pueden presentar distintas formas dependiendo de si las mismas están apoyadas en los muros de desplome o en los normales a estos.

En el primer caso, si la bóveda está bien encastrada sobre el muro que desploma, se produce una lesión paralela al muro desviado, y que está más o menos alejada del muro que desploma dependiendo del empotramiento y del empuje que determina la rotación.

Si por el contrario, no está bien encastrado, tiene lugar un despegue.

En el segundo caso, se establece la misma distinción que en el primero. Si hablamos de un buen empotramiento aparece una lesión paralela al mismo, muy próxima a él y que afecta a toda la bóveda.

En caso de empotramiento imperfecto, tiene lugar el despegue del muro.



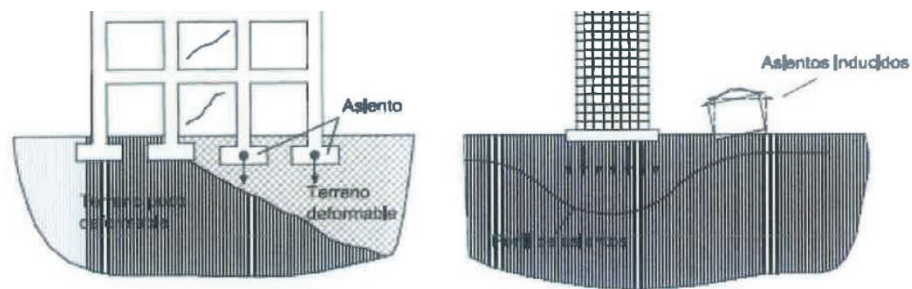
En cruceros, las 4 columnas deben contrarrestar los empujes laterales. Es por ello, que la rotación de las mismas o su pandeo en la parte central puede provocar lesiones en la bóveda, algunas veces en la parte central y otras normales a las generatrices de la bóveda.

Figura 130

6. Corrimiento del plano de asiento (Figura 131)

La existencia de un terreno heterogéneo de cimentación propensa la aparición de asientos diferenciales en el mismo⁷⁵. Así mismo, las condiciones diferenciales de carga o apoyo señalan la variación de un estrato compresible próximo a la cimentación, lo que puede ocasionar importantes asientos a largo plazo. Consecuentemente, en las bóvedas y arcos de la superficie deslizada se suceden diversas lesiones.

Las diferencias sustanciales de cargas dadas en torres adosadas a edificios de menos altura son un fenómeno bastante común en la actualidad.⁷⁶



7. Dilataciones⁷⁷

Sus efectos son importantes en bóvedas de cubierta de más de 15 metros de luz, y en todas las bóvedas que no tienen tejado.

(Figura 132: Iglesia de Manzanares. Sección longitudinal de un tramo de la bóveda).



FIG. 44.—Iglesia de Manzanares: Sección longitudinal de un tramo.

⁷⁵ BENITO DUQUE, M. "TEMA 1 – Estructura y cimentación". Asignatura *Evaluación y actuación en edificios*. Valladolid: 2019. Material no publicado, pp. 3-8.

⁷⁶ BASTERRA OTERO, L A, op.cit. supra, nota 8.

⁷⁷ MOYA BLANCO, L, op.cit. supra, nota 13.

3.3 Trabajos de restauración

Por último, se procede a la reparación del daño mediante la técnica adecuada. Dependiendo del caso, se utilizarán unas técnicas de restauración u otras.

En este punto se explicarán algunas soluciones para aplicar a las causas mencionadas en el apartado anterior.

3.3.1 Trabajos de limpieza y mantenimiento

Las lesiones causadas por la degradación progresiva del material, o debido a distintos agentes químicos y atmosféricos que hayan podido reaccionar con éste, se restauran gracias a los trabajos de limpieza y mantenimiento.

Actualmente existen numerosas técnicas de restauración para la degradación de los materiales, desde limpiezas mediante el raspado del material con limpiadores jabonosos, limpiezas con agua a presión...hasta barnizados e impermeabilizaciones para un acabado más duradero.

Para la limpieza de las superficies se pueden emplear diversos instrumentos como cepillos, rascadores, bisturís y otras herramientas tradicionales, que se suelen alternar con humectaciones con vaporizadores para facilitar la limpieza⁷⁸.

Los métodos de la cal son también reseñables en los trabajos de restauración actuales⁷⁹. Se procedería con la limpieza de la superficie de la bóveda (que dependiendo del material podrá realizarse con métodos secos, húmedos, láser...etc.) Posteriormente se aplicarían cataplasmas de cal caliente puntualmente en las áreas que contienen costras formadas por cristalización de sales con grasas, organismos u otros materiales degradantes. En caso de costras muy duras y difíciles de eliminar se emplean cataplasmas de cal viva.

Debe tenerse en cuenta que después de la aplicación de cualquier tratamiento de cal se debe limpiar inmediatamente la superficie con agua, pues la rápida carbonatación de la cal en contacto con la atmósfera genera anhídrido carbónico.

También se emplean inyecciones de cal para la consolidación estructural del material, mejorando la estructura precedente gracias a la adhesividad del mortero inyectado y a su capacidad de penetración en la albañilería para eliminar las discontinuidades⁸⁰.

Otras inyecciones⁸¹. Actualmente se pretende con los distintos sistemas de inyecciones de resinas o cosidos armados con aceros inoxidables, crear una estructura homogénea y resistente que soporte cualquier acción (vibraciones, desprendimientos, errores humanos...) que se comporte de un modo elástico con la estructura preexistente. El comercio hoy en día ofrece numerosos productos para inyecciones derivados del cemento o derivados de destilaciones del petróleo y aceros corrugados para una adherencia más eficaz.

⁷⁸ GÁRATE ROJAS, I. *Artes de la cal*. Madrid: Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Ministerio de Cultura, 1994.

⁷⁹ Ídem.

⁸⁰ BASTERRA OTERO, L A, op.cit. supra, nota 8, pp.154-160.

⁸¹ GÁRATE ROJAS, I, op.cit. supra, nota 78.

Los revocos⁸². Antiguamente se realizaban técnicas de revocado en las obras expuestas a la degradación, con función de protección y ornamentación. Se utilizaban morteros de cal o cemento. Actualmente se han sustituido los revocos por otros materiales plásticos de revestimiento, pero teniendo en cuenta las condensaciones que se pueden producir en el interior, por eso es preferible la elección de materiales porosos en las cubriciones.

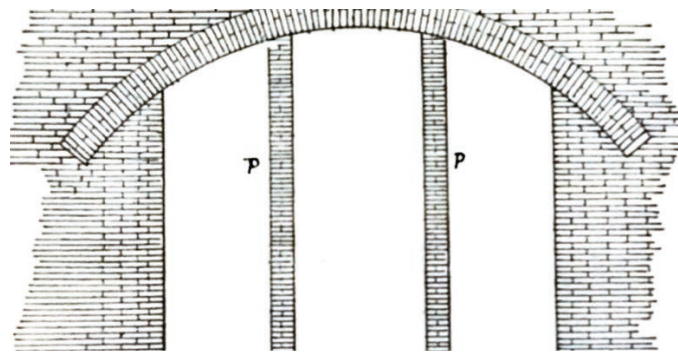
⁸² BAGLIONI, A. y GUARNERIO, G. *La Rehabilitación de edificios urbanos*. Tecnologías para la recuperación. Barcelona: Editor GG, 1988.

3.3.2 Soluciones para fallos en el comportamiento mecánico de la estructura.

A continuación se procederá con la explicación de las intervenciones actuales más frecuentes en bóvedas cuando se producen fallos estructurales.

1. Apuntalamiento

Como los puntos más peligrosos donde se localizan las fracturas de las bóvedas son la clave y los riñones, el método más seguro y sencillo de apuntalamiento consiste en la colocación de puntales apoyados en el suelo, cuyo extremo superior sirva de apoyo a estos puntos.



(Figura 133: Colocación de apuntalamiento para la apertura de grandes luces).

Un método similar también se emplea cuando se necesitan construir arcos y bóvedas de cierta luz de un modo económico y rápido, empleando pilares de fábrica y siempre que lo permita la estética de la construcción (Figura 133). Ejemplo de esta técnica lo encontramos en las termas de Diocleciano en Roma, y actualmente esta técnica resulta necesaria en grandes espacios cubiertos por bóvedas muy rebajadas, principalmente utilizadas en las plantas bajas de las torres y de otros edificios de lujo⁸³.

⁸³ RUSSO, C, op. cit. supra, nota 72.

2. Disposición de cadenas

Cuando se producen lesiones por falta de espesor, resulta bastante útil la aplicación de un encadenado. Si en el momento de colocar estas cadenas se tensan excesivamente los manguitos, se obliga a los pilares a acercarse entre sí, pudiéndose producir roturas a 60° y 30° respecto a la línea de arranque del arco⁸⁴.

(Figura 134: Encadenado de un pórtico. B representa los manguitos, a-a el encadenado).

(Figura 135: Posibles lesiones debidas a la excesiva tensión de los manguitos).

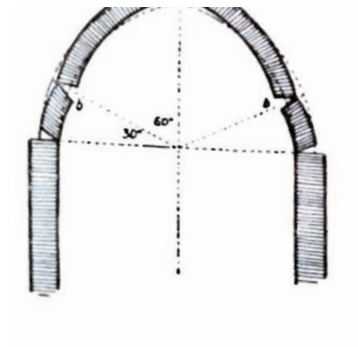
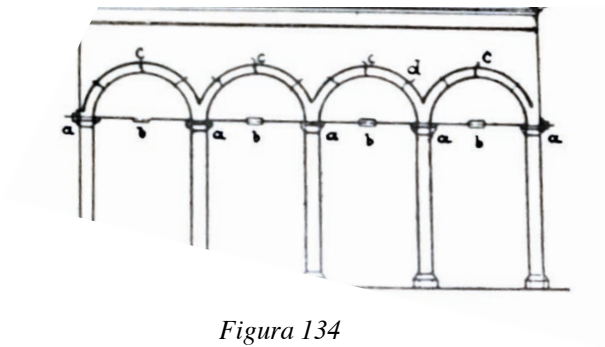


Figura 134

Cuando debe repararse un crucero, generalmente se establecen 4 cadenas formando un cuadrado horizontal con los vértices en los puntos medios de las columnas (Figura 136).



⁸⁴ Ídem.

3. Empleo de contrafuertes

Antiguamente, si se daba el caso de que las cargas dominantes de la estructura eran las laterales, se acostumbraba a construir exteriormente a las iglesias y por encima de las naves laterales contrafuertes (*Figura 137*), con el fin de neutralizar los empujes de las bóvedas y arcos de las grandes naves centrales.

En muchos templos de las grandes ciudades se aprecian estos contrafuertes, aunque en ocasiones han sido recortados en forma de cartabones (*Figura 138*) por razones estéticas, y llegan en altura hasta la junta de rotura de la nave central⁸⁵.

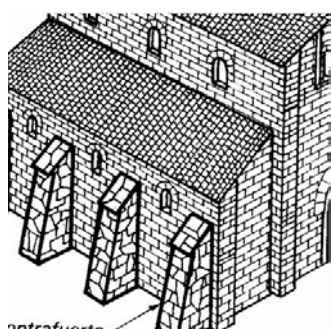
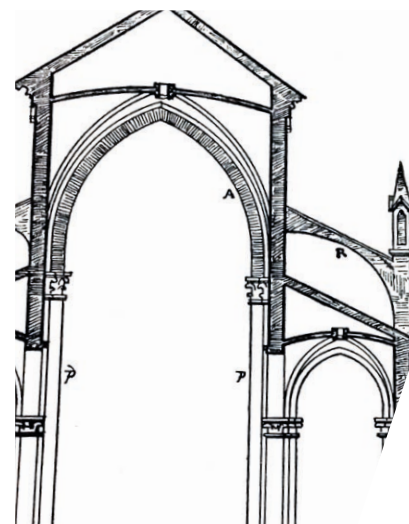


Figura 137



4. D

El arte Gótico modificó este sistema de muros de contraempuje sustituyéndolos por arcos rampantes o arbotantes (*Figura 139*). En las bóvedas góticas (con su característica forma apuntada o de ojiva), las nervaduras (A) cargan con el peso de las medias faldas laterales, transformando este esfuerzo en una componente horizontal y vertical. Un elemento resistente se opone a cada una de estas componentes, de modo que mientras que los pilares (P) resisten los empujes verticales o peso, los arbotantes se oponen a los empujes. De este modo, las estructuras góticas resultan más ligeras que sus precedentes románicas y transmiten empujes menores a sus apoyos. Por esta razón las construcciones góticas son menos gruesas y más esbeltas⁸⁶.



⁸⁵ Ídem.

⁸⁶ BASTERRA OTERO, L A, op.cit. supra, nota 8, pp.17-18.

5. Previsión de movimientos de la estructura

BÓVEDA TABICADA DE CAÑÓN DE MEDIO PUNTO

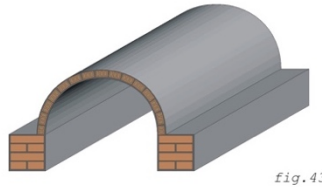
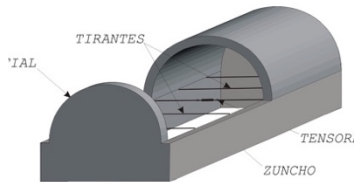


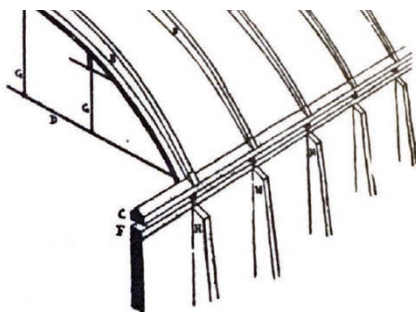
fig. 4:



Las lesiones producidas por asiento son de fácil previsión, es por ello que se deben tener en cuenta las rozas existentes en los muros de testa desde los que arranca la bóveda. La roza deberá hacerse con holgura en previsión al descenso de la clave, ya que en caso de empotramiento podría producirse una grieta en la bóveda paralela a dicho muro a poca distancia del mismo⁸⁷.

Si se trata de lesiones producidas por el corrimiento del plano de asiento, se debe zunchar o atar su base (*Figura 140*), y cuanto más larga y/o más rebajada se encuentre su clave, más necesidad habrá de atirantarla o de disponerle contrafuertes.

En el caso de lesiones debidas a la rotación de los sostenes que pueden producirse por dilataciones, se deben controlar las distancias entre juntas de dilatación y los movimientos de dilatación de la bóveda y del tirante. Para ello, se deja libre el giro del arranque de la bóveda en su estribo, haciéndolo articulado. Por consiguiente, no se hace solidaria la bóveda con el estribo, ni ésta con el muro, el cual debe prepararse para este tipo de movimientos. Si el muro colinda con otras construcciones debe controlarse el contrarresto de sus empujes, sin embargo, si se encuentra aislado deben emplearse contrafuertes o pilastras.



-Bóveda con costillas y apoyos giratorios rodantes, para grandes luces:

- A: Bóveda.
- BB: Costillas.
- C: Estribo.
- D: Tirante.
- EE: Juegos de rodillos.
- F: Carrera sobre la cabeza del muro.
- GG: Péndolas.
- HH: Contrafuertes.

⁸⁷ MOYA BLANCO, L. op.cit. supra, nota 13. Pp. 46-48.

Las articulaciones se realizan como las que actualmente se emplean en estructuras metálicas y de hormigón armado, pero adaptándolas a cada sistema particular. Si estos apoyos articulados estuviesen siempre pulcramente engrasados y en su estado óptimo, los movimientos de rotación no afectarían a la estructura, ya que esta transmitiría únicamente las cargas verticales. Sin embargo, como estos apoyos se suelen oxidar y se realizan toscamente, los movimientos de deslizamiento y giros son bruscos, y afectan notablemente al comportamiento del muro. Es por ello que no se puede dejar un muro que trabaja en estas condiciones sin elementos de refuerzo, que absorban el choque producido por las bruscas sacudidas de los apoyos móviles de la bóveda, que los refuercen en el sentido perpendicular a su plano⁸⁸.

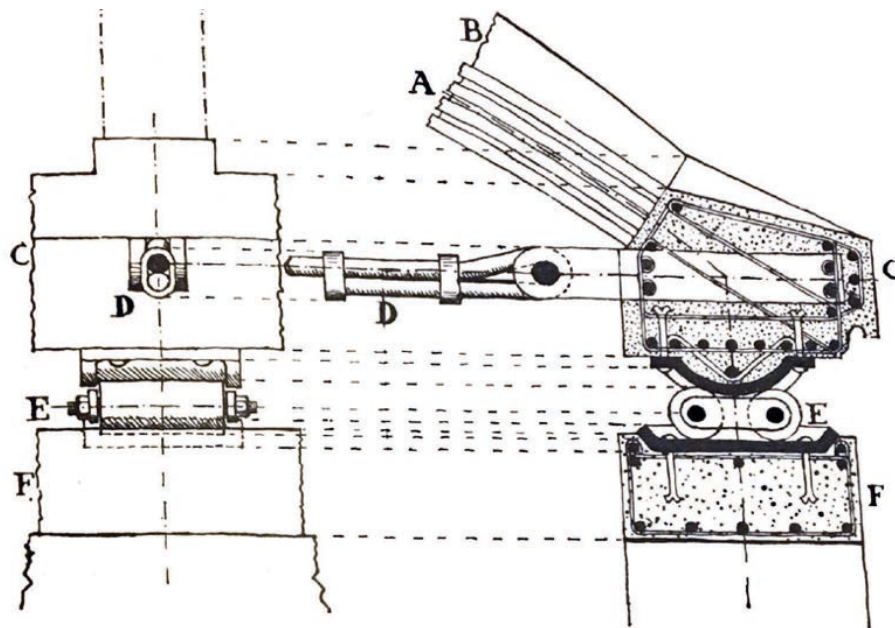


FIG. 45.—Apoyo de giro y deslizamiento (detalle de la fig. 46):

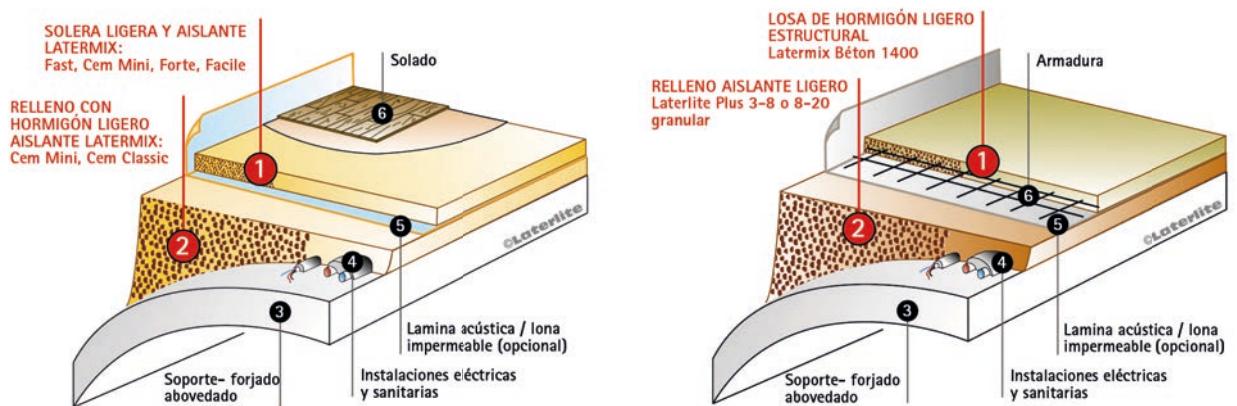
- A: Bóveda de rasilla.
- B: Costilla de rasilla.
- C: Estribo dispuesto para recibir cargas y empujes entre cada dos tirantes.
- D: Tirante con articulación.
- E: Rodillos, de los que corresponde un juego a cada tirante.
- F: Carrera sobre la cabeza del muro.

⁸⁸ Ídem.

3.3.3 Otras intervenciones.

1. Aislamientos

Antiguamente no se tenía en cuenta el aislamiento en las cubiertas abovedadas pero en las construcciones actuales es inconcebible prescindir de él. Para ello se utilizan rellenos de arcilla expandida o rellenos en seco que son resistentes al fuego, a los parásitos y duraderos en el tiempo. Estos son óptimos para la restauración de bóvedas históricas ya que permiten aligerar, obtener un reparto óptimo de las cargas y aislar sin variar la técnica constructiva original, sin aportar agua o humedad a la estructura (respetando las decoraciones).



(Figura 143: Aislamiento de bóveda en la actualidad con Laterlite).

2. Impermeabilización⁸⁹.

Es muy importante la protección frente al agua en las bóvedas, especialmente si éstas actúan como cubierta externa.

Durante el siglo XX las cubiertas abovedadas se impermeabilizaban con una lechada de cemento y cal, lo que eliminaba la porosidad, o con un chapapote caliente que resultaba en un acabado poco estético pero bastante útil, hasta que se secaba y se desprendía.

Estos y otros métodos para impermeabilizar fueron desplazados por el surgimiento de una gran variedad de polímeros que ahora llevan marcas comerciales específicas. Excesivamente costosos, pero también muy buenos si la técnica de aplicación es la adecuada. Porque hay que advertir una cosa: cuando la cobertura y el sellado no son totales, el agua de lluvia puede penetrar hasta el material de construcción y empeorar los problemas de humedad. El líquido queda atrapado debajo de la capa "protectora" sin poder evaporarse y escapar, así que no tiene otra posibilidad que buscar salida hacia abajo.

⁸⁹ BENUY TEJEDOR, M. y BOYARIZO GÓMEZ, E. *Breves consideraciones sobre el diagnóstico de patologías en la edificación*. Madrid: Imprenta Tomás Hnos. Humanes, 2002.



(Figura 144: Impermeabilización de bóveda en Templo San José el Viejo, Guatemala).

Actualmente existen diversas soluciones a la hora de impermeabilizar una cubierta pero las más comunes para superficies regulares son la imprimación con pintura oxiasfáltica y la posterior colocación de una lámina asfáltica soldada con refuerzo de fibras, o la aplicación de jabón con alumbre, lo que no perjudica la estética de la cubierta.

Si se prevén muchas humedades debido a las condiciones meteorológicas se debe plantear la posibilidad de establecer algún sistema de drenaje como por ejemplo el drenaje sistemático (utilizado en túneles) alojado en rozas perimetrales, con recogida de aguas de filtración en la cuneta longitudinal y un revestimiento, como mínimo en bóveda, a base de hormigón proyectado impermeable de 4 cm. de espesor mínimo.

Protección contra incendios⁹⁰. También es de importancia reseñable preparar y proteger las bóvedas frente al fuego, tema que hasta hace poco más de un siglo no ha preocupado a los constructores. Es por ello que actualmente se piensa en la ignifugación a la hora de construir cualquier superficie abovedada y también a la hora de restaurar las preexistentes, sean de valor histórico o no.

Principalmente se utilizan morteros ignífugos como el de perlita y vermiculita, el de lana de roca o pinturas intumescentes.

⁹⁰ BAGLIONI, A. y GUARNERIO, G, op.cit. supra, nota 82.

4. EPÍLOGO.

A través de lo expuesto en este Trabajo de Fin de Grado, se puede colegir como la construcción de bóvedas es una técnica muy específica que se ha ido depurando desde sus orígenes en Mesopotamia hasta la época de la Revolución Industrial del siglo XIX. A día de hoy esta tecnología aún sigue vigente, aunque en la arquitectura moderna y contemporánea no es frecuente, ya que no parece resultar útil a sus objetivos formales ni competitiva con otros sistemas estructurales, si bien, a través de una búsqueda de casos históricamente recientes, podría dar lugar a un interesante trabajo sobre su vigencia como forma.

Parte de su gran versatilidad estriba en que, dependiendo de los recursos que se disponían en cada etapa y en cada área geográfica, se han empleado unos materiales u otros a lo largo de la historia, desde los barro y adobes que obtenían de la naturaleza, hasta los nuevos materiales como los metales y el hormigón, que han permitido la cubrición de grandes luces.

Se puede afirmar que la construcción de bóvedas alcanzó su máximo esplendor en España en el siglo XVI, época renacentista donde encontramos espléndidos ejemplos de arquitectura ligados al oficio que como constructores poseían los arquitectos.

Es particularmente interesante la evolución constructiva que experimentan las bóvedas en España, singularmente la aportación que significan las tabicadas dentro del corpus de esta forma, las cuales han sufrido diversos desarrollos dependiendo de cada región.

En el trabajo he tratado de sintetizar las tipologías de bóvedas que he considerado más reseñables en España, su construcción y proponer una serie de consideraciones previas técnicas para intervenir en las mismas. Soy consciente de que objetivamente este tema de estudio es de una extensión amplísima, y de que se podría desarrollar más concreta y minuciosamente cada una de estas tipologías, así como sus numerosas técnicas constructivas y de restauración de las mismas.

Como menciono en la introducción, mi enfoque no se ha dirigido particularmente al desarrollo de cada una de las tipologías ni al cálculo estructural de las mismas, ya que esos contenidos han sido considerablemente estudiados y tratados por numerosos técnicos y autores. Las cargas aplicadas sobre la bóveda actúan como esfuerzos que se comportan de distinto modo dependiendo de la forma y trazado del arco sobre el que está proyectada. Tal afirmación se sustenta en Guastavino, Heyman y Gaudí, entre otros estudiosos, que comprobaron y demostraron empíricamente el funcionamiento del arco. Estos expertos estudiaron el cálculo tradicional de las estructuras tabicadas y de mampostería. Por medio de los avances científicos y tecnológicos actuales y el desarrollo de las teorías de cálculo estructural aplicado a las bóvedas, se pueden solventar y restaurar con más rigor las lesiones que puedan darse.

Hasta el siglo XVII las construcciones se basaban las reglas de proporción derivadas de la práctica de la construcción en sí. Fray Lorenzo de San Nicolás en el siglo XVII, fue uno de los primeros autores que recopiló las técnicas constructivas de la antigüedad. En su tratado estableció una serie de reglas de proporciones entre la luz y el espesor del arco, así como los primeros análisis de equilibrio. De su recopilación y aportación, entre otras, derivan la teoría monolítica, los análisis de equilibrio y teorías de líneas de empuje (como el famoso empleo del polígono funicular de Gaudí), los análisis elásticos y los ensayos en bóvedas para validar un sistema, destacando los realizados por Guastavino. En España, los estudios más recientes y precisos acerca del funcionamiento de las estructuras abovedadas son los que aportan los trabajos de Santiago Huerta.

En lo que se refiere a la intención original de mi trabajo sobre metodología de la intervención y restauración en bóvedas históricas, concluyo que no existe propiamente un método concreto de “restauración de bóvedas”, en el sentido literal de la palabra. Cuando una bóveda pierde estabilidad debido a un fallo estructural importante y colapsa, se reconstruye, en rigor no se restaura.

En la actualidad los métodos de reconstrucción son similares a las técnicas de construcción de bóvedas de la antigüedad, con cimbras, andamios y otros medios auxiliares. Bien es cierto, sin embargo, que en el presente se disponen materiales de mayor calidad y medios auxiliares mecánicos más eficientes que facilitan y agilizan el proceso constructivo de las cubriciones: mientras siglos atrás se construían catedrales con el apoyo de grúas de madera maciza, poleas simples y andamios y apuntalamientos con listones y rollizos, hoy en día se construyen gracias a grúas de torre mecánicas con motor eléctrico, cimbras de madera laminada y sillares y piezas labradas rigurosamente en taller con mano de obra muy especializada.

Por consiguiente, la “restauración” de bóvedas, bajo mi punto de vista, se circunscribe a la intervención en las mismas sobre patologías superficiales, como pueden ser manchas por humedades, eflorescencias, aparición de vegetación...etc., o fallos estructurales de menor índole que pueden prevenirse y solucionarse mediante la disposición de sistemas de refuerzo como cadenas, tirantes, puntales y otras técnicas explicadas en el último apartado de este trabajo.

En función de las patologías que experimenten las cubriciones, se procederá a utilizar unas técnicas de restauración u otras, siendo estas cada vez más precisas en la información previa. En efecto, la variedad de instrumentos y aparatos existentes posibilita el empleo de unos u otros en base a los datos que se quieran obtener: mediciones, resistencia de la estructura en un punto determinado, estado y composición del material, etc. Dispositivos actuales como esclerómetros, medidores láser o escáneres de nube de puntos permiten una detección más rigurosa y acertada de las lesiones, proporcionando datos y medidas de precisión micrométricos. Por otro lado, el empleo de materiales como la fibra de carbono o de las resinas permiten nuevos enfoques en la restauración estructural de monumentos históricos.

Hoy en día, el sistema de la bóveda se considera un método de construcción tradicional, por lo tanto su empleo es menos frecuente que antaño. Es más sencillo encontrar construcciones abovedadas en medios rurales, donde las técnicas constructivas clásicas están más presentes. Los forjados de bóvedas tabicadas como bóvedas catalanas u otros modelos de bóveda de arcos tendidos, se siguen utilizando –bien que minoritariamente- para la construcción de viviendas, ya que estas tipologías no necesitan cimbra y conforman un sistema constructivo rápido, económico y sencillo, sin necesidad de mano de obra específicamente especializada. También en la actualidad se utilizan las bóvedas para cubrir espacios de mayor amplitud como bodegas.

En definitiva, la construcción de bóvedas sigue ejecutándose y, aunque menos generalizada que en otras etapas de la historia, se mantiene vigente, es práctica, estética y funcional y puede perdurar en el tiempo, de modo que estudios y trabajos sobre dicha vigencia y uso en las arquitecturas más recientes resulta un objetivo futuro particularmente interesante.

5. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ALEGRE CARVAJAL, E., MARTÍNEZ PINO, J., MONTEIRA ARIAS, I., PERLA DE LAS PARRAS, A. y VIDAL ÁLVAREZ, S. *El Arte en la Baja Edad Media occidental: arquitectura, escultura y pintura*. Madrid: Editorial Ramón Areces, 2014.
- BAGLIONI, A. y GUARNERIO, G. *La Rehabilitación de edificios urbanos*. Tecnologías para la recuperación. Barcelona: Editor GG, 1988.
- BASTERRA OTERO, L A. “Técnicas de restauración de los edificios históricos”. Asignatura *Historia y teoría de la Restauración Arquitectónica* . Valladolid: 2018. Material no publicado.
- BENITO DUQUE, M. “TEMA 1 – Estructura y cimentación”. Asignatura *Evaluación y actuación en edificios*. Valladolid: 2019. Material no publicado.
- BENUY TEJEDOR, M. y BOYARIZO GÓMEZ, E. *Breves consideraciones sobre el diagnosis de patologías en la edificación*. Madrid: Imprenta Tomás Hnos. Humanes, 2002.
- BUENAVENTURA BASSEGODA. I N. *La Bóveda Catalana* (Discurso leído). Barcelona: Escuela Superior de Arquitectura y Real Academia de Ciencias y Artes, 1946.
- CAPITEL, A. *Metamorfosis de monumentos y teorías de la restauración*. Madrid: Alianza Forma Editorial, 1988.
- CHOISY, A. *El Arte de Construir en Bizancio*. Edición a cargo de Santiago Huerta Fernández y F. Javier Girón Sierra, Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1997.
- CHUECA GOITIA, F. *La arquitectura del siglo XVI*. Madrid: Editorial Ars Hispania, XI, 1953, pp. 183-184.
- DE LA PLAZA ESCUDERO, L. *Diccionario visual de términos arquitectónicos*. Madrid: Ediciones Cátedra, 2012.
- DE TORRIJA, J. *Breve Tratado de Bóvedas*. Madrid: Edición Facsímil, 1961.
- DÍAZ-ROMERAL, P. “Elevación de una cúpula de hormigón en el Palacio de Congresos de Salamanca.” en *Informes de la Construcción*. Vol 41, nº 404, noviembre/diciembre 1989. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1989.
- DIETRICH WILDUNG, K. *Egypt, From Prehistory to the Romans*. Berlín. Editorial: Taschen, 2001.
- ESCRIG PALLARÉS, F. *La Cúpula y la torre*. Sevilla: Editorial Architectonic, 1994.

- FORTEA LUNA, M y LÓPEZ BERNAL, V. *Bóvedas Extremeñas: proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Badajoz: Edición COADE. Delegación de Badajoz, 1998.
- GÁRATE ROJAS, I. *Artes de la cal*. Madrid: Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Ministerio de Cultura, 1994.
- GARCÍA CASCO, A. Tema 8: Fallos en la estructura, asignatura *Restauración de monumentos/ Restauración de materiales pétreos*. Petrología y Geoquímica de la Universidad de Granada. Material no publicado. Granada, 2007. [Consultado el 7 de julio de 2018]. Disponible en: https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/0_restauracion.htm
- GIEDION, S. *Espacio, tiempo y arquitectura*. Barcelona: Editorial Reverté, 2009.
- HESS, F. *Construcción y forma en arquitectura*. Versión de la 3ª edición alemana por Antonio Munné Arquitecto. Buenos Aires: Ediciones G. Gili S. A., 1954.
- HUERTA, S. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.
- LÍNDEZ, B., RODRÍGUEZ, M. “La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada. Hipótesis constructiva” en *Informes de la Construcción*. Granada: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015. Vol 67, nº 540: e125. [Consultado el 16 de julio de 2018] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.004>.
- MAGRO MORO, J.V. y MARÍN SÁNCHEZ, R. *La construcción en la Baja Edad Media*. Valencia: Colección libro docente, Universidad Politécnica de Valencia, 2003, p.85.
- MORALES Y MARÍN. *Diccionario de la Arquitectura Española*, vol.6 en Historia de la Arquitectura Española. Barcelona: Editorial Planeta, 1947.
- MOYA BLANCO, L. *Bóvedas Tabicadas*. Madrid: Ministerio de la Gobernación, Dirección General de Arquitectura, Servicio de publicaciones, 1947.
- PALACIOS, GONZALO J.C. *Trazas y cortes de cantería en el Renacimiento español*. Madrid: Ministerio de Cultura. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, 1990.
- PALACIOS, GONZALO J.C. *La estereotomía en las construcciones abovedadas*. Madrid: Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid, 1999.

- PARADISO, M. y TESI, V. “Il Palazzo Acciaioli nella Certosa di Firenze. Analisi della consistenza statica” del *Capitolo VI: Analisi del degrado*. Firenze: Università degli studi di Firenze, Facoltà di Architettura, Dipartimento di Costruzioni, 2008. Material no publicado.

- PONTE BLANCO, F. *Tratado práctico de estereotomía, aplicaciones al corte de piedras, maderas y hierros*. La Coruña: Imprenta Garcybarra, 1921.

- RABASA, E. “Principios y construcción de las bóvedas de crucería” en *Revista Loggia Arquitectura y restauración*. Nº 20. Valencia: UPV, 2007, pp. 86-97.

- REDONDO MARTÍNEZ, E. *La Bóveda tabicada en España en el Siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo*. Tesis Doctoral dirigida por el Doctor Arquitecto Santiago Huerta. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2013. [Consultado el 12 de agosto de 2018]. Disponible en: <http://oa.upm.es/22064/>

- REQUENA RUIZ, I. *Análisis de tipologías estructurales. Bóveda, lámina, cúpula y paraboloides*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2004. Material no publicado.

- RODRÍGUEZ AMIGO, A. “Bóvedas en España. Las bóvedas extremeñas”, asignatura *Sistemas Constructivos Tradicionales y Tipologías Históricas*. Badajoz: 2012. Material no publicado.

- ROVIRA Y RABASSA, A. *Estereotomía de la piedra*. Barcelona: Librería y estampería Artística, 1897.

- RUSSO, C. *Lesiones de los edificios (Síntomas – causas – efectos – remedios)*. Barcelona: Salvat Editores, 1934.

- TARRAGÓ, S. *Miscel·lània*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: Iniciativa digital Politècnica, 2013.

- TRUÑO, A. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Editorial Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.

- WILDUNG, D. *Egypt, From Prehistory to the Romans*. Colonia: Editorial Taschen, 2001.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- CHOISY, A. *El Arte de Construir en Roma*. Edición a cargo de Santiago Huerta Fernández y F. Javier Girón Sierra. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1999.
- CULTI E CULTURE NEGLI IBLEI. *La Catedrale di San Nicolò*. Noto (Sicilia). [Consultado el 8 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.cosmoibleo.com/es/monumenti/noto-basilica-la-catedral-de-san-nicolo/>
- HEYMAN, J. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica vol. 1*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2015.
- LABORATORIO CITTÀ E TERRITORIO. Srl Società di ingegneria. Restauraciones. *La catedral de Noto*. NOTO, 2012. [Consultado el 8 de junio de 2019] Disponible en: <http://www.lct-architettura.it/Restauri/&id=51>
- PALACIOS GONZALO, J C. *La Cantería medieval. La construcción de la bóveda gótica española*. Madrid: Editorial Munilla-lería, 2009.
- SIMONIN, Mr. *Tratado elemental de los cortes de cantería, o Arte de la montea*. Madrid: Imprenta de la viuda de Josef García, 1795.
- WEB DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA. [Consultado el 5 de junio de 2019] Disponible en: <http://invarquit.cultura.gencat.cat/Cerca/Fitxa?index=0&consulta=&codi=145>

RECURSOS ELECTRÓNICOS

- ACADEMIA.EDU. Perfil de Dr. Jose Carlos Palacios Gonzalo. Madrid, 2019. [Consultado el 9 de junio de 2019] Disponible en: <https://upm-es.academia.edu/JoseCarlosPalaciosGonzalo>
- DELEGACIÓ MCS. “El Departamento de Cultura y la Obra Social “La Caixa” presentan la restauración de seis monumentos románicos de los valles de Aneu” en *Bisbat d’Urgell*. Urgel, 2015. [Consultado el 13 de julio de 2018] Disponible en: <https://www.bisbaturgell.org/index.php/es/mitjans-de-comunicacio/noticies/2015/7674-inauguracio-dels-treballs-de-restauracio-de-sis-esglesies-de-la-vall-d-aneu>
- ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA Y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. *Bóvedas góticas de crucería*. Madrid, 2011. [Consultado el 9 de junio de 2019] Disponible en: <http://bovedasgoticasdecruceria.com/>
- WIKIARQUITECTURA, *Santa Maria dei Fiore*. [Consulta el 27 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/santa-maria-del-fiore/>
- YOUTUBE, “BOVEDA VAIDA” en Youtube. [Consulta el 20 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=l_tuFUVjZXM
- YOUTUBE, “Impermeabilización de bóvedas en el antiguo templo de San José El Viejo” en Youtube. [Consulta el 27 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=fHoVsqq-Gd4>