

Analisis estructural del cimorro de la catedral de Ávila

María Ángeles Benito

La catedral de Ávila será la última de las cuatro catedrales románicas de la Extremadura castellana: la salmantina, la de Ciudad Rodrigo y la desaparecida de Segovia. La rudeza del tiempo y la peculiar orografía urbana de la ciudad amurallada, obligó a levantar una catedral-fortaleza, un verdadero bastión militar. La relación entre la muralla y la catedral se hace especialmente patente en la parte de la cabecera que se denomina cimorro, se convierte en el cubo mayor del recinto amurallado (Martín, 2004).

Iniciado de acuerdo con unas pautas románicas, el templo será una de las primeras fábricas góticas, existiendo un ajuste de una estructura gótica sobre una planta románica. En el último cuarto del siglo XII encontramos, trazada por Fruchel, una cabecera con múltiples capillas absidiales que se abrían a la girola.

Esta comunicación aborda el estudio de la bóveda sexpartita perteneciente al presbiterio en la cabecera de la Catedral de Ávila. El trabajo se apoya en la planimetría existente¹ y en un levantamiento² riguroso realizado en la zona de la cabecera, investigando sobre lo que pudo ser su traza original y el proceso constructivo llevado a cabo, para realizar un análisis estructural del equilibrio y sistema de contrarresto en una sección transversal por su cabecera. Por otro lado, este trabajo se enmarca dentro de una tesis doctoral sobre la evolución constructiva y análisis estructural de la Catedral de Ávila.

FORTIOR ABULENSIS, EL TEMPLO FORTALEZA

Funcionalmente la catedral abulense es un poderoso ejemplo de templo-fortaleza, pudiéndose calificar como fortitor abulensis, añadiendo este calificativo al dístico latino *Sancta Ovetensis, Fortis Salmantina, Dives Toletana, Pulcra Leonina*.

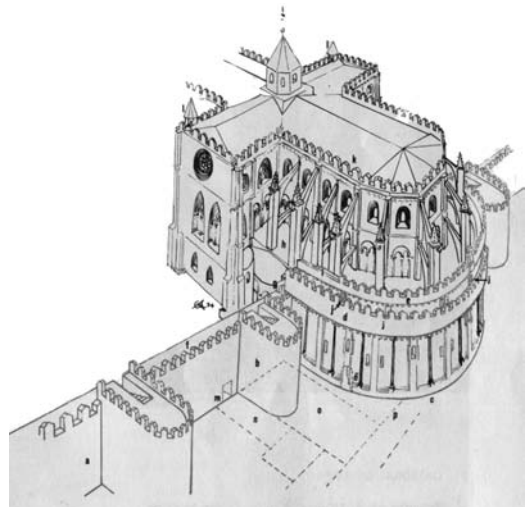


Figura 1
Reconstrucción ideal del proyecto de Fruchel. (Rodríguez Almeida 1975)

Los siguientes dibujos muestran la sucesiva modificación de la cabecera³ (fig. 1). Durante el último cuarto del siglo XII, trazada por Fruchel, nos encontramos una cabecera con múltiples capillas absidiales que se abrían a la girola. Esta cabecera era prácticamente una fortificación con pequeñas saeteras, sobre las cuales se colocaba el triforio que sería posteriormente desmontando en el siglo XVI.

Fue completada con un forro de sillería sobre el que correría el adarve de la muralla, colocado a mediados del siglo XIII (fig. 2). Durante la segunda mitad del siglo XV se reforzaría esta cabecera dotándola de un triple almenado, con un adarve y volado cuerpo de matacanes al cual se le añade una galería militar en su interior. Apreciamos en la figura 2, la supresión del triforio que suponemos erróneo ya que, según documentación catedralicia, esta supresión corresponde a las reformas realizadas en el siglo XVI (Gutiérrez y Navascués 2004).

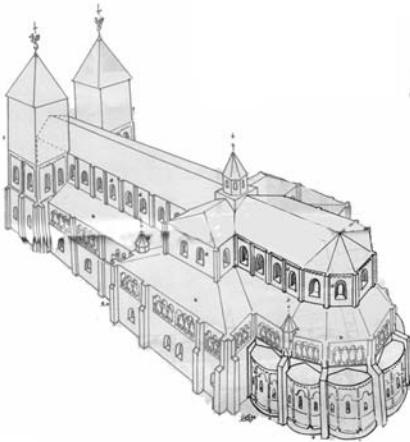


Figura 2
Reconstrucción de la fortificación de la Catedral de Ávila. (Rodríguez Almeida 1975)

Fue en el siglo XVI cuando se desmontó la tribuna existente sobre el deambulatorio para permitir una mejor iluminación de la capilla mayor, siendo preciso reforzar exteriormente la cabecera con nuevos arbotantes en 1520.

HIPÓTESIS SOBRE SU GEOMETRÍA Y PROCESO CONSTRUCTIVO

Hipótesis sobre la planta

La parte más antigua puede fecharse entre 1160 y 1180 y atribuirse al maestro Fruchel. Este proyecto sería una iglesia de tres naves con cuatro tramos, triple crucero y girola sencilla con siete capillas hornacinas. Finalmente el construido pierde en el crucero la nave oriental en beneficio de una mayor profundidad para el altar mayor y el coro, y una girola que alcanza mayor desarrollo y duplica sus naves (fig. 3).

La doble girola actual de la catedral suponemos que no estaba propuesta en el proyecto de Fruchel (Merino 1994). Existe la posibilidad de recurrir a este sistema de doble nave, al encontrarse los constructores con problemas para cubrir unos tramos de gran anchura. La defensa de esta hipótesis se apoya en que se diera alguna de las dos circunstancias siguientes o ambas. En primer lugar si se pretendió disponer una tribuna sobre la nave de la girola, la crujía simple forzaba a un rampante de la bóveda excesivamente alto, que dificultaba tal disposición y por lo tanto era preciso rebajar. En segundo lugar si consideramos que el presbiterio está abierto al girola (cegado más tarde) exigía la colocación de unos soportes de apeo de la fábrica superior de gran ligereza,

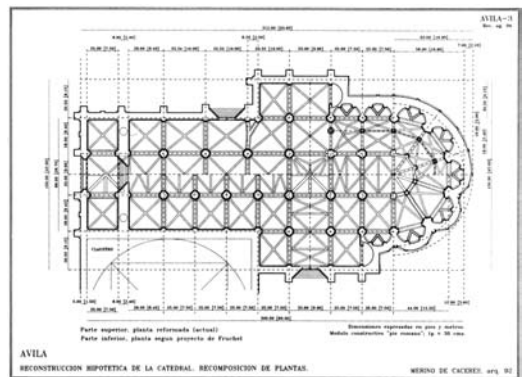


Figura 3
Comparación de plantas según el hipotético proyecto de Fruchel y la actual. (Merino 1994)

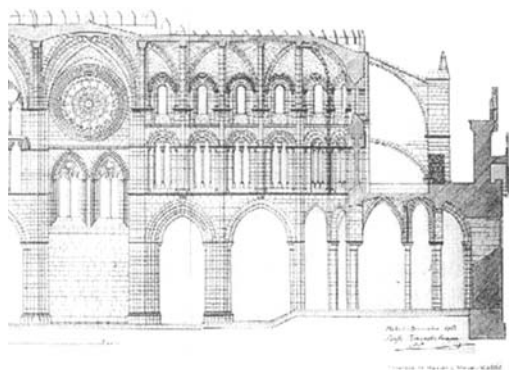


Figura 4
Sección longitudinal por el presbiterio. Dibujo realizado por Anselmo Arenillas Álvarez 1941. A.C.M.E.C.

para conseguir la mayor diafanidad posible, como las columnas monolíticas que nos encontramos.

La bóveda sexpartita que aparece sobre el altar mayor y que va a ser el punto principal de estudio en esta comunicación, tiene que ponerse en relación con la citada y desaparecida tribuna sobre el deambulatorio. Esta bóveda vino a cubrir una nave pensada para cerrarse con bóveda de cañón que fuese continuación del arco toral de medio punto que hoy podemos contemplar. Para realizar este cambio fue preciso alargar las medias columnas entregas que corresponden a los arcos fajones, así como las columnas intermedias (fig. 4). La bóveda se sentó mal sobre los apoyos de la catedral románica porque sus arcos fajones no coinciden con los pilares que tienen continuidad hasta el suelo sino que apoyan sobre la clave de los arcos más bajos. En el estudio de esta transmisión de esfuerzos vamos a central el análisis.

Hipótesis sobre el proceso constructivo

Para la buena ejecución de la obra tenemos que tener en cuenta el proceso de corte y montaje de la piedra, los problemas estáticos durante los diversos momentos de la construcción y la adecuada organización del progreso de la obra.

Lo primero es ejecutar a tamaño natural la traza de la bóveda para tomar los datos necesarios. Para esto se necesita la planta, la proyección horizontal de los

nervios y las elevaciones de cada uno de estos nervios. Son los patrones o directrices de cada nervio. Generalmente este grafiado de la montea se realizaba sobre un entarimado de madera levantado a la altura adecuada no en el arranque, sino donde acaba el jarjamento, para marcar en él la posición de las claves y arcos. Con las cotas convenientes se colocarían en su lugar los elementos, primero las claves que apoyan sus torteras sobre pequeñas zapatas que coronan los pies derechos, y luego los nervios. Este proceso está perfectamente explicado por Rodrigo Gil de Hontañón y recogido en el Compendio de Arquitectura y Simetría de Simón García.

La construcción de una bóveda de crucería requiere la determinación gráfica de los encuentros, es condición inicial la verticalidad de los miembros y que los nervios sean arcos de circunferencia. Se precisa de la cercha para cada nervio, la labra de las piedras y la planta general y las elevaciones de cada nervio para labrar los enjarjamentos y las claves.

Podemos resumir el proceso en los siguientes pasos: 1. Sobre los riñones de la bóveda, un poco por encima del nivel de los arranques, se construye una plataforma. 2. Se dibuja sobre ella la traza completa de los nervios, la montea. 3. Se colocan sobre esta plataforma las cimbras para los nervios y los pies derechos para las claves. 4. Se construyen los nervios. 5. Se construye la plementería entre los nervios.

Hipótesis sobre el andamiaje y los medios auxiliares

Conocemos varias hipótesis para la construcción de bóvedas góticas en relación con sus andamiajes o medios auxiliares. Choisy dibuja en su *Histoire de l'Architecture* una solución con un tablero continuo para el apoyo de la plementería. Fitchen supone que estaría formado por una sucesión de cerchas fijas con largueros arqueados y tirantes, apoyadas no en los nervios sino en las cimbras que sostienen los nervios. Por tanto este andamiaje completo habría de permanecer hasta que hubiera fraguado el mortero. Viollet le Duc propone que una plementería ligera de 10 ó 15 cm se podría ejecutar sólo con el auxilio de cerchas incluso móviles o desplazables como una plantilla. Se trata de dos tablas curvadas que se deslizan una sobre la otra para cambiar la longitud total (Rabasa 2000).

Sobre los andamiajes se sabe muy poco, pero los supuestos que acabamos de comentar sobre el cimbraje de la plementería, no se contradicen con lo que Rodrigo Gil de Hontañón nos ha hecho llegar a través del manuscrito de Simón García (Huerta 2004).

DESCRIPCIÓN Y MODELIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Descripción del presbiterio

Este presbiterio consta de cuatro tramos rectangulares y un ábside semicircular (fig. 5).

En un principio se pensaría disponer sobre los cuatro tramos dos bóvedas sexpartitas, como se muestra en modelo B. Pero el diseño del ábside cambió, para dibujar una nervadura convergente en el centro del semicírculo, disposición radial de los nervios que requería el contrarresto de dos a modo de nervios ojivos que hubieron de ser situados en el primer tramo rectangular contiguo. Es necesario

contrarrestar el empuje de la cabecera que nos muestra en el modelo B. La solución construida, modelo A, soluciona este problema retrasando la bóveda sexpartita un tramo. Siendo así imposible la construcción de dos bóvedas sexpartitas, se realiza una sexpartita y otra cuatripartita. El modelo C nos presenta un esquema erróneo, frecuentemente copiado en muchas ilustraciones desde finales del siglo XIX, en este esquema se presenta una solución simétrica pero que no contrarresta el empuje del punto central del último tramo.

Las bóvedas sexpartitas cargan alternadamente sobre los pilares un nervio o tres, produciendo cargas diferentes en los apoyos (fig. 6).

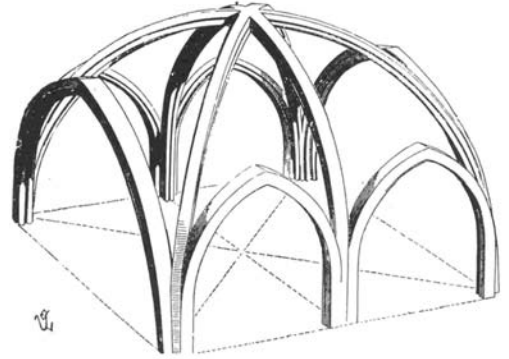


Figura 6

Arcos de la bóveda sexpartita, según Viollet-le-Duc (*Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française du XI au XVI siècle*, 1868)

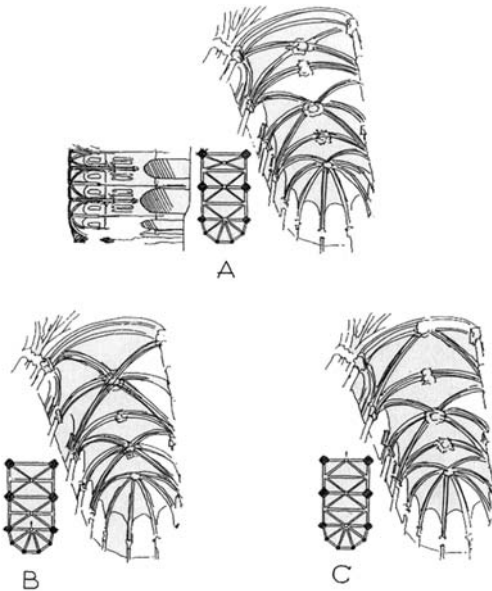


Figura 5

Nervadura del presbiterio de la Catedral de Ávila. A Distribución real. B. Esquema original. C. Esquema erróneamente copiado en ilustraciones a partir del siglo XIX. (Rabasa 2000)

En la cabecera de la catedral de Ávila se muestra una anomalía en la distribución de la carga de la bóveda sexpartita. Los mayores esfuerzos descansan en ménsulas emplazadas sobre las claves de los arcos que las separan de la nave lateral, mientras que los pilares que sólo reciben el perpiño intermedio llegan hasta el suelo, como puede observarse en la figura 4. Por este motivo la sección elegida para este estudio es la correspondiente al arco perpiño intermedio. Siendo consciente de que el arbotante correspondiente a esta sección no es el más penalizado. En la planta se indica la sección a analizar (fig. 7).

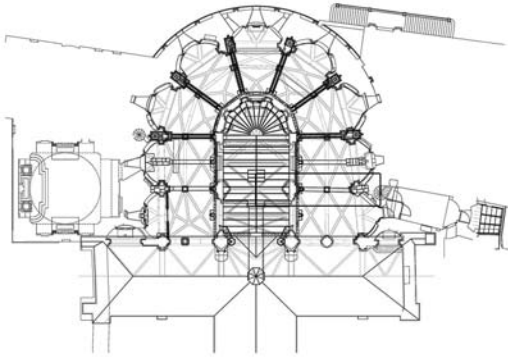


Figura 7
Planta de la cabecera con los arbotantes, señalando la zona de estudio.

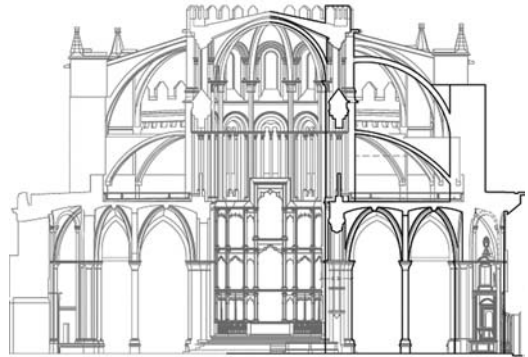


Figura 8
Sección transversal por la girola. Dibujo de elaboración propia a partir del levantamiento citado²

Modelización de la geometría

Esta sección muestra la geometría completa de la zona a estudiar (fig. 8). Como puede observarse no existe una simetría perfecta. Se ha elegido para este estudio la zona derecha, marcada en el dibujo.

Vamos a desarrollar la geometría de la bóveda sexpartita de la nave central y las dos bóvedas de crucería de las naves laterales.

Nave central: bóveda sexpartita

Para realizar el análisis estructural de la sección transversal por la girola, partimos desde la bóveda sexpartita. Calcularemos la carga transmitida a los pilares torales PT I y PT D. Para ello vamos a modelizar la geometría de los arcos que forman la bóveda sexpartita (fig. 9).

Como se muestra en la fotografía, distinguimos los siguientes elementos:

- AS: Arco sexpartito o perpiño intermedio que descarga en los pilares que llegan al suelo
- AP1, AP2: Arcos perpiños paralelos al arco sexpartito
- AC1, AC2: Arco cruceros
- AF1D, AF1I, AF2D, AF2I: Arcos Formeros
- PTI: Pilar principal izquierdo
- PTD: Pilar principal derecho



Figura 9
Bóvedas del presbiterio, señalándose los arcos y pilares para analizar la distribución de cargas

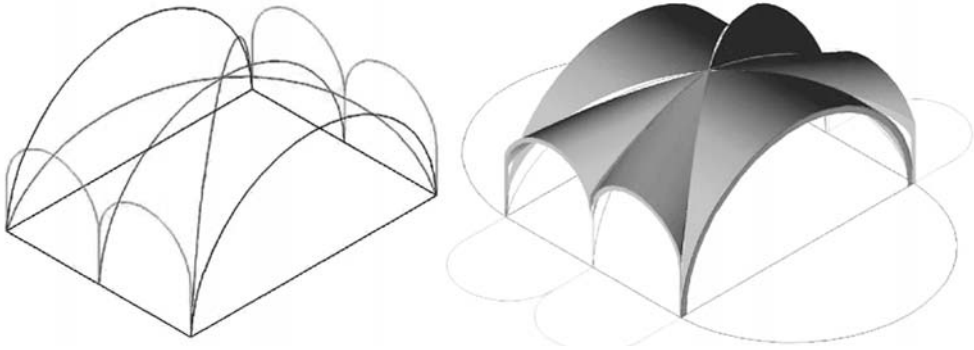


Figura 10
Modelización de la bóveda sexpartita con la plementería y los arcos abatidos

- PL1I, PL2I, PL1D, PL2D: Pilares sobre los que descargan los arcos perpiaños, cruceros y formeros.

Hay que notar que las cargas transmitidas por los arcos perpiaños, formeros y cruceros descansan sobre pilares que no llegan al suelo sino que transmiten la carga a un arco en la zona inferior que a su vez la transmite a los pilares PTI y PTD, ver figura 4.

Podemos imaginar la bóveda sexpartita suponiendo los nervios como líneas y la plementería como la superficie reglada que cierra los espacios entre los nervios (fig. 10).

Con estos datos hemos sacado la geometría de los 4 tipos de arcos que forman la bóveda sexpartita (figs. 11, 12, 13 y 14)

Naves laterales: bóvedas cuatripartitas.

Las bóvedas laterales son cuatripartitas, consideramos los arcos cruceros, formeros y perpiaños, cuya geometría describimos a continuación (fig. 15). Hemos considerado las naves laterales correspondientes al tramo más cercano al crucero.

ACERCA DEL MARCO TEÓRICO

Aplicamos la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica (Herman 1999) Consideramos la estructura formada por un material rígido-unilateral que resiste compresiones pero no tracciones. Suponemos la fábrica como un conjunto de bloques in-

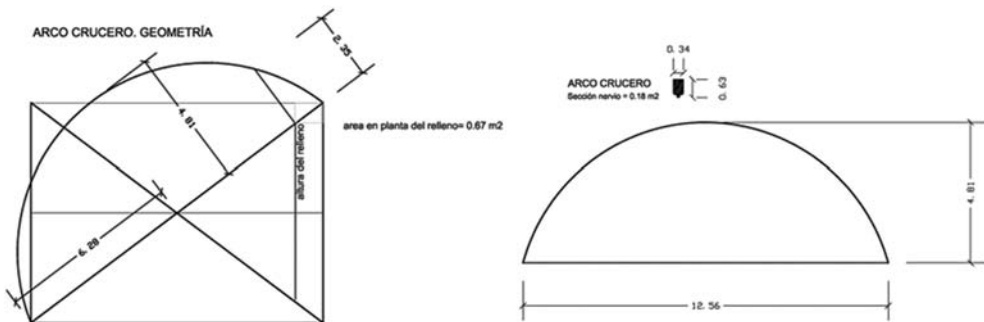


Figura 11
Arco crucero

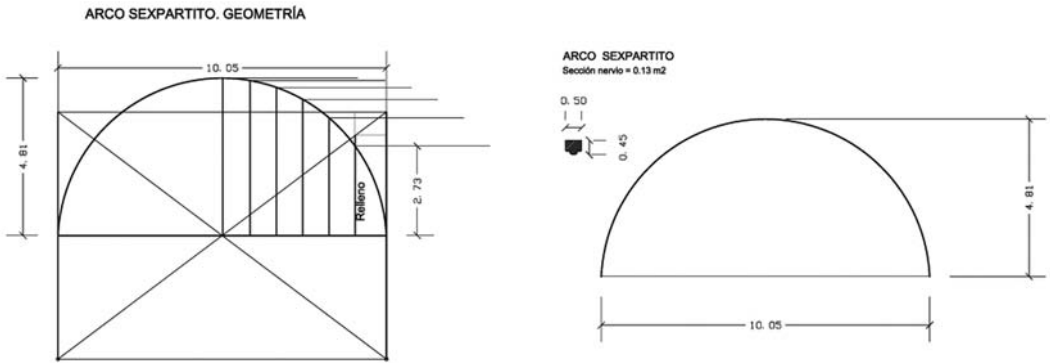


Figura 12
Arco sexpartito o perpiaño intermedio

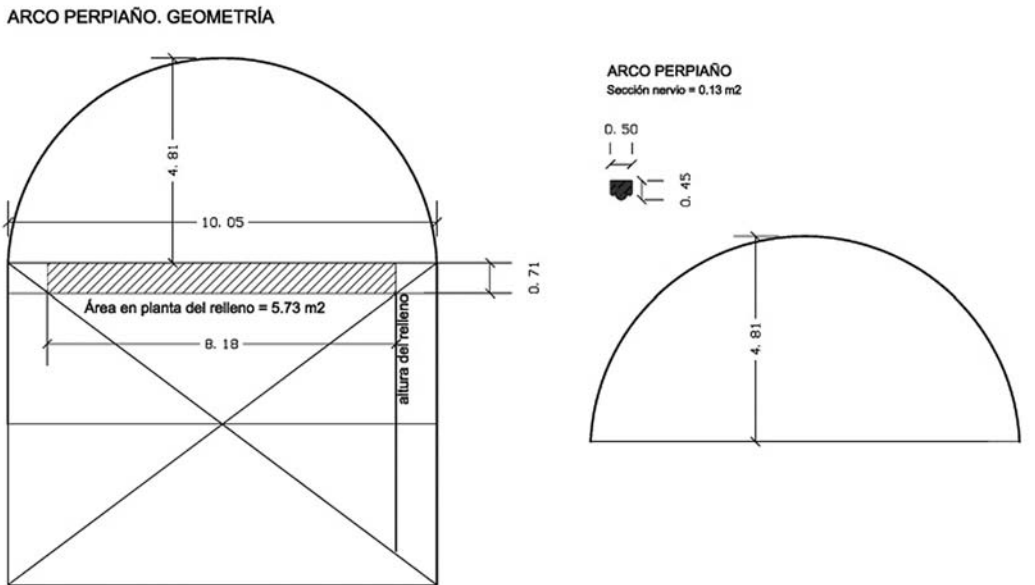


Figura 13
Arco perpiaño

deformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Suponemos tensiones bajas en el material por lo tanto evitamos el problema por fallo de resistencia, para ello nos basamos en los resultados de estudios de resistencia en fábricas reales que aún están en pie. El rozamiento entre las

pedras es suficientemente alto para evitar el deslizamiento.

Aceptamos que el equilibrio de estas estructuras se consigue cuando las líneas de empuje de compresión convergen hacia las zonas centrales de la sección material de un arco, pilar, arbotante o contrafuerte,

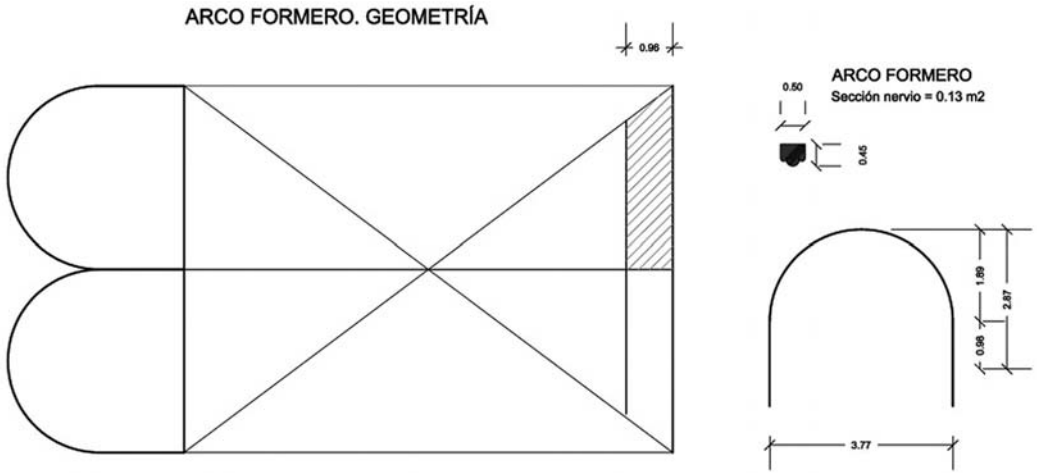


Figura 14
Arco formero

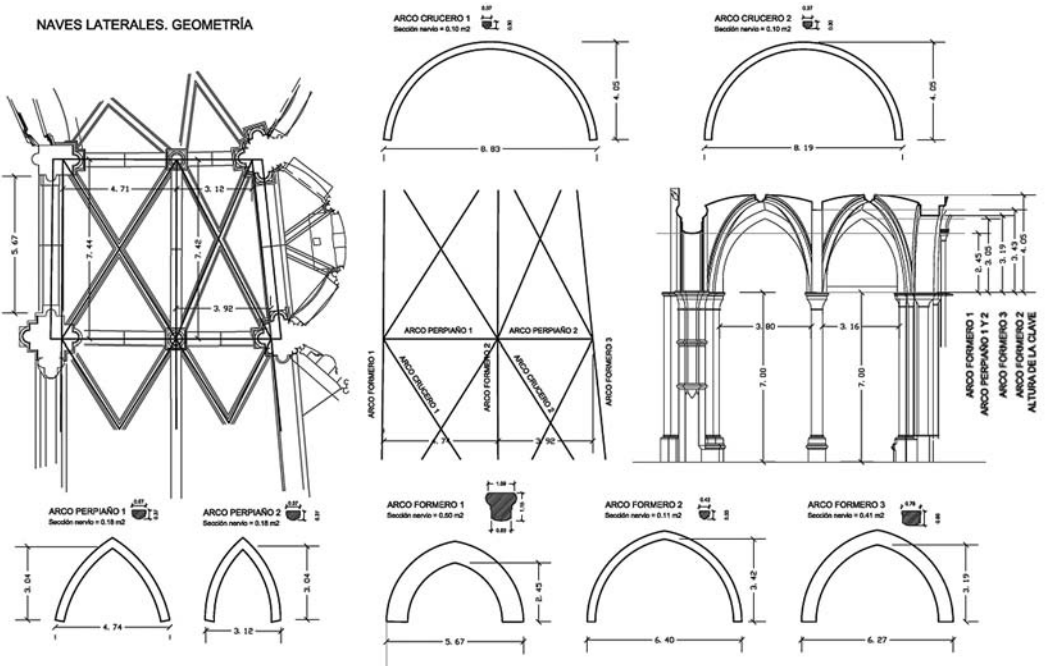


Figura 15
Geometría de las naves laterales

estando contenida dentro de la estructura. Si la estructura es hiperestática, como es lo habitual, es posible encontrar infinitas líneas de empujes que satisfagan las hipótesis anteriores y estén contenidas dentro de la sección. Corresponden a las infinitas soluciones posibles de equilibrio.

El proceso de colapso se produce cuando se forman un número suficiente de rótulas plásticas o articulaciones de agrietamientos en la fábrica, que convierten la estructura en un mecanismo cinemáticamente admisible. A cada configuración de rótulas o articulaciones corresponde una carga de colapso. Tendremos en cuenta: 1 Teorema de la unicidad: establece que la carga de colapso es única. 2 Teorema del límite superior: se ocupa de los estados de colapso y establece que para un cierto mecanismo de colapso la carga de colapso es superior o igual, en el caso de que se ha acertado con el mecanismo correcto, a la carga de colapso real. 3 Teorema del límite inferior: se ocupa de los estados de equilibrio, y establece que si para un cierto valor de carga es posible encontrar un estado de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas que no viole la condición del material, esta carga es inferior a la carga de colapso. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura, la estructura no se hundirá.

Un estado de esfuerzos internos es «estáticamente admisible» cuando está en equilibrio con las cargas que actúan en la estructura; y es además «seguro» cuando en ninguna sección viola la condición de cedencia del material, en una estructura de fábrica aseguraremos que la línea de empujes está contenida dentro del material. Por lo tanto la línea de empujes puede ser libremente elegida y nos llevará a una posible solución de equilibrio. En todo momento estamos buscando una «posible solución de equilibrio» y no «la solución de equilibrio». Elegida una línea de empujes, podemos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa. La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante (empuje) a los bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección.

Concluimos diciendo que el problema de la seguridad de las fábricas es un problema de estabilidad. Siendo tres los criterios fundamentales que debe cumplir una estructura: rigidez, resistencia y estabilidad. Es este último el determinante en el proyecto de

las fábricas, las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas. El criterio de estabilidad conduce a una visión de las fábricas basada principalmente en la geometría, es la forma la que posibilita que las trayectorias de los esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica.

ANÁLISIS DE LA BÓVEDA Y SISTEMA DE CONTRARRESTO

Para realizar el estudio de la sección transversal por la girola hemos seguido los siguientes pasos que desarrollamos a continuación:

- 1º Cálculo del empuje de la bóveda sexpartita, de forma precisa mediante el método de los cortes (Huerta 2004).
- 2º Cálculo del empuje de las naves laterales empleando las tablas de Ungewitter (Heyman 1999).
- 3º Análisis del equilibrio del arbotante, del pilar y del estribo.
- 4º Dibujo de la sección completa, señalando la línea de empujes y calculando su coeficiente de seguridad geométrico para el pilar y para el estribo.

Cálculo del empuje de la bóveda sexpartita

Hemos supuesto los arcos como líneas y la plementería como la superficie que cierra el espacio entre los arcos (ver figura 10).

Para el estudio de los arcos se han realizado los siguientes cálculos:

- A) Cálculo del empuje de la plementería sobre cada uno de los arcos que descansan, a saber, sobre el arco sexpartito o perpiño intermedio. Teniendo en cuenta únicamente el peso de la plementería.
- B) Cálculo del empuje de todos los arcos: cruce-ro, sexpartito, perpiño y formeros, teniendo en cuenta el peso propio.

Sumamos los empujes correspondientes a la plementería y al peso propio en los arcos cruceros y perpiño sexpartito o perpiño intermedio

De este modo conocemos los empujes que actúan en los pilares que soportan la bóveda sexpartita.

A) Cálculo del empuje de la plementería

Analizamos dos sectores que se repiten por simetría: plementería 1 y 2. Dividimos cada sector en 6 zonas, cortando por planos paralelos, cada una de ellas descarga sobre el arco en el que se apoya. La primera zona corresponde al relleno y las siguientes zonas se estudian con detalle a continuación (fig. 16). La zona del relleno consideramos que influye como sobrecarga en los arcos formeros y perpiaños.

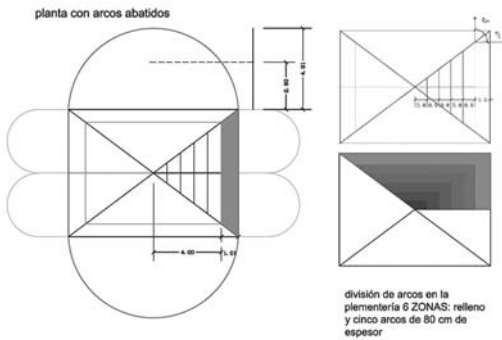


Figura 16
Se muestra el despiece de zonas para el estudio de la plementería.

En la plementería 1 los arcos en que hemos dividido la plementería descansan sobre los arcos cruceros y el perpiaño sexpartito. En el arco perpiaño sexpartito la proyección horizontal del empuje queda equilibrada con la parte simétrica y la proyección vertical descarga sobre el arco sexpartito. En el arco crucero la proyección horizontal se compone con la dirección horizontal procedente de la plementería 2, de modo que sigan la línea del arco crucero y la proyección vertical descansa en el arco crucero.

En la plementería 2 los arcos descansan sobre los arcos cruceros. La proyección vertical del empuje se trasmite a lo largo del arco y la proyección horizontal

se equilibra con la correspondiente de la plementería 1 de modo que siga la línea de proyección del arco crucero.

Tenemos que suponer la altura del relleno entre 1/3 y 1/2 como dicen algunos tratados, puesto que es imposible realizar la medición al no existir en el presbiterio un espacio bajo cubierta, sino que la cubierta de plomo descansa directamente sobre el trasdós de la bóveda. En nuestro caso la altura del relleno de 2,80 m, cuya proyección en planta es 1 m de relleno y 4 m de plementería. El espesor de la plementería es de 30 cm. Dividimos la plementería en 5 arcos mediante cortes de la superficie abovedada por planos paralelos.

Para los arcos de la Plementería 1 calculamos el empuje mínimo de cada uno de los arcos: calculando el peso propio del arco considerando un peso específico de la plementería $\rho = 18 \text{ Kn/m}^3$. Una vez hallado el empuje calculamos la proyección horizontal y la proyectamos sobre el arco crucero en planta. Después calculamos el empuje en la plementería 2 cuya proyección en el crucero equilibra el empuje de la plementería 1. Por último comprobamos que la línea de empujes correspondiente está incluida en la sección del arco.

En la siguiente tabla aparecen los valores de los empujes de cada zona de la plementería (tabla 1).

Tabla 1

Indica el valor de la proyección horizontal en planta, que se iguala para ambos casos, y la proyección vertical correspondiente a la plementería en los arcos en los cuales descansa.

PLEMENTERÍA 1					
	PESO	EMPUJE	PROYEC. EN PLANTA $\alpha = 53^\circ$	VERTICAL DCHO SEXPARTITO	VERTICAL IZDO CRUCERO
ZONA 0	Relleno		$EH1 \cdot \cos 53$		
ZONA 1	16,40	19,77	11,90	10,30	6,10
ZONA 2	8,59	17,85	10,74	5,19	3,40
ZONA 3	7,63	12,81	7,59	5,00	2,83
ZONA 4	4,64	8,23	4,95	3,04	1,60
ZONA 5	1,44	1,19	0,72	0,81	0,63

PLEMENTERÍA 2					
	PESO	EMPUJE	PROYECCION EN PLANTA $\alpha = 37^\circ$	VERTICAL DERECHO CRUCERO	VERTICAL IZDO CRUCERO
ZONA 0	Relleno		$EH2 \cdot \cos 37$		
ZONA 1	16,10	14,90	11,90	16,10	16,10
ZONA 2	11,86	13,45	10,74	11,86	11,86
ZONA 3	8,30	9,50	7,59	8,30	8,30
ZONA 4	4,89	6,20	4,95	4,89	4,89
ZONA 5	1,60	0,90	0,72	1,60	1,60

B) Cálculo del empuje de todos los arcos: crucero (tabla 2), perpiño sexpartito (tabla 3), perpiño (tabla 4) y formero (tabla 5), teniendo en cuenta el peso propio y la influencia de la plementería

Tabla 2
Cálculo del empuje en el arco crucero

ARCO CRUCERO							
ZONAS	Longitud dovela	sección semi/peso específico	PESO PROPIO	PLEMENTERÍA 1	PLEMENTERÍA 2	TOTAL PESO	EMPUJE
Relleno	2,62	2,00	5,24	Área en planta=0,67m ² , Altura=2,35m, Volumen=0,78, Peso Espec 15 Kn/m ³ +11,9		17,04	0
ZONA 1	0,72	2,00	1,44	6,10	16,10	23,64	11,90
ZONA 2	0,82	2,00	1,64	3,40	11,86	16,90	10,74
ZONA 3	0,98	2,00	1,96	2,63	8,30	12,89	7,59
ZONA 4	1,40	2,00	2,8	1,60	4,89	9,29	4,95
ZONA 5	1,90	2,00	3,8	0,63	1,60	6,03	0,72
						85,79	
RESULTANTE		PESO	EMPUJE				
		85,79	13,4				

Tabla 3
Cálculo del empuje en el arco perpiño sexpartito

ARCO SEXPARTITO O PERPIÑO INTERMEDIO							
ZONAS	Longitud dovela	sección semi/peso específico	PESO PROPIO	PLEMENTERÍA 2 LADO DCHO	PLEMENTERÍA 2 LADO IZD	TOTAL PESO	EMPUJE
Relleno	2,94	2,6	7,64	Afecta al arco formero		7,64	0
ZONA 1	1,17	2,6	3,04		10,30	28,24	0
ZONA 2	0,98	2,6	2,55	5,19	5,19	12,93	0
ZONA 3	0,89	2,6	2,31	5,00	5,00	12,31	0
ZONA 4	0,77	2,6	2,00	3,04	3,04	8,08	0
ZONA 5 *peso de la dovela 3 kn	0,93	2,6	2,42	0,81	0,81	9,04	0
						78,25	
RESULTANTE							
		PESO	EMPUJE				
		78,25	37				

Tabla 4
Cálculo del empuje en el arco perpiño

ARCO PERPIÑO							
ZONA 0 DEL RELLENO	Longitud dovela	PESO PROPIO	PESO DEL RELLENO Kn/m	Proyección horizontal dovela	Peso relleno en dovela	TOTAL PESO	EMPUJE
DOVELA 0	2,94	7,64	29,00	0,94	27,26	34,90	0
DOVELA 1	1,17	3,04	29,00	0,79	22,91	25,95	0
DOVELA 2	0,98	2,55	29,00	0,81	23,49	26,04	0
DOVELA 3	0,89	2,31	29,00	0,82	23,78	26,09	0
DOVELA 4	0,77	2,00	29,00	0,75	21,75	23,75	0
DOVELA 5 *peso de la dovela 5 kn	0,93	2,42	29,00	0,93	26,97	29,39	0
						166,13	
RESULTANTE		PESO	EMPUJE				
		166,13	93,6				

Tabla 5
Cálculo del empuje en el arco formero

ARCO FORMERO							
ZONA 0 DEL RELLENO	Longitud dovela	PESO PROPIO* long dovela * peso esp *area dovela	PESO DEL RELLENO Kn/m	Proyección horizontal dovela	Peso relleno en dovela	TOTAL PESO	EMPUJE
							0
DOVELA 1	0,93	2,42	39,30	0,08	3,144	5,56	0
DOVELA 2	0,93	2,42	39,30	0,77	30,261	32,68	0
DOVELA 3	0,93	2,42	39,30	0,77	30,261	32,68	0
DOVELA 4	0,93	2,42	39,30	0,91	35,763	38,18	0
						109,10	

Cálculo del empuje en las naves laterales

En este caso utilizaremos el método abreviado haciendo uso de las tablas de Ungewitter y la geometría anteriormente explicada.

NAVE LATERAL 1

Considerando los siguientes datos de la bóveda:

Altura

$$f = 4,05 \text{ m y luz } s = 4,71. \text{ f/s} = 1/1,2$$

y el material

300 mm de mampostería

Resultados de la tabla:

$$V0 = 15 \text{ Kn/m}^2 \text{ y } H0 = 3,5 \text{ Kn/m}^2$$

un brazo de palanca

$$h/f = 0,8$$

Interpretación de los resultados:

Siendo la superficie de la bóveda

$$S = 26,70 \text{ m}^2 \quad H = 52,5 \text{ Kn y } V = 400 \text{ Kn}$$

Brazo de palanca

$$h/f = 0,8 \quad h = 0,8 * f = 0,8 * 4,05 = 3,24 \text{ m}$$

Situación del centro de gravedad

$$a/h = H/V \quad a = 0,42 \text{ m}$$

NAVE LATERAL 2

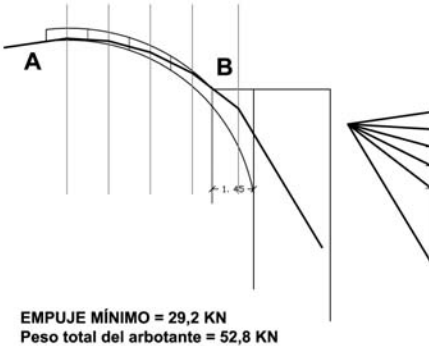
Datos de la bóveda:

Altura

$$f = 4,05 \text{ m}$$

ARBOTANTE SUPERIOR

Línea de empuje pasivo: empuje mínimo

**ARBOTANTE SUPERIOR**

Línea de empuje activo: empuje máximo

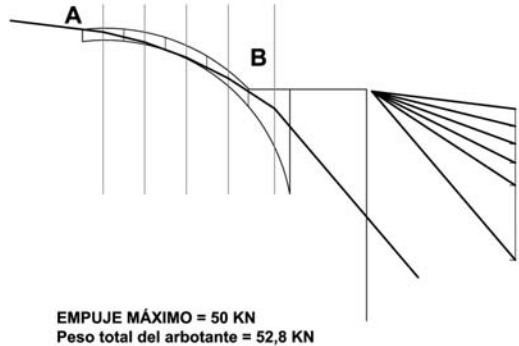


Figura 17

Línea de empujes máximo y mínimo en la parte superior del arbotante.

y luz

$$s = 3,5. f/s = 1/0,8$$

y el material

300 mm de mampostería

Resultados de la tabla:

$$V_0 = 15 \text{ Kn/m}^2 \text{ y } H_0 = 3,7 \text{ Kn/m}^2$$

un brazo de palanca

$$h/f = 0,75$$

Interpretación de los resultados:

Siendo la superficie de la bóveda

$$S = 25,97 \text{ m}^2 \text{ H} = 96,08 \text{ Kn} \text{ y } V = 389,55 \text{ Kn}$$

Brazo de palanca

$$h/f = 0,75 \text{ h} = 0,75 * f = 0,75 * 4,05 = 3,03 \text{ m}$$

Situación del centro de gravedad

$$a/h = H/V \text{ a} = 0,74 \text{ m}$$

Estudio del arbotante

El arbotante estudiado es exclusivamente el que corresponde al nervio perpiño sexpartito de la bóveda sexpartita.

La parte superior del arbotante está situado más bajo que el resto de arbotantes y su geometría es diferente, simplemente es un arco de 60 cm de espesor con un recrecido en la parte final del mismo arco (fig. 17).

El arbotante inferior presenta una geometría distinta que veremos posteriormente cómo influye en su comportamiento estructural. También tiene un recrecido en la parte cercana al contrafuerte fundamental para la transmisión de las cargas (fig. 18).

Análisis del equilibrio global de la sección completa

Observamos que existe una anomalía ya que el pilar más cargado no llega hasta el suelo (fig. 19). Explicamos a continuación una hipótesis de cómo podría realizarse la transmisión de cargas.

Hemos considerado como hipótesis que el arbotante superior tiene un empuje igual al calculado para la bóveda. De este modo calculamos los valores de E3, E6 y E7 (fig. 20)

Teniendo en cuenta lo analizado hasta este punto podemos dibujar una sección completa con la disposición de las cargas (fig. 21)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el pilar el resultado de las fuerzas nos da una componente vertical de 4.808 KN separada del centro del pilar 11 cm. Por esto podemos concluir que la tensión en la base del pilar es de 1,92 N/ mm² siendo la sección del mismo 2,5 m² y que la resultante pasa

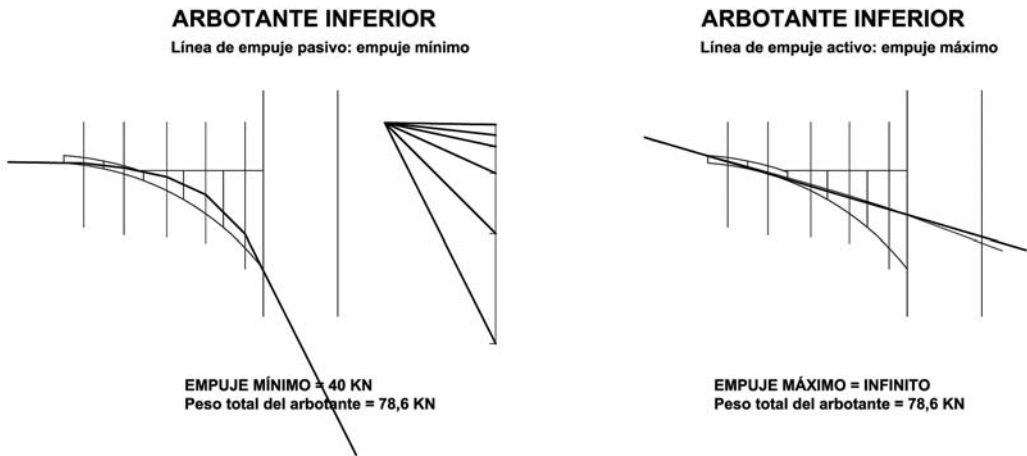


Figura 18
Línea de empujes máximo y mínimo en la parte inferior del arbotante.

DESCARGA DEL PILAR DEL ARCO PERPIAÑO Y CRUCERO EN EL PILAR DE PLANTA BAJA

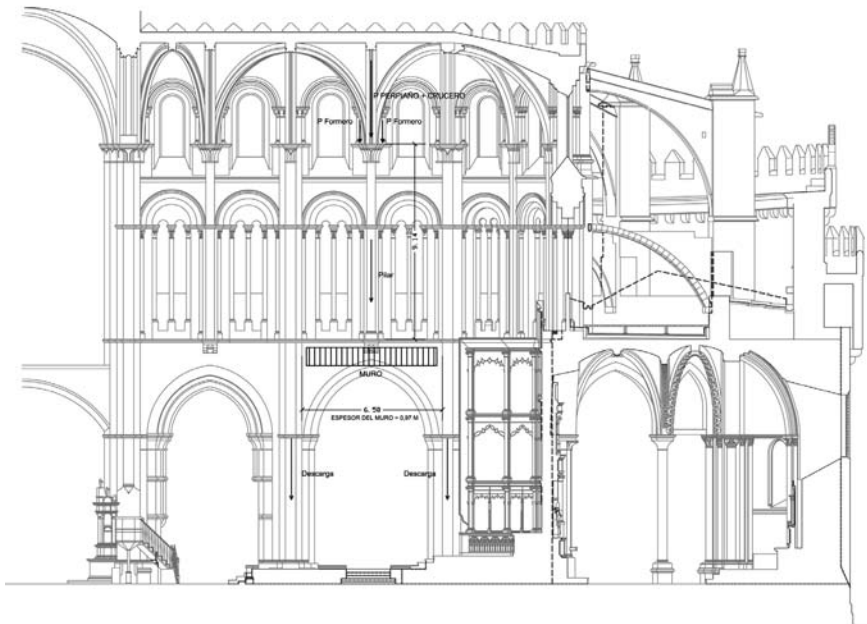


Figura 19
Consideramos la carga correspondiente al arco crucero, al arco perpiaño y al arco formero como carga puntual en el pilar, tenemos en cuenta la carga repartida del peso del muro que apoya en ella y el peso propio del arco y de este modo calculamos el empuje y el peso que debe ser transmitida al pilar que llega al suelo.

HIPÓTESIS:

ESTRIBO SUPERIOR FUERZA HORIZONTAL E2=37 KN, IGUALANDO EL EMPUJE DE LA NAVE CENTRAL PARA QUE EXISTA UN EQUILIBRIO DE FUERZAS LA RESULTANTE VERTICAL ES DE 4808 Kn, SEPARADA DEL PUNTO MEDIO DEL PILAR 11 CM CON UNA FUERZA EN EL EXTRIBO INFERIOR HORIZONTAL DE E3 = 52 KN

CONSIDERANDO LOS EMPUJES E2 Y E3 EN LOS ARBOTANTES SUPERIOR E INFERIOR CALCULAMOS E6 Y E7

E6= componente horizontal = **37 Kn**

componente vertical = **37,4 Kn**

E7= componente horizontal = **51,7 Kn**

componente vertical = **24,1 Kn**

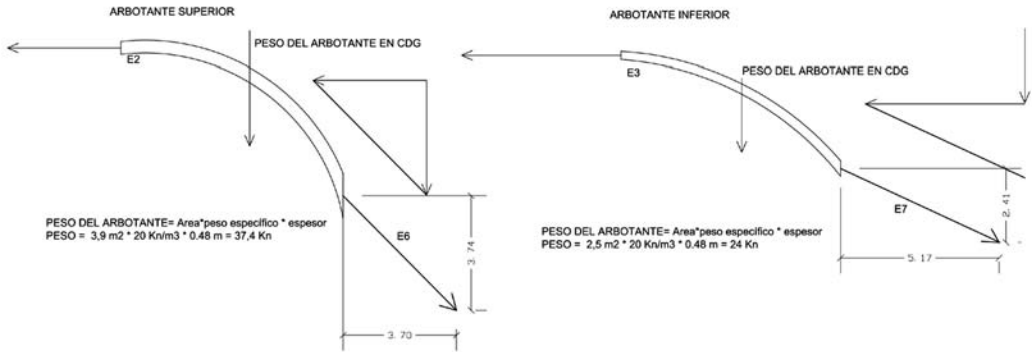


Figura 20
Cálculo gráfico de los empujes del arbotante

dentro del tercio central incluso está incluida en el quinto central del pilar.

En el estribo el resultado de las fuerzas nos da una componente vertical de 2.347 KN separada del centro del pilar 61 cm. Por lo tanto la tensión en la base del contrafuerte es de 0,29 N/ mm² con un área de 8 m² y que la resultante pasa exactamente dentro del tercio central

El iniciarse la planta para una catedral románica y variar el estilo a la hora de realizar sus bóvedas, lleva consigo problemas estructurales y geométricos. La doble girola hace necesario un pilar intermedio. Este pilar fue construido de forma monolítica y funciona estructuralmente bien en las capillas interiores pero presenta problemas de estabilidad en las capillas en contacto con el crucero.

Como hemos visto con detalle la bóveda sexpartita presenta un «mal asiento» en los pilares, transmitiendo la carga mayor a los pilares que no llegan hasta el suelo. De este modo se transmite la carga por medio el arco, en la sección longitudinal. El problema se presenta en el último arco ya que la componente horizontal del empuje está desequilibrada. Es posible que sea este el motivo de la necesidad de

unos arcos «codales» que paliaban el efecto de este empuje.

La diferencia de los arbotantes correspondientes a los primeros tramos y los correspondientes a los tramos interiores de la girola quizás puedan hacer referencia a los distintos empujes. El caso que nosotros hemos analizado corresponde al segundo contrafuerte y hemos comprobado cómo aporta un empuje mayor el arbotante inferior que el superior. ¿Puede ser por este el motivo por el cual los primeros contrafuertes, correspondientes al primer tramo de la girola, sólo tienen arbotante inferior?

Este arbotante no es el más solicitado ya que el correspondiente al tercer contrafuerte deberá absorber la componente horizontal del empuje del nervio crucero y perpiño de la bóveda sexpartita y que será tema de un estudio posterior.

NOTAS

1. La planta reproducida es propiedad del Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales del Ministerio de Cultura. Constituye el más completo y

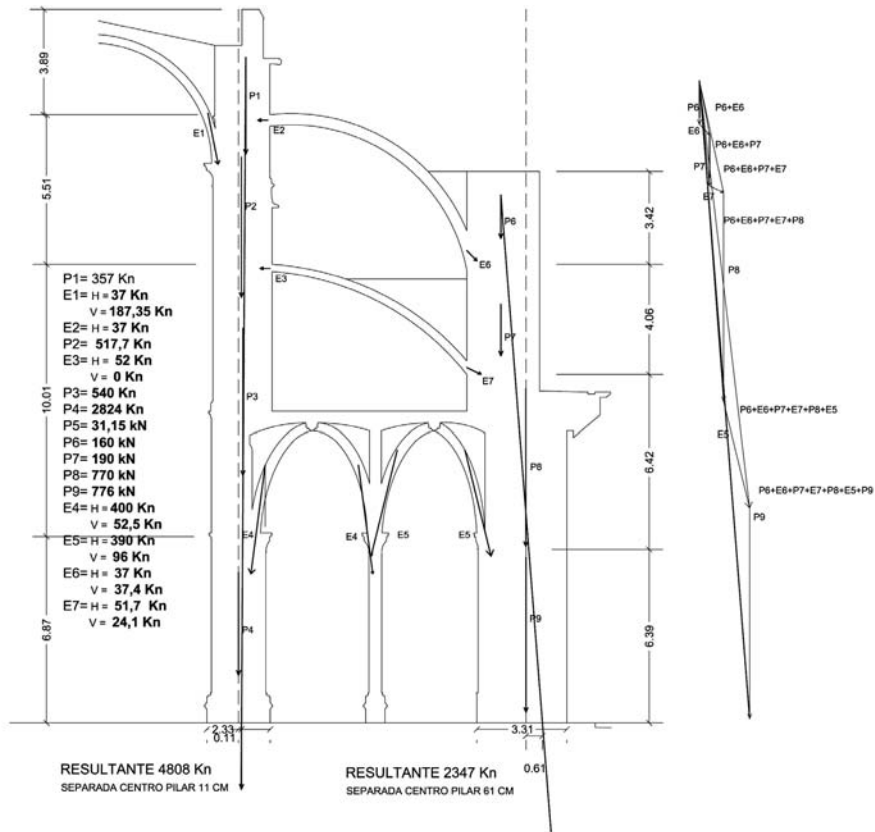


Figura 21
Análisis completo de la sección indicando todas las fuerzas que actúan.

detallado plano de cuantos se han realizado sobre esta catedral. El levantamiento y dibujo fue realizado en 1986 por el equipo de arquitectos formado por: Álvaro Caruana, Marina Álvarez, M^a Asunción Cámara, Adelaida Esteve, Luis Zoísmo G^a Alcaráz y José M. de Cascante, bajo la dirección de José Miguel Merino de Cáceres.

- Levantamiento del Ábside de la Catedral de Ávila, trabajo realizado por Pedro Feduchi y José Coca, depositado en el Archivo de la Dirección General de Patrimonio y Bienes Culturales de la Junta de Castilla y León, año 2000.
- Estos dibujos han sido realizados por Emilio Rodríguez Almeida como hipótesis sobre el proceso constructivo de la cabecera de la Catedral, publicados en *Ensayo sobre la evolución arquitectónica de la catedral de Ávila*, Caja de Ahorros de Ávila, Ávila: 1975

LISTA DE REFERENCIAS

- Ayucar, M. 1982. La catedral-fortaleza. En *Diario de Ávila*, 12 de abril. Ávila.
- Barrios García, Ángel. 1981 *Documentación Medieval de la Catedral de Ávila*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Castro Villalba, Antonio. 1996. *Historia de la Construcción Medieval. Aportaciones*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Feduchi Canosa, P. 1996. Restauraciones en la catedral de Ávila. En *Sacras Moles. Catedrales de Castilla y León. Tempus edax, homo edacior. Vol. 3*, 9–14. Valladolid.
- Gómez Moreno, Manuel. 2002. *Catálogo monumental de Ávila*. Ávila: Institución Gran Duque de Alba.
- Gómez y González de la Buelga, J. 2003. *La epopeya de la piedra: evolución arquitectónica de la basilica cristiana desde Roma hasta la catedral gótica*. Madrid: COAM.

- González, Nicolás. 1981. *La catedral de Ávila*. Ávila: Everest.
- Graciani, Amparo. 2001. *La técnica de la Arquitectura Medieval*. Sevilla: Publicaciones Universidad de Sevilla.
- Gutiérrez Robledo, Jose Luis. 1996. La Catedral de Ávila. En *Sacras Moles. Catedrales de Castilla y León. Aguellas Blancas. Vol. 2*, 15–23. Valladolid.
- Henkel, Otto. 1959. Bóvedas cilíndricas. En *Estática Gráfica*, 168–177. México: Labor S.A.
- Heras Hernández, Felix de las. 1967. *La catedral de Ávila: desarrollo histórico-artístico*. Ávila: Institución Gran Duque de Alba
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica* Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 2001. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 2001. *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Huerta Fernández, Santiago. 1996. La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico, Obra Pública. En *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, n° 38 pp.18–29. Madrid.
- Huerta Fernández, Santiago. 2004. *Arcos, Bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Huerta Fernández, Santiago. 2005. Informe sobre las bóvedas de la Catedral de Tudela. Madrid: Departamento de Estructuras de la Edificación UPM.
- Huerta Fernández, Santiago; López Manzanares, Gema. 1996. Informe sobre la estabilidad de la iglesia de Atán. Madrid: Departamento de Estructuras de la Edificación UPM.
- Martín González, Gerardo Luciano. 2003. El cimorro de la Catedral. En *Diario de Ávila*, 8 diciembre. Ávila.
- Macaulay, David. 1977. *Nacimiento de una catedral*. Barcelona: Timun Mas.
- Merino de Cáceres, José Miguel. 1994. Metrología y simetría en las catedrales de Castilla y León. En *Medievalismo y Neomedievalismo en la arquitectura española: Las catedrales de Castilla y León*. 9–52. Ávila: Fundación Cultural Santa Teresa.
- Navascués Palacios, Pedro. 2004. *La catedral en España: Arquitectura y liturgia*. Barcelona: Lunweg.
- Navascués Palacios, Pedro; Gutiérrez Robledo, José Luís. 2004. *Las Edades del Hombre*. Salamanca: Fundación Las Edades del Hombre.
- Rabasa Díaz, Enrique. 2000. *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la esteorotomía del siglo XIX*. Madrid: Akal.
- Rodríguez Almeida, Emilio. 1975. *Ensayo sobre la evolución arquitectónica de la catedral de Ávila*. Ávila: Caja de Ahorros de Ávila.
- Rodríguez Almeida, Emilio. 2003. La catedral del Conde. En *Revista de la Caja de Ahorros de Ávila n° 5*, pp. 40–43. Avila.
- Torres Balbás, Leopoldo. 1939. Las teorías sobre la arquitectura gótica y las bóvedas de ojiva. En *Las Ciencias. Vol. 4*, 223–233.