

Experimentación estructural de una catedral protogótica

M^a Ángeles Benito Pradillo

La Catedral de Ávila, una de las primeras catedrales góticas en la península, prueba la experimentación estructural de sus constructores. Los cambios de trazas de los diversos maestros, especialmente entre los siglos XII, XIII y XIV, muestran la evolución de una estructura románica hacia soluciones góticas. Esta transición se ha traducido en soluciones estructurales particulares y faltas de uniformidad en los sistemas de contrarresto. Podemos considerar la Catedral de Ávila como un laboratorio de experimentación de los elementos estructurales góticos.

En esta comunicación se analizarán algunas soluciones estructurales atípicas o propias de un gótico incipiente. Estas soluciones que se encuentran en esta catedral se ven reproducidas en otras catedrales, particularmente francesas de principios del gótico.

Enumeramos a continuación los elementos que se estudian, para pasar posteriormente a detallarlos:

1. Colocación atípica del doble arbotante en la zona de la girola, analizando su funcionamiento estructural y comparándola con las soluciones habituales de colocación de los arbotantes.
2. Supresión del arbotante superior en la zona de la cabecera, correspondiente a la sección más cercana al crucero; se analiza la distribución de cargas en esta sección.
3. Colocación de codales de piedra en el interior de las bóvedas de la girola
4. Arcos entibos en el presbiterio, en el crucero y en el cuerpo de las naves, para resolver el des-

equilibrio de empujes tanto en la sección transversal como en la sección longitudinal. Esta solución la encontramos en la Catedral de Tuy, en la antigua de Vitoria y en la de Well. Como en Ávila, estos arcos entibos fueron colocados a posteriori como *reparación estructural*

COLOCACIÓN ATÍPICA DEL DOBLE ARBOTANTE

En la mayoría de los edificios góticos, principalmente en los inicios, se impuso el esquema de arbotantes dobles con un primer arco a la altura de los arranques de las bóvedas y otro a la altura de la cubierta. El arco inferior apoya en un punto más alto que el arranque geométrico de los nervios de la bóveda, el *tas de charge* definido por Viollet-le-Duc, lo que hace que la transmisión de empujes sea correcta. De esta forma el arbotante superior serviría para absorber los empujes producidos por el viento y el inferior los empujes horizontales de la bóveda.

La colocación del doble arbotante en la zona del Cimorro es diferente a las soluciones típicamente góticas. En la cabecera de Ávila ambos arbotantes actúan de forma conjunta para transmitir el empuje de la bóveda al estribo.

Funcionamiento de los arbotantes

La colocación de los arbotantes en la zona de la girola en la Catedral de Ávila es un tanto original. En

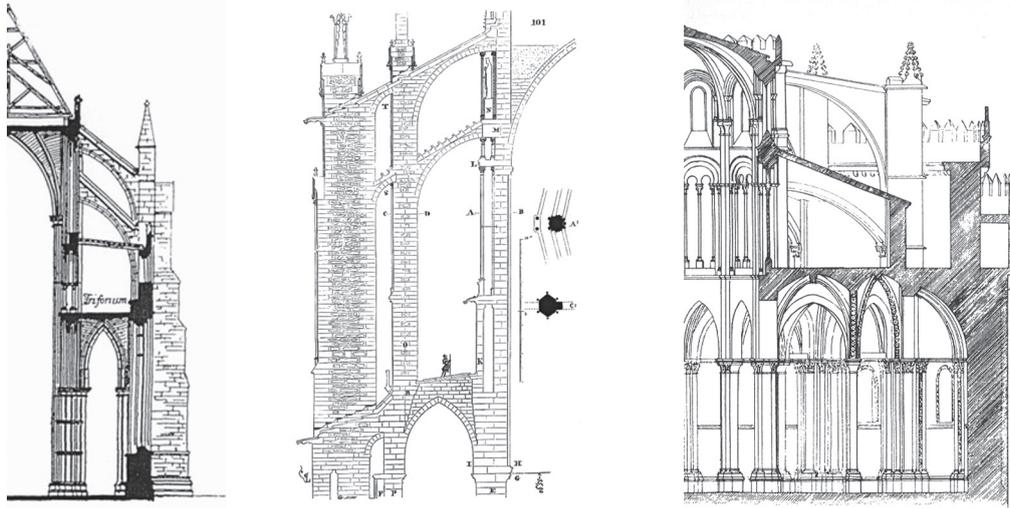


Figura 1

Se observa la diferente colocación del doble arbotante en la Abadía de Westminster (Jackson 1906), en la Catedral de Beauvais (Viollet-le-Duc 1858-68) y en la Catedral de Ávila (Gómez Moreno 1900)

una sección gótica típica se coloca el arbotante superior para recoger el empuje horizontal originado por el viento en la cubierta y el arbotante inferior se coloca a la altura del relleno de la bóveda para recoger su empuje, como se aprecia en la figura 1.

En la sección por la cabecera en la Catedral de Ávila no existe cubierta inclinada y por lo tanto no hay que contrarrestar el empuje producido por el viento en la cubierta. Sin embargo, sí existen dos arbotantes en las secciones 2, 4 y 5 que se analizan en detalle. Se estudia a continuación cuál es su comportamiento en estas secciones. Se calcula el momento producido por los arbotantes y el empuje de la bóveda en el centro de gravedad de la sección del arbotante situada entre el empuje de los dos arbotantes.

Se ha comprobado que el sumatorio de momentos del arbotante superior, arbotante inferior y el empuje de la bóveda central es nulo si se calcula para el centro de gravedad de la sección situada entre los dos puntos de empuje de los arbotantes.

Se puede concluir afirmando que el empuje de los arbotantes superior e inferior se combina como un par de fuerzas para contrarrestar, entre ambos, el empuje de la bóveda del presbiterio. Por lo que se deduce que el doble arbotante no fue colocado en la cabecera de la Cate-

dral de Ávila por necesidades estructurales, sino como elemento característico y diferenciador del estilo gótico.

SUPRESIÓN DEL ARBOTANTE INFERIOR EN LA SECCIÓN 1 DE LA CABECERA

De lo expuesto anteriormente podemos afirmar que es posible una situación de estabilidad con un solo arbotante, esta situación sucede en dos de los arbotantes del Cimorro de la catedral.

En la zona de la cabecera de la catedral existen 12 grupos de arbotantes, de los cuales el 1 y el 12 sólo cuentan con el arbotante inferior. Para facilitar la comprensión de la nomenclatura utilizada y la disposición de los arbotantes en la zona de la cabecera de la Catedral de Ávila se incluye la figura 2. A la primera sección radial de la cabecera corresponden los arbotantes Sur 1 y Norte 12, según la nomenclatura que se ha utilizado. La característica específica de esta sección es la ausencia del arbotante superior, quedando exclusivamente como sistema de transmisión al estribo el arbotante inferior. Se ha medido un desplome del muro exterior de 12 cm en la parte superior del muro, que puede ser debido a la ausencia del arbotante superior.

SECCION 1 Arb S1 N12

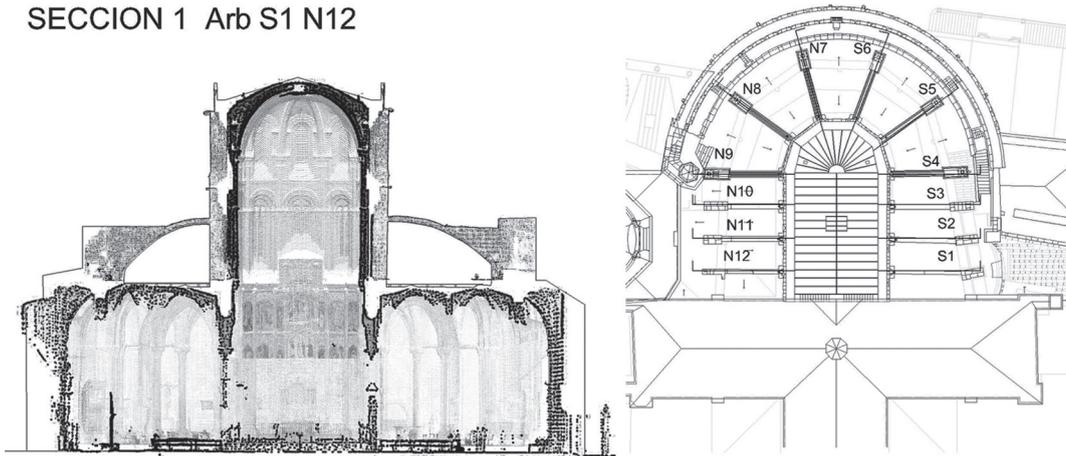


Figura 2
Restitución de la sección 1 interpretando la nube de puntos mediante escáner laser¹ y planta de arbotantes en la cabecera de la Catedral de Ávila. (Benito 2011)

Se estudiarán distintas hipótesis para la transmisión del empuje en el arbotante hacia el estribo. Se estudiará la situación de *línea de empuje mínima*, de

línea de empuje necesaria para centrar la carga en el pilar, de *línea de empuje óptima* y de *línea de empuje de trabajo*, según se muestra a continuación.

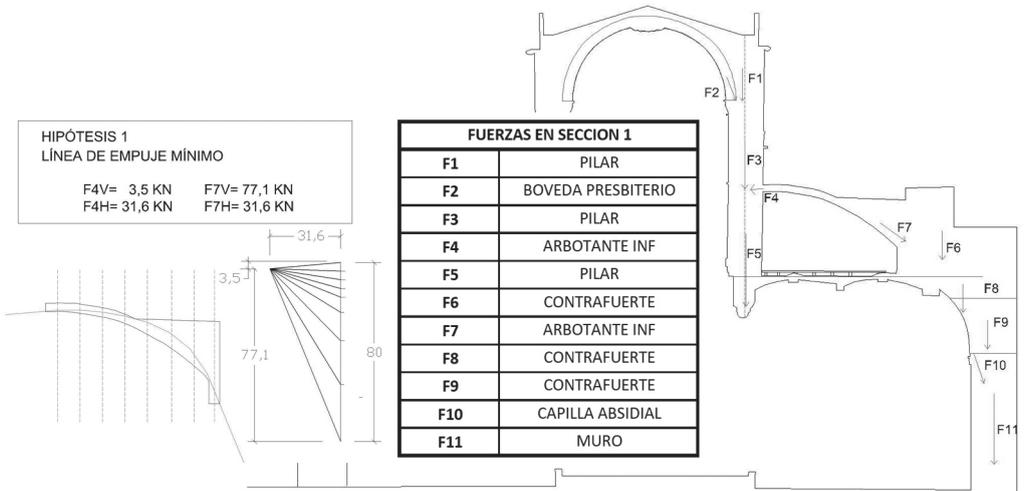


Figura 3
Distribución de fuerzas en la sección y cálculo detallado del empuje mínimo del arbotante. (Benito 2011)

Sección	F [kN]	F normal [kN]	F tangencial [kN]	b [cm]	y [cm]	σ [kp/cm ²]
A "Riñón"	30,6	30,60	0	40,00	16,00	4,78
C	30,71	30,79	2,16	40,00	36,00	2,14
B "Clave"	31,71	31,15	6,1	40,00	4,00	19,47

Tabla 1

Datos correspondientes a las secciones del arbotante considerando una LDE cualquiera con un empuje de 30,6 kN. (Benito 2011)

LDE mínima

Se define como *LDE mínima* aquella que presenta una componente horizontal menor en el punto de transmisión del arbotante al estribo. Es característica de este tipo de LDE una situación comprometida en el intradós del arbotante en los arranques y en el trasdós en el punto medio.

Para todos los cálculos se ha considerado la distribución de fuerzas² según se muestra en la figura 3. Para el caso de empuje mínimo, con un valor de 31,6 kN, se ha comprobado que este empuje es insuficiente para la estabilidad global de la sección, ya que no contrarresta el empuje producido por la bóveda del presbiterio, produciendo una excentricidad de la carga en el pilar.

Lo que nos lleva a concluir que el empuje real del arbotante es mayor al empuje mínimo.

LDE necesaria para centrar la carga en el pilar, LDE de trabajo

Debido a que el empuje mínimo presenta una situación desfavorable para la estabilidad de la sección, se ha realizado otra hipótesis calculando el empuje necesario para centrar la carga en el pilar. En este caso el valor del empuje es 251,20 kN. En adelante se llamará a ésta *LDE de trabajo*.

LDE óptima, más cercana a la directriz del arco

Otra tercera hipótesis sería la *línea de empuje óptima*, que corresponde a la más centrada con la directriz del arco siendo la que produce la mínima deformación del arbotante. Esta LDE se sitúa entre la

LDE máxima y mínima y se busca que pase por los puntos medios de cada sección. Para dibujarla se ha utilizado como perfil del arbotante un arco paralelo al intradós del mismo.

Se pasa a estudiar el estado de tensiones en algunas secciones del arbotante. Como la compresión en cada punto es la composición del empuje y del cortante, ésta va creciendo hacia los arranques. Para conseguir igualar la tensión en todas las secciones es necesario que el alejamiento de la LDE en los extremos del arbotante sea mayor en los arranques que en la clave. Se analiza el equilibrio local en varias secciones del arbotante para una línea de empuje cualquiera. Se ha elegido las dos secciones más comprometidas: la sección A, *riñón*, en la que la LDE pasa más cerca del intradós, y la sección B *clave* y la sección C, correspondiente a un punto intermedio entre la A y la B. Se considera para dibujar la directriz el arco inferior, al ser de mejor cantería, y el relleno irregular se considera para el cálculo de cargas y como geometría del arco por la cual puede pasar la LDE.

La dirección de la fuerza F es la tangente a la LDE en cada sección del arbotante. Esa dirección no será, por lo general, ortogonal a la sección, por lo que debe descomponerse en F_n normal (compresión) y F_t tangencial.

La compresión F_n produce una tensión normal que se reparte en un bloque comprimido. Este bloque comprimido es rectangular, de ancho b igual al espesor del arbotante y la profundidad y es el doble de la distancia entre el borde inmediato y el paso de la LDE por la sección. El cociente $F_n / b \times y$ es la tensión normal media, que deberá ser inferior a la resistencia del material.

Podemos considerar una tensión admisible de la fábrica igual a una décima parte de la resistencia a

Sección	F [KN]	F normal [KN]	F tangencial [KN]	b [cm]	y [cm]	σ [kp/cm ²]
A "Riñón"	40,40	40,40	0	40,00	38,00	2,65
B	42,90	42,30	7,0	40,00	29,00	3,68
C "Clave"	41,32	41,23	2,40	40,00	34,00	3,04

Tabla 2
 Datos correspondientes a las secciones del arbotante considerando la LDE óptima con un empuje de 40,4 kN. (Benito 2011)

compresión del material. Para el arbotante que estamos analizando, granito *gris Ávila*, tiene una resistencia a compresión de 107,93 Kp/cm² que, teniendo en cuenta las juntas y los coeficientes de seguridad, la tensión admisible sería igual a 1/10 de la nominal de la piedra, en este caso $s_{adm} = 10,79$ Kp/cm².

Se dibuja una LDE cualquiera entre la máxima y la mínima, con un empuje de 30,6 kN y se calcula la tensión en las secciones indicadas, obteniendo los siguientes resultados:

Como se observa esta LDE no es óptima ya que en las tres secciones elegidas da unas tensiones muy diferentes, además en la clave necesita una tensión mayor de la tensión máxima admisible.

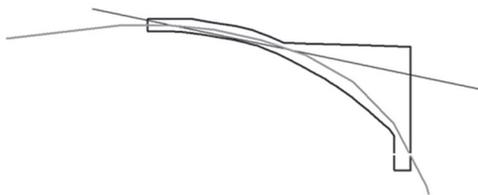
Se halla la LDE óptima cuyos resultados expone-mos a continuación:

A continuación se muestra una comparación entre la *LDE óptima* tanto con la *LDE mínima* como con la *LDE máxima*. Siendo la *línea de empuje mínimo* aquella que más se acerca al trasdós en el punto medio y más vertical es en los extremos. Se calcula también la *línea de empuje máximo*, aquella que se acerca más a una recta y hace el empuje infinito lo cual es posible geoméricamente debido a la forma del arbotante.

Reflexionando sobre estas comparaciones se sacan las siguientes conclusiones:

En la zona del relleno, zona derecha, la LDE mínima es la que más se acerca a la LDE de trabajo, ya

COMPARACIÓN LDE ÓPTIMA Y LDE MÁXIMA



COMPARACIÓN LDE ÓPTIMA Y LDE MÍNIMA



COMPARACIÓN LDE ÓPTIMA Y LDE DE TRABAJO



Figura 4
 Comparación entre la LDE máxima y mínima respecto a la *línea de empuje óptima*. (Benito 2011)



Figura 5
Codales de piedra en la zona de la cabecera para absorber la diferencia de empujes de las dos naves de la girola. (Fotografías del Archivo de la Catedral de Ávila)

que hemos considerado para calcular ésta sólo el arco inferior por su mejor cantería, teniendo en cuenta el relleno exclusivamente como aumento de peso.

La LDE necesaria para la estabilidad de la sección, LDE de trabajo, requiere un mayor empuje del arbotante en la zona derecha para centrar la carga en el estribo. En esta zona del relleno vemos que la LDE de trabajo se separa de la LDE óptima y se acerca más a la LDE máxima; actuando el arbotante como un puntal de piedra.

En la zona izquierda del arbotante, en el encuentro con el muro, la LDE de trabajo es la que más se asemeja a la LDE óptima. La LDE de trabajo no se acerca a los bordes del arco en tantos puntos como la LDE máxima o LDE mínima, lo cual permite que sus secciones estén trabajando a una tensión más homogénea.

En la conexión del arbotante con el muro la LDE máxima y mínima se acerca a los bordes en el punto superior e inferior respectivamente, haciendo las tensiones muy grandes en esos puntos. Aunque el punto en el que se acerca a los bordes la LDE de trabajo está situado en el intradós del arco y separado de los apoyos, situación menos comprometida estructuralmente que las anteriores.

COLOCACIÓN DE CODALES DE PIEDRA EN LAS BÓVEDAS DE LA GIROLA

En la girola existe una diferencia de la luz entre las dos naves que la componen. Además de una modificación de la anchura de la nave exterior siendo progresivamente, alrededor de la girola, más ancha en el lado sur que en el lado norte. Por este motivo se llega a la conclusión de que se comenzó por el lado norte, donde la nave interior es más estrecha que la nave exterior y se va igualando la luz de las naves, hasta llegar a la embocadura de la girola por el lado sur.

Debido a la diferente luz de las bóvedas se producen unos empujes distintos y para absorber esta diferencia se colocan los codales de piedra en las bóvedas de menor luz. Se dejan de colocar cuando las bóvedas tienen luces semejantes, pues se contrarrestan entre ambas. No existen codales de piedra en la primera y segunda capilla del lado sur.

ARCOS ENTIBOS EN EL CRUCERO Y EN EL CORO

Otro elemento atípico en la catedral de Ávila son los arco entibos colocados en el coro y en el crucero,

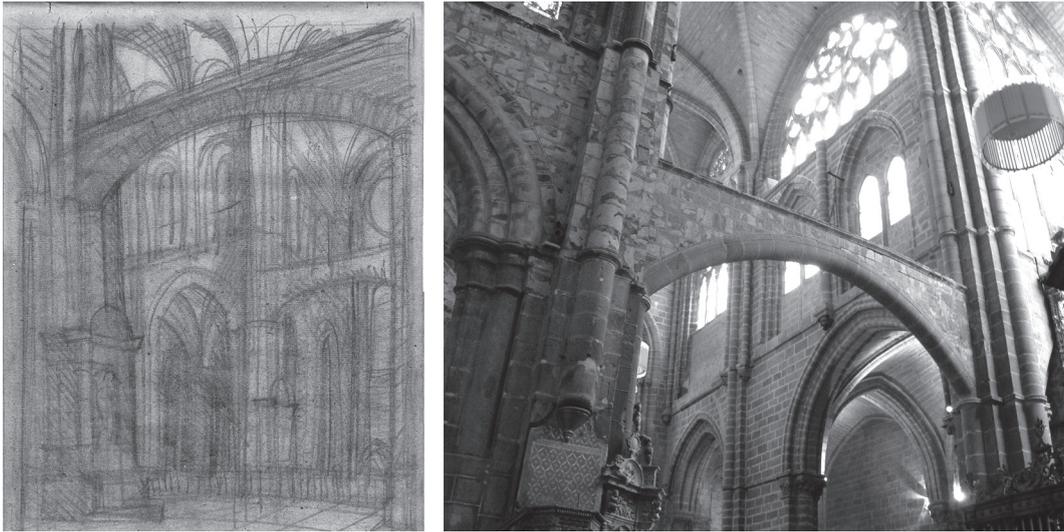


Figura 6
Dibujo del interior de la Catedral, donde destacan los arcos entibos, realizados por Luis Moya, pertenecientes al archivo de la ETSAM. Fotografía, Benito 2011

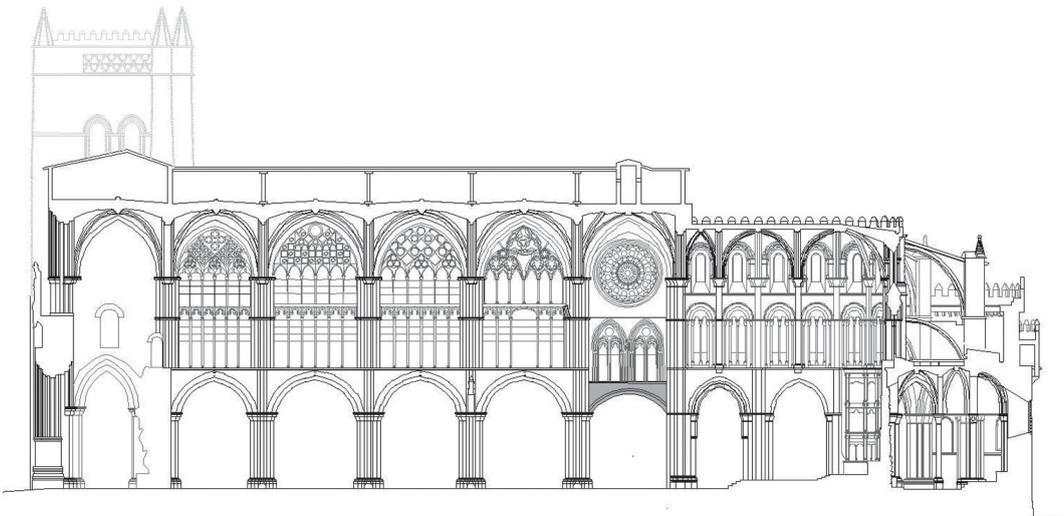


Figura 7
Sección longitudinal de la Catedral, destacando el arco entibo a la altura del crucero que contrarresta los empujes del presbiterio. Dibujo propio sobre plano perteneciente al Plan Director de Pedro Feduchi

tanto en el sentido longitudinal como transversal. Estos arcos resuelven un problema estructural de des-

equilibrio de esfuerzos y de corrección de deformaciones.

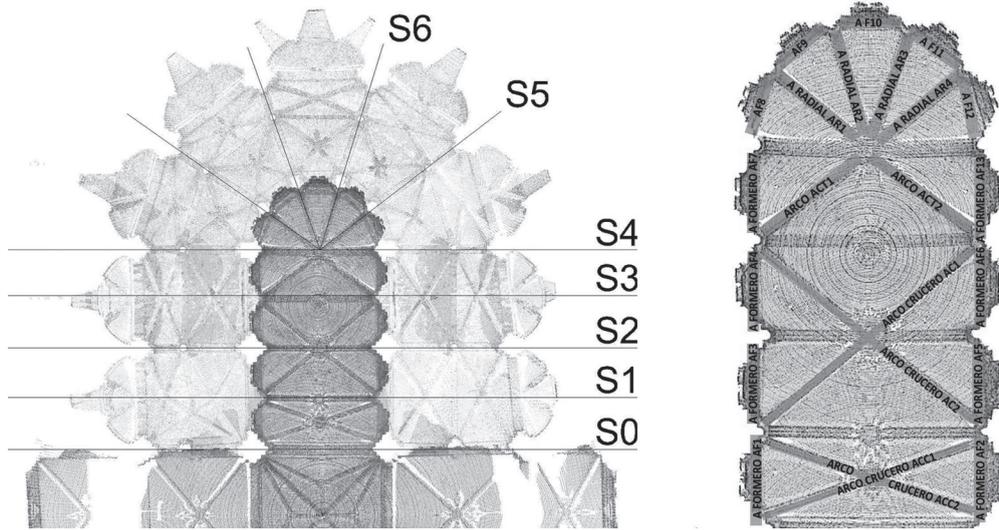


Figura 8
Planta de la girola en la que se indican las secciones a estudiar y planta detallada de la bóveda del presbiterio con la nomenclatura utilizada para los arcos. (Benito 2011)

Los arcos entibos situados en el crucero son uno de los elementos más característicos de esta catedral. Puede ser esa la razón de los numerosos dibujos que nos encontramos de este elemento, siendo el más dibujado después del Címorro. Esto prueba que a los visitantes de la catedral, particularmente arquitectos, este elemento «extraño» les llamaba la atención.

Arco entibo transversal en el crucero

En primer lugar vamos a estudiar los arcos cruceiros que se colocaron en la zona del crucero.

Se analiza el empuje en el sentido longitudinal de la planta, para ver la repercusión de los dos arcos entibos del crucero. En primer lugar se estudia el empuje de los arcos a la altura del presbiterio, los arcos formeros y la componente en esta dirección de los arcos cruceiros y radiales. Se estudia sólo la parte derecha y por simetría se obtienen los datos totales.

Se estudia en cada sección la resultante del empuje en la dirección de la sección longitudinal, a la altura de la bóveda del presbiterio. Considerando positivo el empuje hacia el presbiterio y negativo el empuje

hacia la cabecera. Se presenta a continuación la tabla que sintetiza los cálculos realizados.³

Cabe destacar algunos datos derivados del estudio de la tabla precedente. El empuje a la altura de la bóveda del presbiterio es casi despreciable, no obstante vamos a analizar cada una de las secciones. En la sección 0 el empuje se dirige hacia el crucero siendo muy pequeño y absorbiéndose fácilmente con la componente vertical del peso. En la sección 1 el empuje aumenta en la dirección del presbiterio lo que puede ser la causa del desplome del pilar en cabeza de unos 4 cm. En la sección 2 y 3 el empuje se anula prácticamente. Y en las secciones 3, 4 y 5 el empuje se dirige hacia la cabecera poniendo de relieve la necesidad de los arcos entibos para equilibrar esta zona.

A continuación se analiza el empuje en la dirección longitudinal a la altura de la girola, donde se encuentran situados los arcos entibos. Procediendo en el análisis como en el caso anterior, y utilizando los mismos criterios de símbolos, resumimos los resultados en la siguiente tabla:

A la luz de estos resultados se deduce las siguientes conclusiones. En la sección 0 se produce un gran empuje hacia el crucero que será contrarrestado por el arco entibo que analizaremos a continuación. En la sección 2 se produce un empuje mucho menor tam-

ANÁLISIS DEL EMPUJE EN LA DIRECCIÓN DE LA SECCION LONGITUDINAL EN LA BÓVEDA DEL PRESBITERIO								
SECCION	ARCO	EMP MIN	EMP MAX	PROY. Cos α	Proy E MIN	Proy E MAX		
	AF2	4,40	7,90	0,00	4,40	7,90		
	ACC2	49,60	94,80	72,00	15,33	29,29		
SECCION 0							19,73	37,19
	AF2	-4,40	-7,90	0,00	-4,40	-7,90		
	ACC1	-49,60	-94,80	72,00	-15,33	-29,29		
	AC2	105,88	132,05	50,00	68,06	84,88		
	AF5	6,10	10,14	0,00	6,10	10,14		
SECCION 1							54,43	57,83
	AF5	-6,10	-10,14	0,00	-6,10	-10,14		
	AF6	6,20	9,50	0,00	6,20	9,50		
SECCION 2							0,10	-0,64
	AF6	-6,20	-9,50	0,00	-6,20	-9,50		
	AC1	-105,88	-132,05	50,00	-68,06	-84,88		
	ACT2	142,55	144,01	55,00	81,76	82,60		
	AF13	5,60	9,90	0,00	5,60	9,90		
SECCION 3							13,10	-1,88
	AF13	-5,60	-9,90	0,00	-5,60	-9,90		
	AF12	3,10	6,50	15,00	2,99	6,28		
SECCION 4							-2,61	-3,62
	AF12	-3,10	-6,50	15,00	-2,99	-6,28		
	AR4	-62,20	-74,34	53,00	-37,43	-44,74		
	AF11	3,18	6,65	54,00	1,87	3,91		
SECCION 5							-38,56	-47,11
	AF11	-3,18	-6,65	54,00	-1,87	-3,91		
	AR3	-60,06	-78,63	18,00	-57,12	-74,78		
SECCION 6							-58,99	-78,69

Tabla 3 Resultado del análisis del empuje hacia el arco crucero a la altura de la bóveda del presbiterio. (Benito 2011)

bién hacia el crucero; esto es debido al equilibrio de los dos arcos formeros AF11 y AF21. Sin embargo en la sección 4 encontramos un empuje que duplica el valor anterior en la dirección hacia la cabecera, esto es debido al empuje del arco formero AF21, que no es contrarrestado suficientemente. En las secciones 5 y 6 el empuje es muy pequeño.

Finalmente se va a analizar el arco entibo. Se considera el peso propio del arco y el empuje que tiene que contrarrestar de 661,58 kN. Con estos datos se dibuja una LDE dentro del arco que pueda ejercer el empuje necesario para contrarrestar el presbiterio.

Se observa cómo la LDE puede adoptar desde un valor de empuje mínimo de 60,10 hasta el valor límite de resistencia del material, teóricamente infinito, por la geometría del arco. Esto es debido a la parte horizontal del trasdós del arco, la cual permite actual como un puntal horizontal.

Según fuentes históricas fueron colocados en el s. XVI y XVII en la zona del crucero y del coro, a la altura de los primeros estribos de la nave.

Después de haberlos analizado se concluye que son estructuralmente necesarios para contrarrestar el empuje proveniente de la cabecera y la causa del desplome de los pilares el haberlos colocado en el s. XV, un siglo más tarde de terminarse la cabecera.

EMPUJE EN LA DIRECCIÓN DE LA SECCION LONGITUDINAL EN LA GIROLA								
SECCION	ARCO	GIROLA				EMPUJE TOTAL		
		EMP MIN	EMP MAX	PROY. Cos	Proy E MIN	Proy E MAX	EMP MIN	EMP MAX
	AF11	620,29	620,29	0,00	620,29	620,29		
	AC11	49,14	49,14	33,00	41,21	41,21		
SECCION 0							661,50	661,50
	AF11	-620,29	-620,29	0,00	-620,29	-620,29		
	AC11	-49,14	-49,14	33,00	-41,21	-41,21		
	AC21	50,92	53,60	33,00	42,71	44,95		
	AF21	710,51	710,51	0,00	710,51	710,51		
SECCION 2							91,71	93,96
	AF21	-186,52	-186,52	0,00	-186,52	-186,52		
	AC21	-50,92	-53,60	33,00	-42,71	-44,95		
	AC31	24,99	28,96	35,00	20,47	23,72		
	AF31	7,47	10,38	27,00	6,66	9,25		
SECCION 4							-202,10	-198,50
	AF31	-7,47	-10,38	27,00	-6,66	-9,25		
	AC31	-24,99	-28,96	68,00	-9,36	-10,85		
	AP41	4,42	8,47	53,00	2,66	5,10		
	AC41	24,99	28,96	2,00	24,97	28,94		
	AF41	4,42	8,47	48,00	2,96	5,67		
SECCION 5							14,58	19,61
	AF41	-4,42	-8,47	48,00	-2,96	-5,67		
	AC41	24,99	28,96	75,00	6,47	7,50		
	AP51	8,89	11,17	18,00	8,45	10,62		
	AC51	24,99	28,96	38,00	19,69	22,82		
SECCION 6							28,15	33,44

Tabla 4 Resultado del análisis del empuje hacia el arco crucero a la altura de la girola. (Benito 2011)

Arco entibo en el coro

El arco entibo situado en el cuerpo de naves a la altura del coro sabemos que fue colocado en 1961, según

ARCO ENTIBO DEL CRUCERO	
PESO=	102,07 KN
EMPUJE MÍNIMO=	60,10 KN
EMPUJE NECESARIO =	661,58 KN

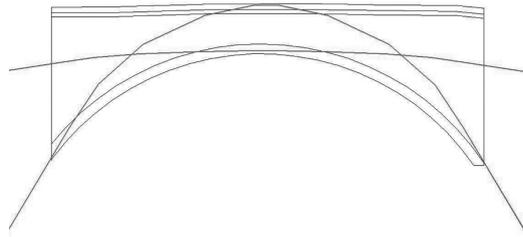


Figura 9 Comparación entre la LDE con empuje mínimo y las LDE con el empuje necesario para contrarrestar el empuje del presbiterio. (Benito 2011)

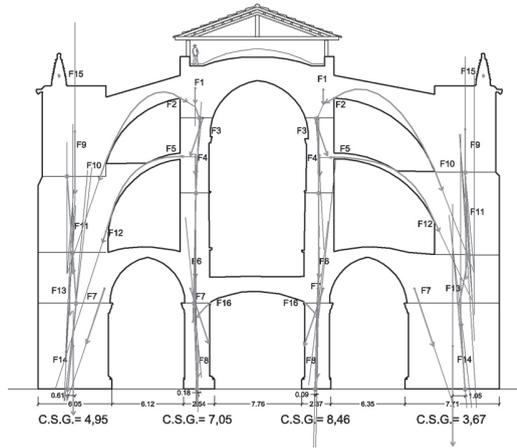


Figura 10
Representación de las fuerzas y LDE en la situación correspondiente al siglo XVII tras haber colocado el arco entibo, considerando el empuje mínimos. Se ha dibujado para la bóveda central y los pilares la geometría con las deformaciones que existen actualmente. (Benito 2011)

Acta Capitular. En esta comunicación se estudia la función del arco entibo en la situación actual. La hipótesis propuesta en la zona del Cuerpo de las Naves contempla tres etapas para su construcción: siglo XIII, siglo XIV y siglo XVII.⁴

Este arco es necesario para evitar el desplome de los pilares hacia el interior en su parte inferior. Actualmente los pilares hasta la altura de las naves laterales, no presentan deformación y de esa altura hacia arriba están desplomados hacia el exterior. Se considera que eso puede ser debido a que estuviera algún tiempo sin contrarresto, como planteamos en la hipótesis de las campañas constructivas. (Benito 2011)

La colocación del arco entibo en 1691 ayuda a central la carga en la base de los pilares pero no corrige desplomes en los pilares. El desplome de los pilares hacia el interior que se observa a la altura del arco, es un efecto óptico. Por lo tanto la colocación de este arco mejora la situación estructural centrando la carga pero no disminuye las deformaciones ya producidas.

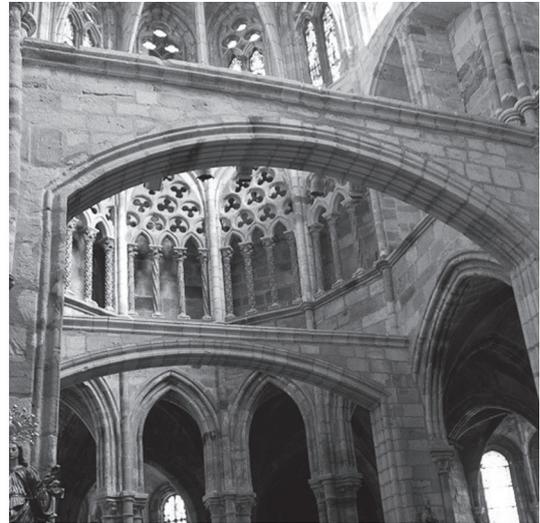
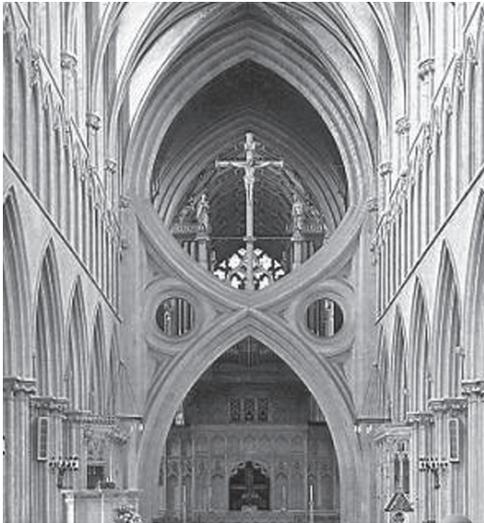


Figura 11
Figura izquierda: Arcos de tijera para refuerzo, necesarios por el peso de la torre sobre el cruce en la Catedral de Wells.
Figura derecha: Arcos entibos colocados en la cabecera de la Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción en Castro Urdiales. (Benito 2011)

Se encuentra un paralelismo entre los arcos entibos en la Catedral de Ávila y los arcos entibos en la Iglesia de Castro Urdiales. Esta iglesia pertenece también al primer gótico y su estructura tiene relación con el gótico francés de la región normanda. Tiene arcos entibos en todos los tramos de la nave central.

También encontramos soluciones similares de arcos entibos en la Catedral de Tuy, en la cabecera de la Catedral antigua de Vitoria y en la Catedral de Wells. Como en Ávila estos edificios protogóticos utilizaron el sistema de los arcos entibos como elemento de reparación estructural a posteriori.

CONCLUSIÓN

La Catedral de Ávila, una de las primeras catedrales góticas en la península, prueba la experimentación estructural de sus constructores. Se han expuesto detalladamente algunas soluciones estructurales atípicas o propias de un gótico incipiente como «ensayos estructurales».

Por lo que se puede concluir que la Catedral de Ávila fue un *laboratorio de experimentación* de los elementos estructurales góticos.

NOTAS

1. Levantamiento perteneciente a un proyecto de Investigación financiado por la Universidad Católica de Ávila. 2009-2011. Título del proyecto Análisis de técnicas métricas de modelado 3d: Aplicación a la reconstrucción virtual del Cimorro de la Catedral de Ávila. Miembros del equipo investigador: Dra. Carmen Madrid de la Fuente; Dra. M^a Ángeles Benito Pradillo, Dña. Soraya Andaluz Delgado; Dr. José Julio Zancajo Jimeno y Dra. Teresa Mostaza Pérez.
2. Se pueden consultar los datos de cálculo con detalle en anexo de cálculo de la tesis doctoral: *Evolución constructiva y Análisis estructural de la Catedral de Ávila* Tesis. E. T. S. de Arquitectura Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
3. Se pueden consultar los datos de cálculo con detalle en capítulo 4.2.4. *Análisis de equilibrio en la sección longitudinal* de la tesis doctoral: *Evolución constructiva y Análisis estructural de la Catedral de Ávila* Tesis. E. T. S. de Arquitectura Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

4. Se puede consultar en detalle la hipótesis del proceso constructivo de colocación de este arco entibo en Benito 2011.

LISTA DE REFERENCIAS

- Ávila Jalvo, José Miguel y Miguel Ávila Nieto. 2010. *Arquitectura de Ladrillo*. Madrid: Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. ETSAM.
- Benito, M.A. 2011. *Evolución constructiva y Análisis estructural de la Catedral de Ávila*. Tesis. E. T. S. de Arquitectura Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, inédita.
- Benito, M.A. 2011. «Análisis del Sistema de contrarresto de las bóvedas en el Cuerpo de las Naves de la Catedral de Ávila, en las diferentes campañas constructivas: siglo XIII, XIV y XVII». En *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Ed. Instituto Juan de Herrera, pp.123-131.
- Erlande-Brandenburg, Alain. 1995. *The cathedral Builders of the Middle Ages*. London: Thames and Huson.
- Escribá Pallarés, Félix. Pérez Valcárcel, Juan. 2004. *La modernidad del gótico: seis puntos de vista sobre la arquitectura medieval*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Fitchen, J. 1961. *The construction of gothic cathedrals. A study of medieval vault erection*. Oxford: University of Chicago Press.
- Frank, Paul. 2002. *Arquitectura Gótica*. Madrid: Cátedra.
- Gómez Moreno, M. 2007. *Catálogo monumental de Ávila Tomo 1*. 3 ed Ávila: Institución Gran Duque de Alba.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, J. 2001. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Huerta Fernández, S. 2004. *Arcos, Bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Lambert, Elie. 1977. *El arte Gótico en España en los siglos S XII y XIII*. Madrid: Cátedra.
- Simson, Otto Von. 1980. *La catedral gótica: los orígenes de la arquitectura gótica y el concepto medieval de orden*. Madrid: Alianza Editorial.
- Street George Edmund. 1926. *La arquitectura gótica en España*. Madrid: Saturnino Calleja.
- Torres Balbás. Leopoldo. 1952. *Arquitectura gótica*. Madrid: Plus-Ultra.
- Watson, Percy. 1990. *La construcción de las catedrales medievales*. Traducido por Rafael Lasalletta Cano. Madrid: Akal.

