

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

Javier León González
Francesco Russo



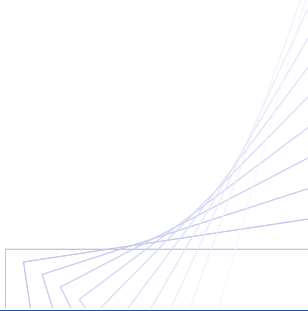
RESUMEN

La Catedral de León representa un ejemplo arquetípico del diseño gótico francés en España, con similitudes geométricas y estructurales evidentes con catedrales como Amiens y Reims. Es también un ejemplo fundamental para conocer y valorar la arquitectura gótica española y europea del siglo XIII, para constatar la presencia de las distintas etapas arquitectónicas históricas plasmadas en sus formas y en su estructura, relativamente evidente, lo que ha permitido realizar un divertido estudio comparativo, por medio de ratios geométricos, de esta catedral con un conjunto suficiente de ejemplos equivalentes en España y el resto de Europa. En el presente ensayo se puede observar también el diferente desarrollo del gótico en Europa a partir del origen genuinamente francés de esta innovadora tipología estructural.

1. INTRODUCCIÓN. CARACTERÍSTICAS DEL GÓTICO EN EUROPA

Durante la primera mitad del s. XIII, a través del Camino de Santiago, se introduce en España, especialmente en Castilla y León, el gótico francés, desarrollado genialmente en la Isla de Francia un siglo antes. El 'estilo', que es un término comprensivo de concepción arquitectónica de un espacio al servicio de un ideal espiritual y mundano, de idea de funcionamiento estructural y de tecnología constructiva, brota en España de manera deslumbrante en las catedrales de Burgos y de León, así como en la nave mayor de la Catedral de Cuenca.

Parámetros geométrico-resistentes
de la Catedral de León en
comparación con otras
catedrales góticas



Con la Catedral de Toledo empiezan los primeros signos de la españolización del gótico francés con gradual disminución de la esbeltez y mayor horizontalidad de la estructura. Las catedrales de Segovia y de Sevilla son algunos de los ejemplos del gótico tardío español antes del periodo de metamorfosis de la arquitectura ojival hacia un plateresco genuinamente hispánico (Catedral Nueva de Salamanca).

Las catedrales catalanas son más sobrias que las castellanas y se caracterizan por no seguir los modelos del gótico francés en cuanto los muros laterales se prolongan más allá de la vertical de las naves laterales, llegando hasta el trasdós de los estribos y ganando un espacio en forma de capillas.

Tampoco en el alzado el gótico de la Corona de Aragón sigue los modelos franceses, en cuanto las naves laterales suelen tener altura igual o poco inferior a la nave central y tienen poderosos contrafuertes, lo que hace casi innecesarios los arbotantes (catedrales de Barcelona y de Palma de Mallorca).

El gótico alemán hereda del gótico francés la atrevida verticalidad de la fachada, pero sobrepasa a sus vecinos en las soberbias torres que están entre las más altas del mundo (catedrales de Colonia y de Ulm). La estructura de la Catedral de Bruselas tiene muchas analogías con las catedrales francesas (Nôtre Dame de París), evidente en la disposición de los arbotantes, botareles y bóvedas. El gótico inglés no comparte la atrevida esbeltez del gótico francés, manteniendo una cierta horizontalidad (catedrales de Canterbury y de Lincoln) y además en planta tiene dos cruceros y bóvedas estrelladas o en abanico.

El gótico italiano tiene características que se diferencian notablemente del resto del gótico europeo. No se percibe aquí la fuerte esbeltez, el vaciado mural de las catedrales francesas, prefiriendo mantener la tradición constructiva consolidada en los siglos precedentes como la tradición románica influenciada de los modelos bizantinos, paleocristianos y clásicos. La reducida verticalidad de la arquitectura ojival italiana puede estar motivada, tal vez, por cuestiones prácticas, como en España: el clima habría creado “efecto invernadero”: la atrevida verticalidad habría vaciado demasiado los muros con consecuente excesiva entrada de luz solar en los meses de verano arruinando las obras pictóricas, y por eso el estilo ojival se aplicó más en las decoraciones que en las estructuras creando un compromiso entre el románico y el gótico.

Parámetros geométrico-resistentes
de la Catedral de León en
comparación con otras
catedrales góticas

Lo anterior refleja una idea europea relativamente común, pero diversa, que se desarrolla en las cinco naciones principales, en palabras de los clásicos: Francia, España, Gran Bretaña, Alemania e Italia. No es extraño que los padres del euro se fijaran en el gótico como elemento común, vertebrador de la idea de Europa. La construcción del Duomo de Milán representa un ejemplo de cosmopolitismo europeo en torno a la arquitectura y a la estructura góticas, fruto famoso del cual es la conocida frase de Jean Mignot 'ars sine scientia nihil est', evocadora de un más que deseable encuentro de ingenieros y arquitectos, como los autores de esta ponencia.



Figura 2. Ejemplo de algunas catedrales europeas: a) Catedral de León; b) Catedral de Notre Dame de París; c) Duomo de Milán

2. PARÁMETROS REPRESENTATIVOS

Para valorar la arquitectura ojival de la Catedral de León en el contexto del gótico europeo, se hace un análisis comparativo las principales catedrales góticas europeas destacándose las analogías y las diferencias estructurales a través de parámetros dimensionales y de las relaciones proporcionales entre los mismos, como altura nave central, diámetro de las pilas, luz de la nave central, luz de la nave lateral, canto de botarel, altura de botarel, etc.

En este ensayo se han seleccionado 42 catedrales góticas de varios países europeos: España, Francia, Italia, Alemania, Austria, Inglaterra y Bélgica evidenciando los valores máximos y mínimos de las relaciones de los elementos estructurales y las medias por países.

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

Los parámetros geométricos representativos sirven para comprobar también el diferente desarrollo del gótico en Europa a partir del lugar de origen, Francia, a través de los resultados cruzados de sus parámetros geométrico-estructurales más importantes. Así, se puede analizar el grado de esbeltez de la estructura de la catedral leonesa y las características góticas peculiares de cada zona geográfica o país europeo.

Número de naves del brazo largo:	③
Número de crujas del brazo largo:	⑥
Número de naves del brazo corto:	③
Número de crujas del brazo corto:	③
Número de naves de la cabecera:	③
Número de crujas de la cabecera:	④
Número de lados del ábside:	⑦

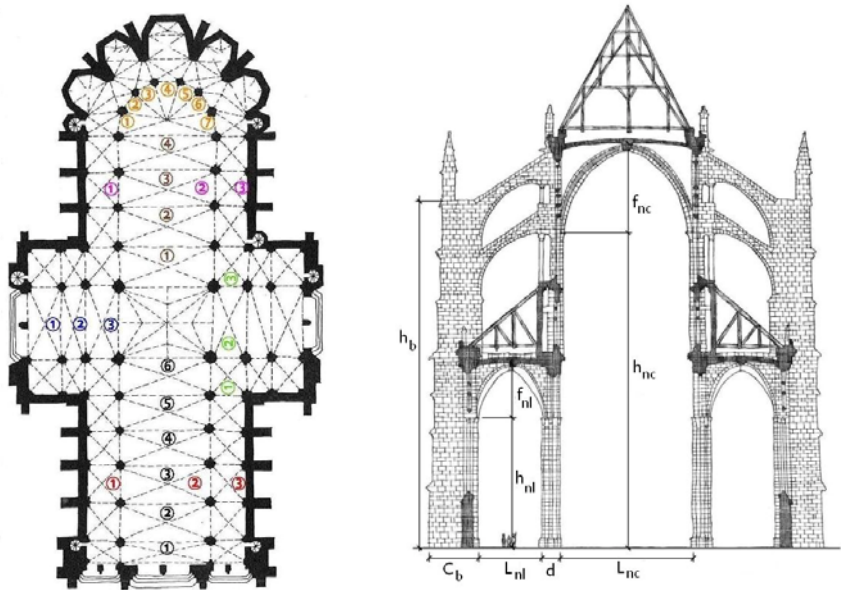


Figura 3. Planta y sección transversal modelo con identificación tipo de los parámetros analizados.

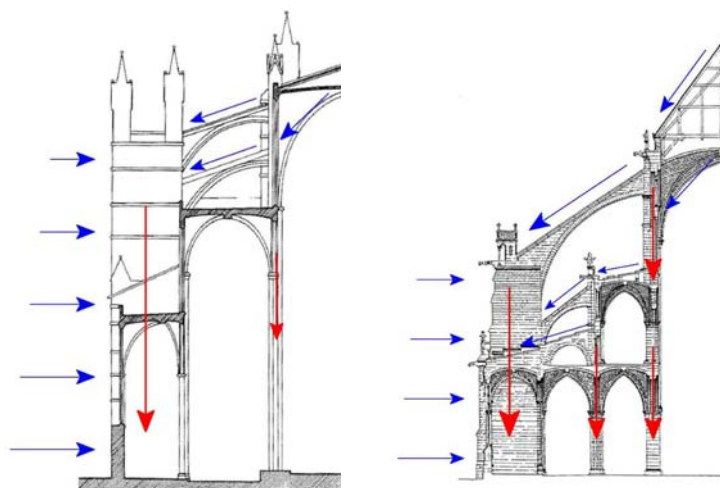
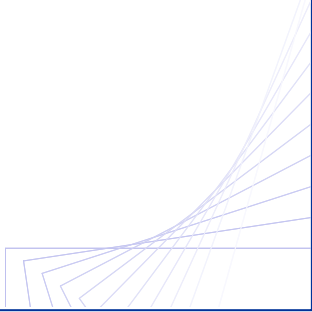


Figura 4. Función de los botareles como contrarresto y verticalizante de los empujes de las naves: a) Catedral de Palma de Mallorca; b) Catedral de Nôtre Dame de París.

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas



Era habitual entre los proyectistas (si admitían ese nombre) y constructores medievales plantear las dimensiones a partir de cánones, es decir, por medio de ratios que vinculaban las proporciones entre elementos. Por ejemplo, el canto y la altura de los botareles son función de la esbeltez de las columnas, de la altura de las naves y de la disposición de los arbotantes. Así, los botareles de las catedrales catalanas son muy poderosos y altos para contrarrestar, para confinar los empujes de las bóvedas que descansan sobre las altas naves laterales. Sirven para absorber los esfuerzos horizontales (de origen gravitatorio y de viento) que no pueden admitir las esbeltas pilas interiores. En esa misión se sirven de los arbotantes, invento genial, revelador de un profundo conocimiento estructural, pero no exclusivamente gótico (los romanos, cómo no, ya lo habían utilizado).

La flecha y luz de las bóvedas de las naves depende del estilo gótico del país, de sus manías y costumbres, lo que pone de manifiesto que la solución no es única tampoco en este ámbito. No obstante, se detectan tendencias, como que la relación luz nave central a luz nave lateral influye sobre la flecha de las bóvedas. La de las naves laterales, de luz reducida, suelen ser grande (arcos muy apuntados) con el fin de dar poco empuje, no equilibrado a esa altura, a las pilas de la alta nave central. Los románicos ya habían peraltado las bóvedas de las naves laterales, o incluso le habían dado forma de arbotante, para no torturar más a las ya castigadas pilas centrales.

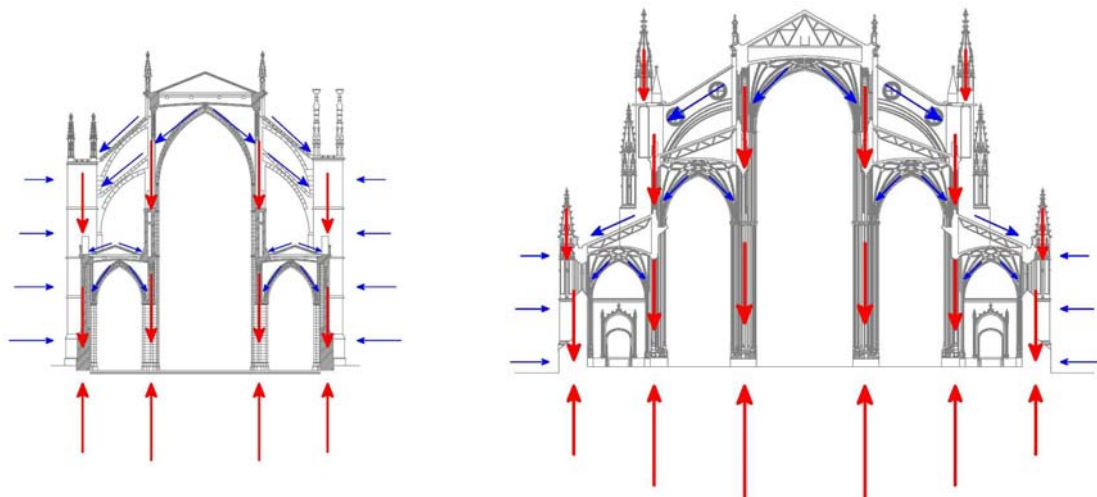
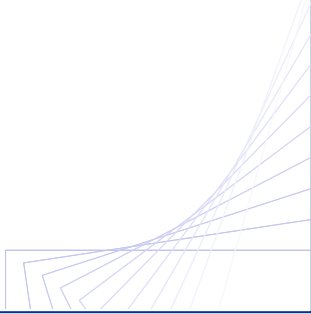


Figura 5. Comportamiento estático de las catedrales de León y de Salamanca.

Parámetros geométrico-resistentes
de la Catedral de León en
comparación con otras
catedrales góticas



3. ANÁLISIS DE LOS VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y DE LA CATEDRAL DE LEÓN

El análisis de este ensayo se basa en el contraste de las dimensiones de diferentes elementos constructivos que se han consignado en una tabla del estilo de la tabla 1. Luego, se han dibujado diagramas que relacionan los parámetros objeto de estudio con identificación de las catedrales a través de códigos. Eso permite identificar los valores máximos y mínimos que acotan el problema y, en particular, a título de ejemplo, dónde se ubican los valores de la Catedral de León. Naturalmente, este estudio puede realizarse para cualquier otra catedral, y ampliarse a cuantas otras iglesias o catedrales de cuyos datos se disponga. En este breve artículo se muestran algunos de los valores más significativos que marcan las diferencias estructurales de las catedrales europeas.

3.1 LUZ NAVE CENTRAL-FLECHA NAVE CENTRAL

Como se ve en la figura 6, el Duomo de Milán, la más gótica de las catedrales de Italia, tiene la relación luz nave central-flecha más alta de todas las catedrales europeas analizadas, los arcos ojivales del Duomo son muy apuntados pero con la particularidad de estar atirantados en sus arranques, lo que elimina en la práctica la transmisión de esfuerzos horizontales a las pilas, al menos para cargas gravitatorias.

Esta forma de proceder es endémica de Italia y constituye un interesante precedente de fábrica armada, como el hormigón del que se ocupa ACHE, pues conviven en alianza el hierro, que, por cierto, no se corroe, y la piedra, cada uno en su papel de resistir tracciones y compresiones, respectivamente. Quizás muestre también el escepticismo o el pragmatismo □ no saben qué pensar los autores □, de los arquitectos y constructores italianos de la época. Es curioso que, aun empujando menos en virtud de su peralte, los italianos se decidieran a atirantar. Añádase que aunque es cierto que, a igualdad de luz, un arco peraltado empuja menos que uno rebajado, el primero pesa más, porque necesita más desarrollo de material, aspecto que suele ignorarse, aunque resulte importante sólo a los efectos de la cimentación y del mayor consumo de materiales.

Las catedrales de León y de Beauvais se acercan al record del Duomo gracias al fuerte apuntamiento de los arcos. Las catedrales góticas más primitivas, como la de Ávila, y la

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

italiana basílica de Santa María Novella, por el contrario tienen arcos casi a medio punto.

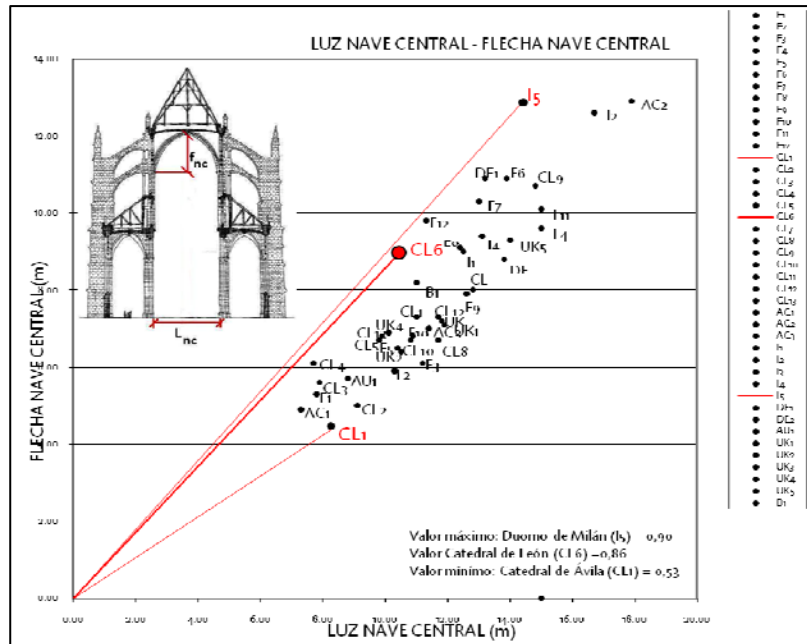


Figura 5. Relación flecha de nave central a luz de nave central

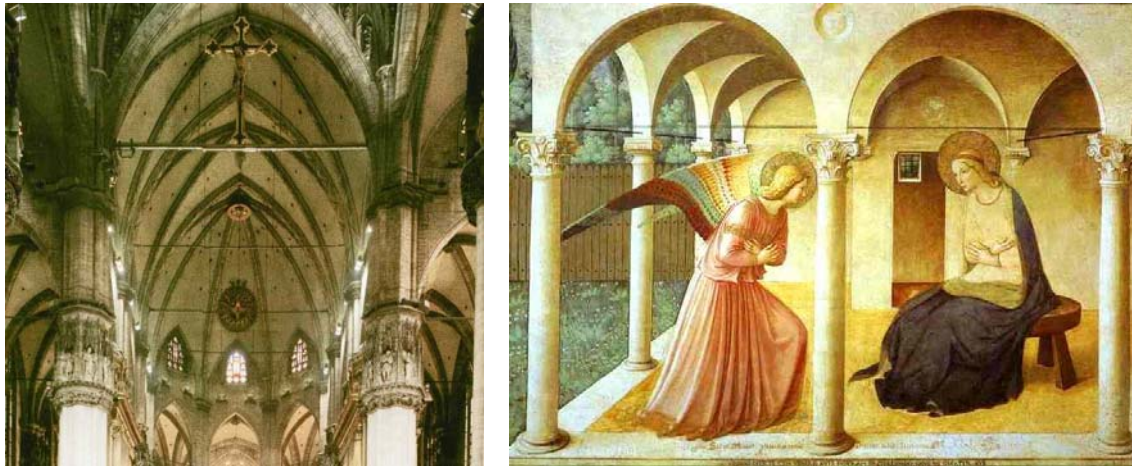


Figura 6. a) Nave central del Duomo de Milán con los arcos atirantados. b) La Anunciación pintada por Fra Angélico en 1440, también con arcos atirantados: una arraigada tradición.

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

3.2 LUZ NAVE CENTRAL-LUZ NAVE LATERAL

La figura 7 muestra cómo la relación luz nave central a luz nave lateral es muy variable según el país. Incluso dentro del mismo país y hasta de la misma región, se observan significativas diferencias. Así en Castilla y León, una catedral primitiva como la de Ávila tienen naves laterales de dimensiones casi iguales a las de la nave central, mientras que las más evolucionadas según la ortodoxia gótica (Burgos y León) tienen una nave central de luz casi del doble respecto a las laterales. Catedrales más postreras, como la de Sevilla o las de la Corona de Aragón muestran naves laterales casi igual de anchas que la central, dado que se igualan casi sus alturas. Estos comentarios se observan rápidamente si se comparan las plantas de las catedrales de la figura 8.

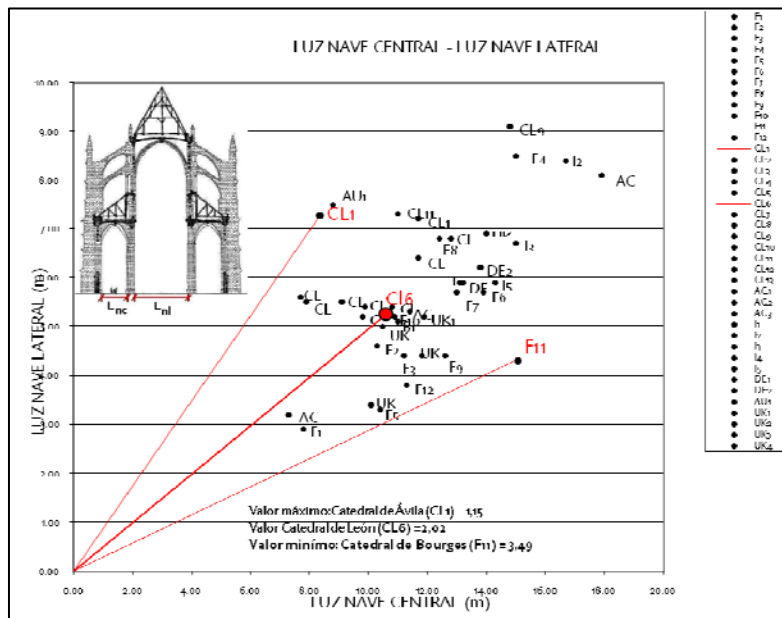


Figura 7. Relación flecha de nave central a luz de nave central. Se puede observar la gran dispersión de resultados que se registra.

Las luces de las naves laterales de las catedrales francesas suelen ser la mitad o la tercera parte (algo menos, incluso, en Bourges), de las luces de las naves centrales, lo que permite tener mayor rigidez en los laterales y, por consiguiente, menor canto de estribos. La parcial influencia del modelo francés en el territorio inglés ha influido en la relación luz nave central-luz nave lateral. En Italia la escasa verticalidad no requiere naves laterales estrechas.

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

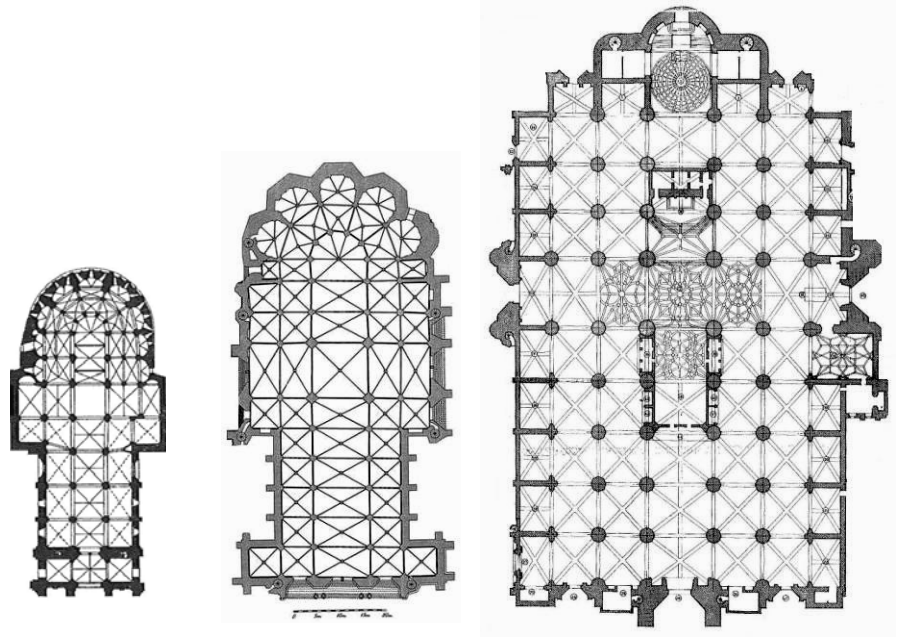


Figura 8. Diferente desarrollo de las naves del gótico español: a) catedral gótica primitiva de Ávila; b) gótico modelo francés en León; c) gótico tardío en Sevilla.

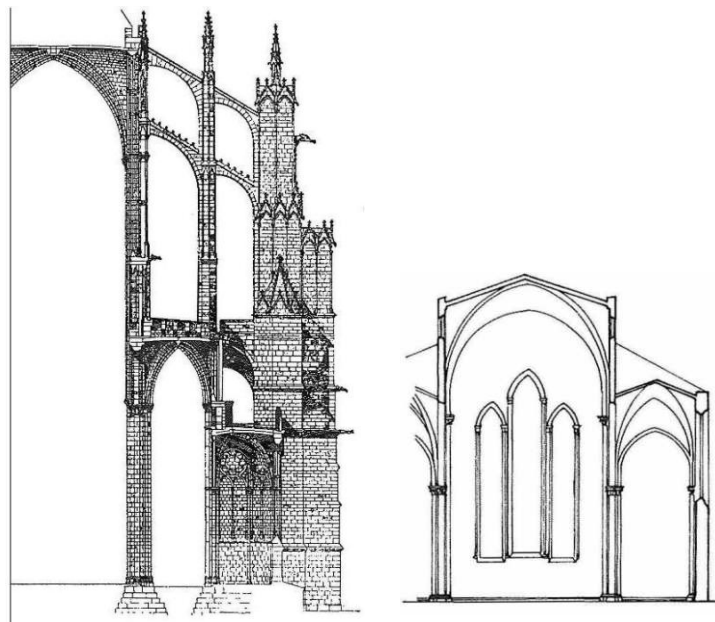


Figura 9. Gótico francés y gótico italiano: a) catedral de Beauvais; b) basílica de Santa María Novella.

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

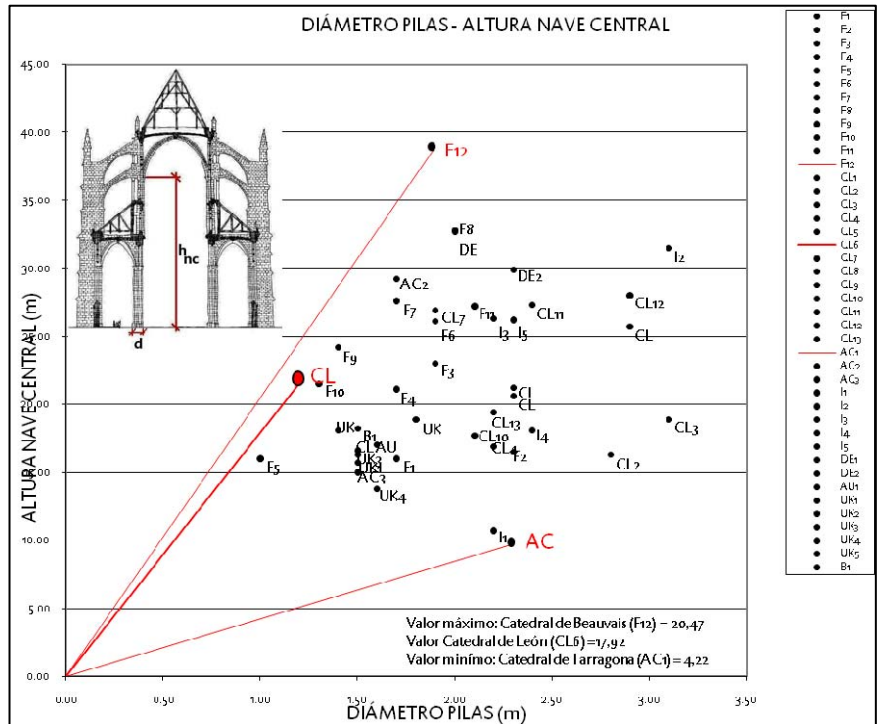


Figura 10. Esbelteces geométricas de pila (relación altura de pila a diámetro).

Es sabido, en ese sentido, que los constructores anteriores a Euler, Mohr, Navier, etc. erraban al aplicar los criterios de proporcionalidad a la altura, cuando es sabido que el grado de confinamiento de una ménsula (que es lo que viene a ser un botarel), es decir, la rigidez, es inversamente proporcional al cubo de la altura, siempre que no traccione y se fisure. Ese error fue confundido con un castigo divino por la soberbia de sus constructores y promotores, al querer batir todos los records anteriores. La catedral de Beauvais se cayó unos años después de su construcción, haciendo verdad el aserto de Ortega: ‘La verdad ignorada siempre prepara su venganza’.

Lo anterior, percibido difusamente de diferente manera por diversos constructores, podría estar en la raíz de la fuerte dispersión de este ratio según las épocas y los países o regiones. En opinión de los autores, estas consideraciones deberían estar presentes en los análisis formales y estilísticos de los historiadores del arte, con quienes los arquitectos y los ingenieros podemos colaborar, faltaría más, aportando nuestros conocimientos.

El diámetro de las pilas es función de varios factores: principalmente depende de la luz y de la altura de las naves, así como de la existencia de botareles y de su configuración. Las catedrales españolas góticas primitivas suelen tener soportes muy gruesos, por inercia románica y por temor. Las

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

catedrales francesas (incluida la de León) tiene columnas de diámetro reducido gracias a la gran diferencia de altura naves y a los poderosos botareles. En el gótico catalano-aragonés el fuerte canto de los botareles permite reducir el diámetro de las columnas, que son prácticamente bielas sin rigidez a flexión.

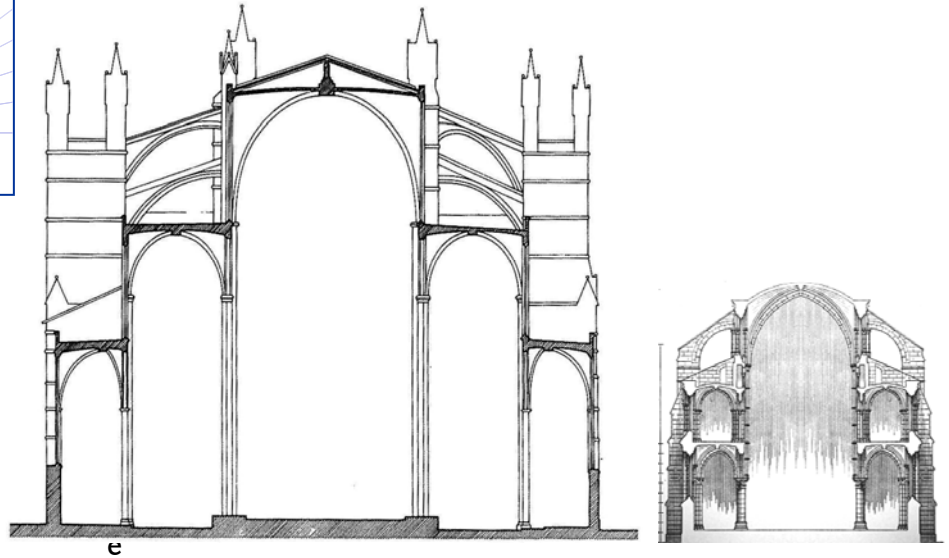


Figura 11. Catedral de Palma de Mallorca y de León: ambas las catedrales tienen columnas de diámetro reducido pero la altura libre de la catedral francesa es muy reducida en comparación con la catedral mallorquina. He aquí un ejemplo en el que falla la proporcionalidad de criterios.

3.3 ALTURA BOTAREL-CANTO BOTAREL

En la figura 12 se muestra la nube de puntos asociada a esta relación de parámetros. En Italia, la relación canto de botarel a altura de botarel queda desvirtuada por la casi inexistencia de botareles de las catedrales de Orvieto y de Santa María Novella, en comparación con los poderosos estribos del Duomo de Milán y, sobre todo, de San Petronio en Bolonia (figura 13). La elevada altura de las catedrales francesas y alemanas en relación al canto botareles reduce la media de la relación canto botarel a altura botarel a valores más bajos en cuanto los botareles tienen que estar a alturas muy elevadas para contrarrestar los empujes de bóvedas a tanta altura.

En España, los botareles suelen ser gruesos pero la altura varía en relación a la época. En el primer gótico, los botareles son muy bajos por la reducida altura de las bóvedas. En el caso del gótico tardío, la escasa altura de los botareles es debida a la adopción de 5 naves o a la disposición de capillas laterales con el consiguiente escalonamiento de la estructura (catedral Nueva de Salamanca). En las catedrales de Burgos y de León los arbotantes siguen el esquema de las catedrales

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

francesas, con botareles muy altos para contrarrestar los empujes de las bóvedas que transmiten esfuerzos a los dobles arbotantes.

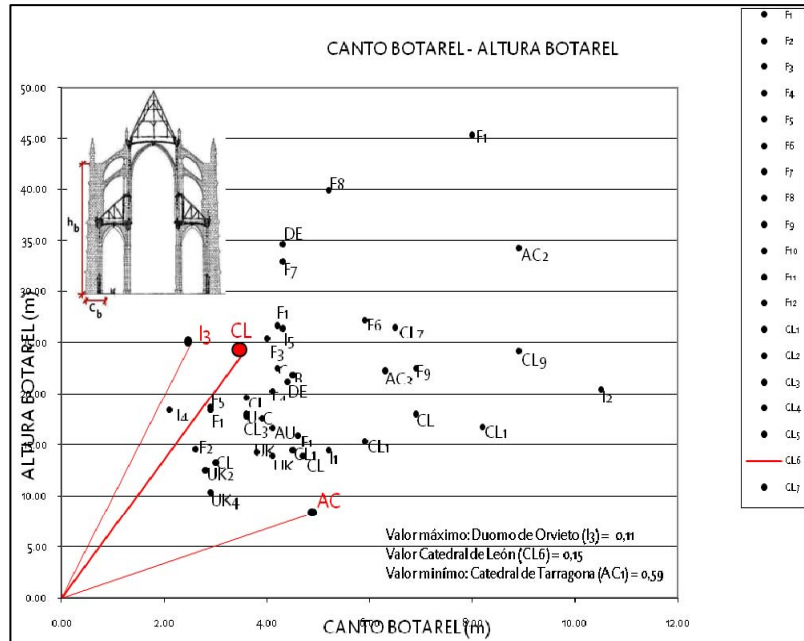


Figura 12. Esbelteces geométricas de estribos o botareles (relación altura / canto).



9
Figura 13. Los botareles de la Catedral de Beauvais, de San Petronio en Bolonia y de Santa María Novella en Florencia

Parámetros geométrico-resistentes de la Catedral de León en comparación con otras catedrales góticas

3.4 EL CRUCE DE EMPUJES EN EL CRUCERO

La catedral de León, como las ‘francesas’ en general — ejemplo paradigmático ha sido la catedral de Vitoria—, ha sufrido muchos problemas estructurales en las pilas ‘normales’ y en las torales (las del crucero o cruce de las naves este-oeste y norte-sur), también en las secundarias de esa zona. En la zona del crucero se presenta un problema singular que es el de resolver el encuentro de los empujes ortogonales sobre elementos comunes, como se muestra en las figuras 14 y 15. En León, por problemas arquitectónicos y funcionales, se optó por construir unos artefactos o torres-contrafuerte: la Silla de la Reina y La Limona.

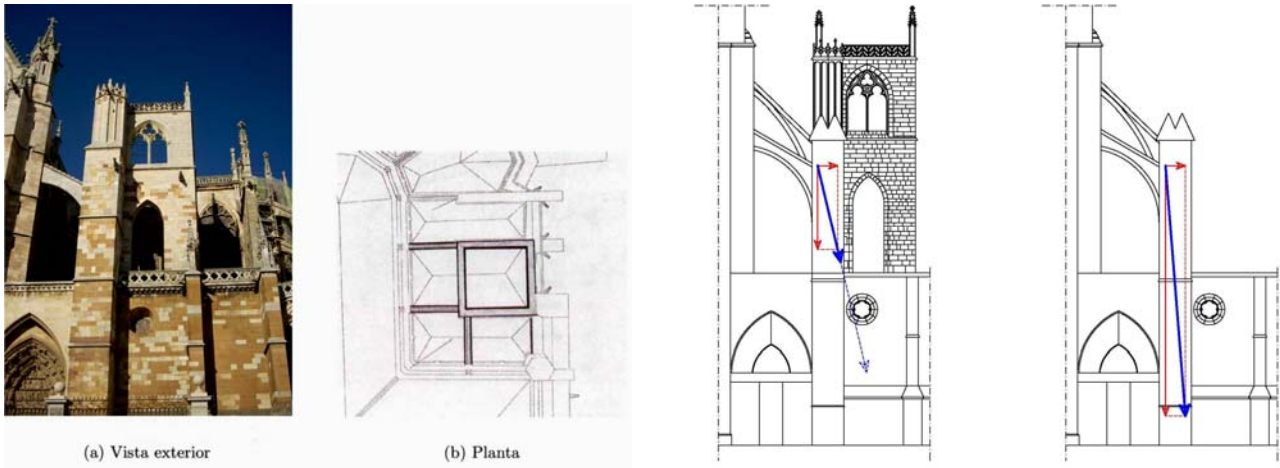


Figura 14 a) Catedral de León: Torre de la Silla de la Reina con los arbotantes incidentes: b) Esquema estático comparativo del comportamiento de la nave y del crucero con y sin la Silla de la Reina. Como se puede deducir del esquema, los lienzos de la Silla de la Reina (a la izquierda) permiten albergar en su seno la resultante de los empujes horizontales y verticales. En la parte derecha se explica cómo, si no existiese la Silla de la Reina, sería necesario agregar más peso en la parte alta del gran pináculo para “verticalizar” el empuje.

Parámetros geométrico-resistentes
de la Catedral de León en
comparación con otras
catedrales góticas

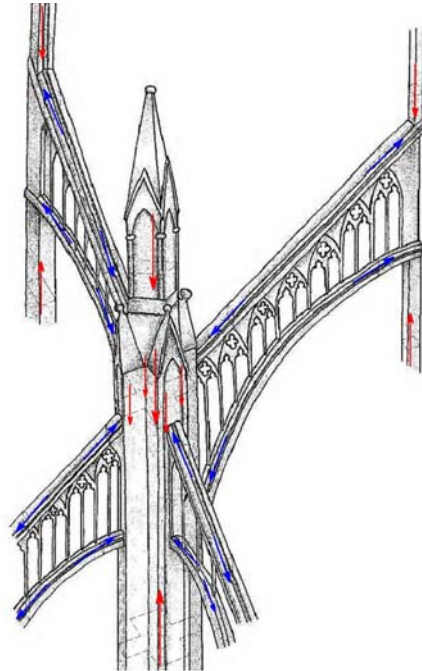
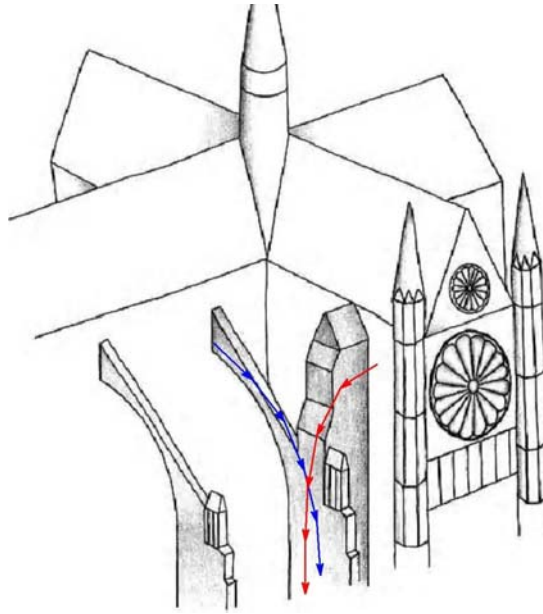
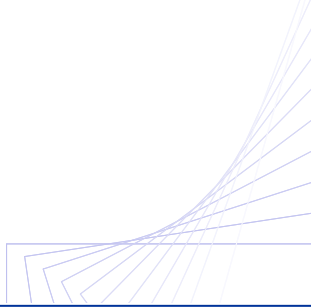
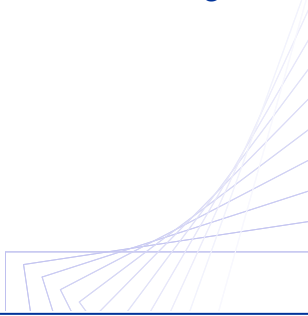


Figura 15. Otras soluciones de cruce arbotantes a través de elementos “verticalizadores de los empujes en algunas catedrales francesas: a) Esquema de la Catedral de Nôtre Dame, destacando el estribo masivo en sustitución de los arbotantes del crucero; b) Pináculo de la Catedral de Amiens

Parámetros geométrico-resistentes
de la Catedral de León en
comparación con otras
catedrales góticas



4. CONCLUSIONES

El estudio comparativo permite detectar que la geometría de la Catedral de León, en comparación con otras catedrales europeas, se acerca a la atrevida esbeltez del más puro gótico francés. Se detecta también cómo ciertos parámetros, como la esbeltez de las pilas, está vinculada a una adecuada distribución, en planta en alzado, de las naves, y de la configuración de los botareles. Asombra, en cualquier caso, el afinado sentido estructural de aquellos constructores que, sin un gramo de acero, sin cuantías mínimas, sin elementos finitos, con matemáticas y física rudimentarias y con medios constructivos pobres, hicieron algo que los ingenieros de hogaño deben conocer y valorar.

5. REFERENCIAS

- [1] Francesco Russo: "Trabajo del Master en Restauración y Rehabilitación del Patrimonio UAH Postgrado de la Universidad de Alcalá; título: La Catedral de León, Análisis Histórico y Restauraciones" Trabajo no publicado.
- [2] Javier León González. "Tratamiento de las Estructuras Existentes y Gestión de su Ciclo Vital". Trabajo no publicado.