

EL BINOMIO GEOMETRÍA-TENSIÓN EN LAS OBRAS DE LOS SIGLOS XV Y XVI

Josep Maria Pons-Poblet.
josep.maria.pons@upc.edu

Jordi Masahiro Simó Amezawa
jordi-masahiro@coac.net

El cálculo de las tensiones tiene un interés secundario; es la forma de la estructura la que rige su estabilidad.

Jacques Heyman¹

1.- Introducción.

Pretendemos en este trabajo presentar el binomio geometría-tensión en las obras de los siglos XV y XVI. En una época donde las tensiones de trabajo eran bajas, primaba fundamentalmente la forma correcta de la estructura para garantizar su estabilidad. En estos casos el problema estructural pasa a ser un problema de geometría. Las experiencias de los *maestros*, que se habían ido afianzando a lo largo de siglos, eran sin duda las reglas de construcción que iban a regir el *modus operandi* llevado a cabo. Cierto es que había algún referente escrito, citemos *De architectura*, el tratado sobre arquitectura escrito por Marco Vitruvio, probablemente redactado entre el 30 y 15 a. C., pero la época de los tratados, en los cuales, aunque quizás tímidamente, se empieza a apuntar algunas relaciones mecánicas, era todavía incipiente. Sin duda, se primaban las relaciones geométricas en las construcciones.

En el período considerado, siglos XV y XVI, nos encontramos con un binomio tensión-geometría donde esta última tiene un papel fundamental culminando en la “gran medida”: la *Ordinatio* de Vitruvio (Heyman, 2004, 6). De

1 HEYMAN (1925).

hecho, esta concepción geométrica de la construcción pervivió y, por tanto, parecía aplicable la máxima que “si un edificio funciona, también lo hará si se construye al doble de su tamaño” (Heyman, 2004, 7), esto es, el sustento principal se dará a las reglas de la experiencia y la proporcionalidad:

“Las reglas de la experiencia han asegurado la supervivencia de los templos griegos y romanos” (Heyman, 2004, 6).

Pero, como se puede intuir, esta premisa no siempre funciona. Al aumentar las solicitudes requeridas en las construcciones, a la vez que aumentando formas y volúmenes, empiezan los problemas estructurales llegando, en algunos casos, al colapso ruinoso de las mismas. Será precisamente en Galileo, como veremos, donde planteamientos que van en contra de esta concepción (geométrica) inicial serán tratados con un abordaje crítico de los mismos, que hará que el binomio referido resulte más equilibrado entre la concepción geométrica y tensional.

Citemos por ejemplo el caso de la Sagrada Familia. Es conocido que se plantea su (posible) finalización en el año 2026. ¿Sería viable diseñar y construir las torres que aún faltan atendiendo sólo a criterios geométricos? Sin duda, la respuesta negativa sería la que todo el mundo habría dado, haciendo suya la sentencia conocida de *ars sine scientia nihil est* (Ackermann, 1949); la práctica no es nada sin la teoría.

2.- El Binomio Geometría-Tensión.

Nos proponemos en este apartado, de manera generalista, ver la influencia de la geometría y la tensión, por separado y juntas, en el diseño y cálculo estructural.

2.1.- La Geometría.

El ser humano siempre ha diseñado construcciones donde refugiarse, poder vivir, interactuar con otros, rendir cultos a los dioses, etc.; es decir, siempre ha existido una relación de la humanidad con la construcción. Ejemplos los encontramos ya desde la antigüedad donde, los constructores, con uso de maderas o incluso materiales pétreos, llevaban a cabo tales obras. El uso óptimo de las relaciones geométricas pertinentes, que permitían que

las construcciones llegasen a buen puerto, eran primadas respecto a las relaciones mecánicas que, sin duda, no eran tenidas en cuenta (al menos como hoy en día se haría). De esta manera, los problemas de compresión a la vez que los problemas de flexión y deformaciones aparecidas eran resueltos variando las relaciones geométricas altura/base o bien con el uso de columnas (o elementos verticales) relativamente juntos para relativizar (o minimizar) estos efectos.

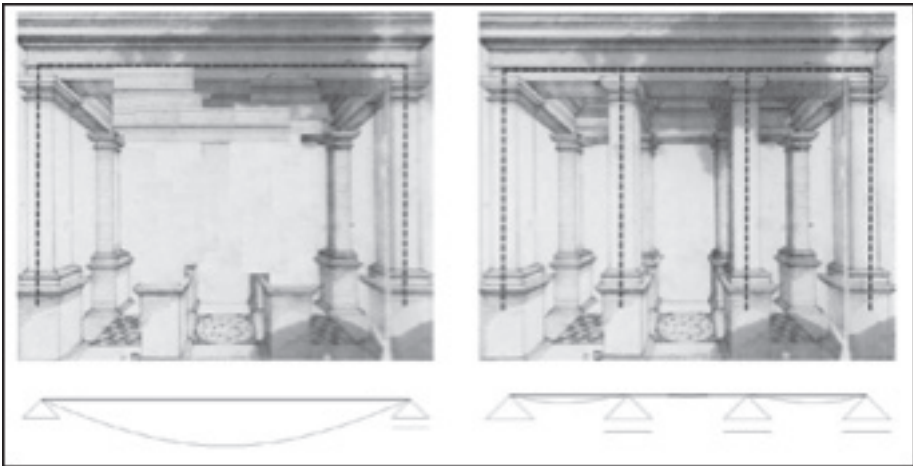


Figura 1. Uso de pilares para minimizar la flexión y la deformación del dintel.

De hecho, encontramos ejemplos de ello en textos antiguos; citemos la misma Biblia donde, en el libro del profeta Ezequiel, leemos:

“Fuera del templo había una muralla que lo rodeaba. La regla que el hombre tenía en la mano medía tres metros. Entonces midió el muro, que era de tres metros de ancho por tres de alto. Luego se fue a la entrada que daba a oriente, subió los escalones y midió el umbral de la puerta, que tenía tres metros de ancho. Las celdas que había a cada lado de la entrada medían cada una tres metros de largo por tres de ancho, y entre celda y celda había una distancia de dos metros y medio. [...]. El hombre midió el vestíbulo que daba entrada al templo, y el vestíbulo medía cuatro metros. Había dos pilastras de un metro de grueso [...]”.

Esta concepción prevalecerá *grosso modo* en el románico y el gótico. Ciertamente es la utilización de arcos y bóvedas, junto a otros elementos estructurales, ayudará de manera magistral a la redistribución de los esfuerzos (Heyman, 1999) y permitirá de manera óptima el trabajo de las estructuras y su pervivencia en los siglos.

Todo ello nos permite afirmar que nos encontramos en un periodo donde, claramente, el problema estructural desemboca en un problema geométrico.

2.2.- La Tensión.

Durante siglos prevalecerá esta concepción geométrica de la construcción. Será precisamente en la obra del italiano Galileo (1564-1642) donde se ven, con suma claridad, planteamientos que van contra esta concepción inicial abordándolos con un espíritu crítico.

“Però, Sig. Sagredo, revochi pur l’opinione che teneva, e forse insieme con molti altri che nella meccanica han fatto studio, che le machine e le fabbriche composte delle medesime materie, con puntuale osservanza delle medesime proporzioni tra le loro parti, debban essere egualmente, o, per dir meglio, proporzionalmente, disposte al resistere ed al cedere alle invasioni ed impeti esterni, perché si può geometricamente dimostrare, sempre le maggiori essere a proporzione men resistenti che le minori.” (Fragmento de los Discorsi³.)

La sentencia del pisano también era aplicable a las construcciones más generalistas. Este hecho implicaba que era necesario conocer las características mecánicas y resistentes de los materiales empleados, así como su respuesta frente a las acciones externas. Estos parámetros no podían ser obtenidos sólo con procedimientos geométricos.

2.3.- El Binomio

Abordando el estudio por separado, esto es, considerándolo exclusivamente bajo el prisma geométrico o bien el del cálculo estructural, se observa-

3 "Por tanto, Sagredo, abandonad esta opinión que mantenéis, quizá junto a otros muchos que han estudiado la mecánica, de que las máquinas y estructuras compuestas por un mismo material y teniendo exactamente las mismas proporciones entre sus partes deben ser igualmente (o mejor dicho, proporcionalmente) dispuestas a resistir (o a ceder) a las fuerzas exteriores y a los golpes. Porque puede ser demostrado geoméricamente que las mayores son siempre proporcionalmente menos resistentes que las más pequeñas".

ba que cada vez los problemas eran mayores y daban lugar a un malbaratamiento del material, a disfunciones estructurales e incluso al colapso de las estructuras. Hacía falta un estudio dual del problema; una relación biyectiva entre la geometría y la tensión.

La Teoría de Estructuras, como ciencia, se acepta comúnmente que nace con el teorema de los tres momentos –conocido como teorema d'Émile Clapeyron (1799-1864). Estamos en 1857. Ciertamente es que, antes de la obra del francés, encontramos nombres ilustres que, bajo el prisma de la llamada Resistencia de Materiales, también han contribuido enormemente al quehacer técnico. Nos permitimos citar nombres como Robert Hooke (1635-1703) con su estudio de las relaciones tensión - deformación, así como a Edme Mariotte (1620-1684), Jakob Bernoulli (1654-1705) y Claude Louis Navier (1785-1836) con sus relaciones sobre el problema de la flexión, entre otros. Una rápida ojeada nos permite ver que su ubicación temporal es a partir de los siglos XVII y XVIII.

Nuestro estudio, por lo tanto, se encuentra claramente enmarcado en un periodo donde prima la relación geométrica, pero, debido a problemas que puntualmente irán apareciendo, el cálculo estructural cada vez irá ganando mayor protagonismo.

3.- Charles Gauter de Rouen. El *maestre* Carlín (1378-1449).

Una vez presentada la realidad precedente, pasaríamos a contextualizarla (brevemente) en el periodo del tardogótico, objetivo de este trabajo. Sin duda, el alcance del tema sería muy amplio a la vez que interesante: ver como los distintos maestros iban adaptando su saber, la experiencia adquirida de antiguos mentores, con los conocimientos técnicos que iban surgiendo a la vez que plasmándolos en sus obras.

En este caso, y quizás debido a nuestra localización geográfica (Barcelona), se ha creído referencia obligada la mención de Charles Gauter⁴, el *maestre* Carlín. Habiendo pocas referencias biográficas del mismo, podemos indicar que nació en Rouen en 1378, y su deceso fue, probablemente, en Sevilla el año 1449.

4 También referenciado como Carles Galtés.

Lo que sí parece claro es su origen:

*[...] mestre Carlí piquer, mestre de la Seu de Lleida natural de la ciutat de Ruan del regne de França [...].*⁵

De sus trabajos hacemos mención del realizado en la fachada de la catedral de Barcelona que será la base de la que posteriormente el arquitecto Oriol Mestres realizará en el siglo XIX. También encontramos su quehacer en la sede leridana destacando en ella su campanario. Años más tarde, sus trabajos se localizan en la sede hispalense.

En primer lugar, analizaremos la fachada de la Catedral de Barcelona donde el maestro Carlín dibujó en papel de pergamino su diseño -no siendo construido hasta finales del siglo XIX mediante una interpretación del mismo. En segundo lugar, su intervención en la Catedral de Sevilla, aunque no disponemos de documentación gráfica, como en Barcelona; en Sevilla diseñó dos de las puertas de la Basílica con las mismas ideas y planteamientos que los de la fachada de la ciudad Condal. El ejemplo de la obra del *maestre* Carlín nos sirve para continuar con el discurso de la geometría como base del trabajo en las estructuras góticas, que, aunque complejas y sofisticadas, tenían una base de representación sencilla y práctica.

3.1.- El proyecto de la fachada de la Catedral de Barcelona (1408-1410).

La construcción de la Catedral de Barcelona fue iniciada en 1298 y las obras de la fachada principal, a principios del siglo XV. Como señalábamos en el punto anterior, fue el maestro francés el encargado del proyecto y de su diseño materializado excepcionalmente en 12 pergaminos. A pesar de ello, constatamos que sólo nos han llegado 8. Estos pergaminos, conservados en el archivo de la Catedral de Barcelona, los describe Joan Bassegoda en su libro *La fachada de la catedral de Barcelona* de donde reproducimos:

“La altura del dibujo es de 16 palmos catalanes, lo que supone 3,11 m., y su anchura original se desconoce, puesto que, de los doce pergaminos, quedan ahora solamente ocho. En su disposición inicial, los pergaminos formaban tres columnas de cuatro pergaminos cada una, habiéndose perdido la hilera de la derecha.

5 “[...] maestre Carlín, maestro de la Seo de Lleida natural de la ciudad de Rouen del reino de Francia [...]”. Acta en el tribunal de Coltellades del 20 de enero de 1413, Archivo de la Paeria, Lleida.

El dibujo realizado con regla y compás, a la tinta, muestra la puerta principal con su tímpano y sus cuatro arquivoltas de arco apuntado encima de la cuales se levanta un agudo gablete⁶ coronado por una gran macolla.

A uno u otro lado de la puerta figuran sendos contrafuertes con pináculos adornados con ganchos y macollas. El de la parte derecha se ha perdido al faltar los antes aludidos cuatro pergaminos. El dibujo es de gran perfección y la parte arquitectónica geométrica se complementa con los minuciosos dibujos de las imágenes de santos que flanquean el mainel⁷ con la figura de Jesús y de los ángeles de pequeño tamaño y bajo los doseletes situados en las arquivoltas. El estilo es gótico florido o flamboyant, cual corresponde a un maestro francés del siglo XV, y el dibujo, sin alcanzar el tamaño de los que se conservan en la catedral de Colonia o en la Stephansdom de Viena, es uno de los mayores y mejor conservados del arte gótico". (Bassegoda, 1981, 4-5).

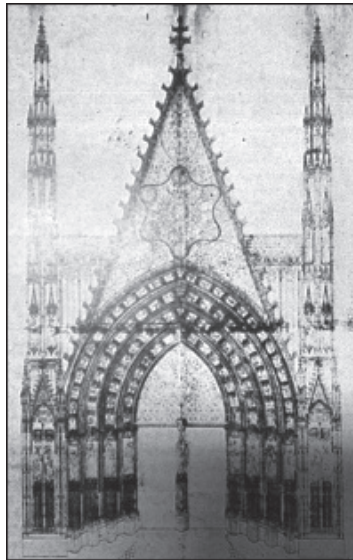


Figura 2. Grabado de 1845 reproduciendo el dibujo del maestre Carlín.
(Bassegoda, 1981)

-
- 6 El gablete es un elemento arquitectónico que sirve como coronación o remate ornamental, parecido a un frontón. Tiene forma triangular y peraltada, formado por dos líneas rectas y un vértice agudo, y se dispuso en los edificios del periodo tardo gótico.
- 7 Parteluz o mainel es un elemento arquitectónico sustentante, en forma de columna o pilar, que se dispone en el centro del vano de un arco, "partiendo" la "luz" de ese vano, es decir, dividiéndolo en dos vanos.

La fachada y el cimborio, los encargos del *maestre* Carlín en la Seo barcelonesa, quedaron incompletos, apenas iniciadas las obras. De hecho, de la fachada de Carlín, quedaron los dibujos de los pergaminos, pero, de la parte del cimborio, no se sabe nada -sólo que era de planta octogonal a causa de la parte baja que fue realizada antes de 1430.

No fue hasta mediados del siglo XIX que, gracias al impulso del banquero Manuel Girona, se volvió a pensar en acabar las obras de la Catedral y, en especial, de la fachada y del cimborio. Se redactaron varios proyectos y hubo varias discusiones sobre su conveniencia durante años. El proyecto que al final se materializó fue debido a Oriol Mestres, el cual siguió con bastante fidelidad el dibujo de Carlín en cuanto a la fachada. De la parte del cimborio hubo dibujos muy diferentes y con propuestas derivadas de la nueva interpretación del gótico realizada en el siglo XIX, con diferentes diseños tanto del gótico catalán -como el del Monasterio de Poblet-, como del gótico centro europeo, que al final fue el que se adoptó. En este mismo sentido, en Europa se acabaron las catedrales de Florencia, Milán, Colonia y Viena.

En este contexto, en 1887 se iniciaron las obras de la fachada, que se terminaron en 1890. El cimborio, en cambio, se inició en 1906 y se terminó en 1913.

En otro orden de cosas y, estudiando los dibujos de Carlín para la fachada, es interesante analizar la geometría presente en la misma. Sobre todo, poder valorar las reglas de proporcionalidad aplicada por los maestros del gótico. Hay que indicar que dibujos como los localizados para la fachada de la Catedral de Barcelona son bastante inusuales durante la construcción de una catedral gótica; era más corriente realizar representaciones a escala o *monteas*⁸ -en los suelos o en las paredes- a tamaño real para definir los detalles o los cortes de los sillares. La geometría de los dibujos, realizados a partir de líneas rectas y curvas (realizadas como arcos de circunferencia), tiene como base una representación sencilla y práctica, con un catálogo simple de líneas, suficiente en todo caso para representar la complejidad del formalismo y de los diseños góticos. El instrumental utilizado también fue básico: punzones, reglas y divisores⁹.

El dibujo, como representación de la arquitectura, se ha caracterizado desde sus orígenes como un vehículo de gran capacidad descriptiva para

8 Dibujo de tamaño natural que en el suelo o en una pared se hace del todo o parte de una obra para hacer el despiece, sacar las plantillas y señalar los cortes.

9 Punzones metálicos para incidir en superficies pétreas o cerámicas; reglas de madera y divisores (compases de puntas metálicas).

controlar la forma y para darla a conocer, transmitirla y ponerla en práctica. Sus diversas variantes, a mano alzada (croquis) o delineada (planos), a escala o a tamaño natural, sobre soportes efímeros (paredes o suelos) o duraderos (papel), tienen presencia a lo largo de la historia y han servido para conseguir el fin del hecho arquitectónico de un edificio. Por otro lado, a nivel creativo, estos grafismos se desarrollaron en la arquitectura anterior al Renacimiento, como dibujos a pie de obra, los cuales servían tanto para dirigir la obra, como para transmitir los diseños de los maestros a medida que fueran necesarios en el proceso constructivo.

Es precisamente esta razón la que hace que los pergaminos del *maestre* Carlín de la fachada de la Catedral de Barcelona sean un documento excepcional y de gran importancia documental y pueden ser considerados como un *plano de obra*, como diríamos en la actualidad. Es completamente plausible que, en épocas previas a la modernidad, las ideas, la creación y el diseño se realizasen al unísono *en la obra*; con el maestro dirigiendo a *pie de obra*, sin un gran desfase temporal entre la creación y la ejecución.

En el siguiente apartado, correspondiente al análisis de intervención de la Catedral de Sevilla, será interesante observar cómo se acaba materializando la intervención, en otro emplazamiento y a diferente escala.

3.2.- El proyecto de la nueva Catedral de Sevilla (1439-1449).

Tal y como hemos comentado, el *maestre* Carlín, después de la intervención en la fachada de Barcelona, estuvo trabajando en Lleida, donde trabajó en la construcción de la Seo hasta 1432. Desde allí se trasladó a Sevilla para intervenir en la construcción de la catedral desde 1439. Carlín será maestro mayor hasta 1449, último año en el que se le cita en la nómina, dato que pudiere significar su deceso.

Durante su dirección se construyen las portadas del Nacimiento y del Bautismo, que guardan gran paralelismo con el proyecto de Barcelona. Al ser un estudio muy interesante, el hecho de ver analogías y diferencias apuntamos brevemente algunas de las primeras. Coinciden en la elevación del zócalo, en el tipo de basas de los baquetones de las arquivoltas, en la combinación de gabletes y arquerías -enlazadas por una imposta-, en el perfil del gablete decorado con ganchillos, en los compartimentos para las esculturas, por citar algunos ámbitos que pudieren ser ampliados convenientemente. Sin duda, estamos ante un mismo diseño, pero con unas proporciones distintas.

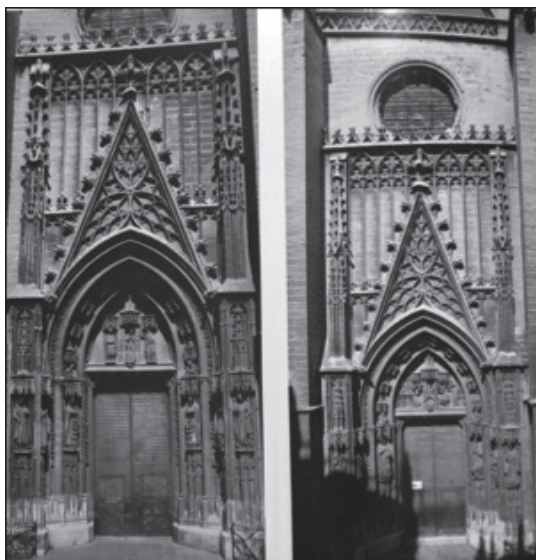


Figura 3. Puertas del Bautismo y Nacimiento, respectivamente, de la catedral de Sevilla. (*La Catedral de Sevilla*, 1985).

En el apartado anterior, han sido referidas las *monteas* al hablar de la sede barcelonesa. Son bastante conocidas, al haber sido analizadas científicamente, *las monteas* o representaciones gráficas *in situ* de la catedral de Sevilla. Estas representaciones describen de una forma gráfica el trazado geométrico de varios elementos constructivos del edificio. Son, sin duda, otra muestra de estos detalles o *planos de obra* realizados normalmente a escala real, en paredes, suelos e incluso en la cubierta (de la propia Catedral hispalense).

4.- El binomio geometría-tensión en el siglo XXI.

Se ha creído interesante, aunque fuere sólo a modo de apunte, presentar como se analizaría la relación geometría-tensión hoy en día, esto es, pasados más de cinco siglos. Como es lógico, a parte del diseño geométrico, actualmente es tan importante (en algunas obras, quizás más) el aspecto del cálculo estructural. Este último puede llegar a ser complejísimo, dando lugar a operaciones, generalmente muy tediosas, que requieren una gran formación técnica por parte de la persona calculista.

Queremos mostrar un ejemplo en el que se tomó parte activa, con la

idea que el lector se haga una idea de la actual implementación del binomio geometría-tensión presentado. En el año 2005, se realizó en el Monasterio de Poblet una intervención de refuerzo y rehabilitación de una estructura gótica -para la implementación de una nueva biblioteca- que requería un cálculo actualizado para el nuevo uso¹⁰. Para ello, se establece un análisis geométrico previo, para comprobar la estabilidad estructural al aumentar el sistema de cargas del edificio cambiante en uso. Con ayuda de la estática gráfica, se comprueba que los empujes producidos se encuentran dentro de la estructura y, por lo tanto, se hallaría en equilibrio. También se comprueba el cálculo tensional de resistencia mediante el análisis por elementos finitos (FEM: *Finite Element Method*), donde se pueden ver los valores límites de tracción y compresión en un modelo tridimensional de la estructura. A partir de estos valores, el técnico procederá a la redacción del informe procedente.

5.- Conclusiones.

Comenzábamos el artículo con una frase del profesor Jacques Heyman: “el cálculo de las tensiones tiene un interés secundario; es la forma de la estructura la que rige su estabilidad” (Heyman 2004, 5); sentencia que sin duda sintetizaría muy bien nuestro artículo. Presentábamos en este trabajo el estudio: el binomio geometría-tensión en las obras de los siglos XV y XVI. En ella, se ha pretendido mostrar que, frente a esta relación, en el periodo considerado se primaba fundamentalmente la geometría. El efecto de la tensión empezará a plantear estudios y conclusiones que, finalmente, cada vez irán generando más interés en *los maestros* y constructores.

Así podemos concluir que gran parte de las reglas estructurales para construcciones de fábrica tiene un origen proporcional. Una estructura será estable si se consigue un *equilibrio gráfico* en un sistema de fuerzas. Hablamos, por tanto, de una condición geométrica. A pesar de ello, cada vez se va viendo que el efecto de la tensión va siendo más importante, pues al aumentar las dimensiones geométricas y las solicitaciones estructurales, el efecto causado por la tensión en los distintos elementos irá cobrando mayor relevancia y no puede ser menospreciada.

Los estudios actuales nos pueden servir de ejemplo para indicar que gran

10 *Projecte de rehabilitació de l'antic dormitori dels monjos del monestir de Santa Maria de Poblet. Vimbodí (La Conca de Barberà), Tarragona.* Autores: Jordi-Masahiro Simó i Amezawa y Jorge Portal Liaño.

parte de la arquitectura gótica está suficientemente sobredimensionada a nivel tensional y geoméricamente en equilibrio con una estabilidad muy grande. Este hecho permite intervenciones modernas para conseguir nuevos usos acordes a la actualidad como el caso del Monasterio de Poblet anteriormente citado.

Bibliografía.

- ACKERMANN, J. S. (1949) "Ars sine scientia nihil est: Gothic theory of architecture at the cathedral of Milan", *The Art Bulletin*, 84-111.
- BASSEGODA NONELL, J. (1981) *La fachada de la Catedral de Barcelona*, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, Vol. XLV, Núm. 5, Barcelona.
- CASTRO, A. (1996) *Historia de la construcción arquitectónica*, Barcelona, Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.
- GALILEO GALILEI (1976) *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Madrid, editora nacional.
- HEYMAN, J. (1999) *Estructuras de fábrica: teoría, historia y restauración*, Madrid, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- HEYMAN, J. (2004) *Análisis de estructuras: un estudio histórico*, traducción de Santiago Huerta, Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- *La Catedral de Sevilla: estudio arquitectónico* (1980), Sevilla, Servicio de Publicaciones del Ayuntamiento de Sevilla.
- *La Catedral de Sevilla* (1985), Sevilla, Ediciones Guadalquivir.
- *La Catedral gótica de Sevilla: fundación y fábrica de la obra nueva* (2006), Sevilla, Universidad de Sevilla, Secretariado de publicaciones, vicerrectorado de investigación.
- LLORENS, M. et al (eds.) (2004) *Seminari sobre l'estudi i la restauració estructural de les catedrals gòtiques de la corona catalano-aragonesa*, Girona i Ciutat de Mallorca, 14-15-16 de juny 2001, Girona, Servei de Publicacions de la Universitat de Girona.
- MONTOTO, S. (1954) *La Catedral y el Alcázar de Sevilla*, Madrid, Plus-Ultra.
- VITRUVIO, M. (1995) *Los Diez libros de arquitectura*. Versión española de José Luis Oliver Domingo, Madrid: Alianza.