

TEXTOS SOBRE TEORÍA E HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES
Colección dirigida por Santiago Huerta

- F. Bores, J. Fernández Salas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**
- A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**
- A. Choisy. **El arte de construir en Roma.**
- A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio.**
- A. Choisy. **El arte de construir en Egipto.** (en preparación)
- A. Choisy. **Historia de la arquitectura.** (en preparación)
- A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. A. Tabales, (Eds.). **Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**
- R. Guastavino. **Ensayo sobre la construcción cohesiva.** (en preparación)
- J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica.**
- J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica.**
- J. Heyman. **La ciencia de las estructuras.**
- J. Heyman. **Vigas y pórticos.**
- J. Heyman. **Análisis de estructuras. Un estudio histórico**
- S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas.**
- S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América.**
- S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the First International Congress on Construction History.**
- J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII.** (en preparación)
- H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción.** (en preparación)
- A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas.**
- E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval.**

Arcos, bóvedas y cúpulas

Arcos, bóvedas y cúpulas

Geometría y equilibrio en el cálculo
tradicional de estructuras de fábrica

Santiago Huerta

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

© Santiago Huerta Fernández

De la presente edición:

© Instituto Juan de Herrera, 2004

Todos los derechos reservados

ISBN: 84-9728-129-2

Depósito Legal: M. 48.332-2004

Cubierta: Regla de Carlo Fontana (1694) para las cúpulas simples,
y su verificación mediante el dibujo de la correspondiente línea de empujes.

A la memoria de mi madre,
de mi padre, y de mi hermano José

Probado he muchas veçes a sacar Raçon del estribo que abrá menester una qualquiera forma [arco] y nunca hallo regla que me sea suficiënte, y tambien le he probado entre arquitectos españoles y estrangeros, y ninguno paresçe alcançar verificada regla, mas de un solo albedrio; y preguntando por que sabremos ser aquello bastante estrivo, se responde por que lo a menester, mas no por que raçon.

Rodrigo Gil de Hontañón

On fait une voûte d'après les voûtes faites: c'est affaire d'expérience.

Paul Sejourné *Grandes voûtes*

Índice

Prefacio	xi
1 Introducción: El cálculo de estructuras de fábrica	1
PRIMERA PARTE: EL CÁLCULO CIENTÍFICO	
2 El material: la fábrica	11
3 Equilibrio: líneas de empujes	35
4 Análisis límite de arcos y estribos	71
SEGUNDA PARTE: EL CÁLCULO TRADICIONAL	
5 La Edad Media	133
6 El Renacimiento	181
7 Rodrigo Gil de Hontañón	207
8 El siglo XVII	239
9 El siglo XVIII	287
10 Epílogo de una tradición: el siglo XIX	375
TERCERA PARTE: GEOMETRÍA Y EQUILIBRIO	
11 Validez del cálculo tradicional	387
12 Conclusiones	517
Apéndice A: Historia breve de la teoría científica de arcos y bóvedas	523
Apéndice B: Fractura de estribos de fábrica	533
Notas	537
Bibliografía	563
Índice de nombres y lugares	587
Índice de temas	597

Prefacio

El ámbito de este libro es la Historia de la Construcción, disciplina que mira a las obras de arquitectura e ingeniería civil desde un punto de vista técnico. Mi interés por la Historia de la Construcción nació ya durante mis estudios en la Escuela de Madrid, y recuerdo en particular las clases del profesor Fernández Huidobro, en las que explicaba la construcción de las bóvedas romanas o bizantinas con la misma minuciosidad que la que dedicaba, por ejemplo, a las modernas estructuras tensadas. He sabido después que seguía el enfoque iniciado por Viollet-le-Duc y Choisy en la segunda mitad del XIX, que fue seguido después con entusiasmo por otros profesores como Gato y Torres Balbás.

La llegada de la arquitectura moderna barrió casi por completo el interés por las construcciones históricas, si bien en el decenio de los años 1980 podían detectarse signos de una renacida atención. Pensé, entonces, que una manera de saber si la Historia de la Construcción era una disciplina, consistía en realizar una investigación bibliográfica: si se encontraban suficientes referencias que encajaran en la idea antedicha, podría afirmarse «empíricamente» que la disciplina existía. Así sucedió en este caso, y fue una agradable sorpresa descubrir que el camino iniciado a finales del siglo XIX, fue continuado, de forma más o menos irregular después. En apenas dos años de trabajo pude recopilar más de un millar de referencias sobre diversos aspectos de la técnica constructiva histórica y

me sorprendió la diversidad de revistas y ámbitos en que aparecían estas publicaciones.

Decidí entonces escribir una tesis sobre bóvedas, que el profesor Aroca aceptó dirigir. El campo de búsqueda se estrechó, pero siguieron apareciendo numerosas referencias que confirmaron la intuición previa. El trabajo se centró en el cálculo tradicional de arcos y bóvedas. Un mejor entendimiento del problema requería el estudio del comportamiento estructural. En este tema encontré en las teorías del profesor Heyman una ayuda inestimable que, desde entonces, ha guiado mis investigaciones. Gracias al profesor Heyman, descubrí no sólo la moderna teoría del análisis límite, sino la antigua teoría científica. El estudio de la historia de la teoría de arcos y bóvedas demostró ser fundamental para una mejor comprensión de los problemas. Después, finalizada la tesis en 1990, empecé mi trabajo editorial sobre Historia de la Construcción y me implicué en peritajes sobre edificios históricos con problemas estructurales. Ambas actividades sirvieron para sedimentar y profundizar los conocimientos adquiridos. En particular la elaboración de peritajes ha sido enormemente instructiva. Un peritaje debe responder a preguntas concretas, y encontré que el análisis límite y su principal corolario, el enfoque del equilibrio, suministraba la mejor herramienta para comprender este tipo de edificios. Por otra parte, las reglas tradicionales proporcionaban en muchos casos la primera orientación, crucial, a la hora de determinar la naturaleza de los problemas.

Este libro recoge los intereses antes citados. Las referencias bibliográficas y las citas son numerosas, si bien se ha tratado de reducirlas al mínimo. Pero me ha parecido útil, siempre que ha sido posible, dejar hablar a los maestros del pasado. La tradición de la construcción de fábrica ha desaparecido casi por completo y el arquitecto o ingeniero actual, cuando quiere comprender este tipo de edificios, se enfrenta a su propia ignorancia. La construcción de arcos y bóvedas, que fue considerada por Tosca «lo más sutil y primoroso de la arquitectura», nos es ajena. Nunca hemos visto levantar una sencilla bóveda. Carecemos del oficio y experiencia del antiguo constructor, que seleccionaba la piedra, dibujaba las plantillas para cortarla, trazaba la cimbra, dirigía el proceso de construcción y, finalmente, supervisaba el descimbrado. Tenemos mucho que aprender de los arquitectos e ingenieros del pasado. Por supuesto, estamos de acuerdo con la rotunda afirma-

ción de Mignot en el peritaje de la catedral de Milán: *Ars sine scientia nihil est*, la práctica no es nada sin la teoría. Pero la teoría sin la práctica está vacía de contenido. La práctica, en nuestro caso, debemos buscarla en los edificios construidos y en lo que podamos extraer de la lectura crítica de los antiguos tratados de arquitectura e ingeniería, todo ello dentro de un marco teórico adecuado.

La Historia de la Construcción ha empezado ya a perfilarse como una disciplina independiente. El presente libro pretende contribuir a la formación y difusión de esta disciplina que no sólo puede aportar datos como «ciencia auxiliar» a otros campos ya consolidados como la Teoría e Historia de la Arquitectura, la Arqueología o la Restauración y Rehabilitación de edificios, sino que merece por su propio interés y amplitud formar un ámbito específico. Los estudios pioneros de Viollet-le-Duc y Choisy deben ser continuados. El aspecto técnico no es el único ni el más importante, pero es fundamental para completar nuestra visión de las obras históricas de arquitectura e ingeniería.

AGRADECIMIENTOS: Los trabajos relacionados con este libro se extienden a lo largo de más de dos decenios. En este tiempo, multitud de personas me han prestado ayuda. A veces una fotocopia, un comentario o una referencia; otras han dedicado una parte sustancial de su tiempo. No hay espacio para agradecer individualmente a todas estas personas, pero espero que cada una de ellas, si cae en sus manos este libro, reconozca su ayuda, y sienta mi profundo agradecimiento.

No obstante, quisiera mencionar a quienes han tenido una relación más directa con esta publicación. El profesor Ricardo Aroca aceptó dirigir mi tesis doctoral que es el germen de este libro y me animó a iniciar mi actividad como editor. Siempre ha estado disponible y me ha orientado y apoyado durante todos estos años. Su insistencia en los aspectos geométricos del proyecto estructural ha marcado sin duda mis investigaciones. El ingeniero Antonio de las Casas, que fue gerente del CEHOPU durante un productivo decenio, ha insistido durante largo tiempo en esta publicación, recordándome una y otra vez esta tarea tantos años pendiente. El profesor Pedro Navascués también me animó en este sentido, y de sus clases nació, como estudiante de arquitectura, mi interés por los estudios históricos. Con el profesor Jacques Heyman tengo una deuda intelectual inmensa, que espero haya quedado patente a lo largo de todo el libro. Hace más de un de-

cenio tuve la fortuna de conocerle personalmente y, desde entonces, he mantenido un contacto regular con él. Con gran amabilidad, siempre ha estado dispuesto a discutir problemas complejos y a responder a mis, quizá demasiado numerosas, preguntas.

Este trabajo se inició con un fin completamente investigador y académico, sin pensar en su posible aplicación práctica. El profesor José Miguel Ávila y el arquitecto Manuel Manzano-Monís me hicieron darme cuenta de que estos estudios podían ser útiles en el ámbito del análisis y consolidación de edificios históricos, y me iniciaron en un campo en el que he trabajado con intensidad en el último decenio. La profesora Gema López me ha ayudado durante el largo proceso de edición y ha elaborado los detallados índices finales. Su trabajo minucioso ha eliminado numerosas incorrecciones; no obstante, soy responsable de cualquier error que haya podido permanecer.

Finalmente, me gustaría señalar que cualquier trabajo de investigación en España es, todavía hoy, como una carrera de fondo en solitario. Cuando falta el apoyo oficial, y social, el apoyo personal de la familia y los amigos adquiere un carácter crucial. Sin este apoyo no habría podido llevar a término, para bien o para mal, este libro. Mis padres y mi hermano José no han vivido para verlo terminado. Este libro está dedicado a su memoria.

1

Introducción: El cálculo de estructuras de fábrica

La construcción de fábrica (de piedra, ladrillo o adobe) surge con los primeros asentamientos permanentes, con la agricultura y las primeras ciudades, con el nacimiento de la civilización. Hay un deseo evidente de permanencia frente al paso del tiempo. Las primeras construcciones tenían muros de fábrica sobre los que apoyaban troncos de árbol para formar los suelos o techumbres. El siguiente paso consistió en cubrir el espacio también con fábrica. La manera natural de salvar un vano a base de pequeñas piedras o ladrillos es formar un arco, y el arco se inventa en Mesopotamia o Egipto hace unos 6.000 años.¹ El cómo se pudo llegar a esta idea es un misterio, pero que no es algo evidente lo demuestra que otras culturas, por ejemplo los mayas o los incas, construyeron en fábrica durante siglos sin jamás llegar a la idea del arco.

Un arco típico se construye apilando piedras unas al lado de las otras sobre una estructura auxiliar de madera o cimbra. La cimbra da la forma al arco; se empiezan a colocar las piedras a partir de los arranques y colocada la última piedra en el centro, la clave, el arco queda terminado. Al bajar la cimbra las piedras tienden a caer hacia abajo. Así, una dovela que intenta caer empuja a las dos dovelas colindantes que contrarrestan ese empuje, y los empujes se van transmitiendo, incrementados por los pesos. Si la forma del arco es correcta, y su espesor suficiente, estos empujes y contraempujes se anularán entre sí y el arco permane-

cerá en equilibrio. No obstante, las últimas piedras de los arranques del arco transmiten un empuje que debe ser contrarrestado. El arco debe estar apoyado firmemente contra algo que resista su empuje: unos machones o estribos de fábrica.

El arco empuja de forma permanente contra los estribos: «el arco nunca duerme», dice un antiguo proverbio árabe. Los estribos, las construcciones más o menos complicadas que resisten el empuje de los arcos y de las bóvedas y lo transmiten hasta el terreno, son los que dan firmeza a los edificios. Conocer el empuje de los arcos para poder dimensionar adecuadamente sus estribos ha sido el problema central de la construcción en fábrica desde sus orígenes hasta la actualidad. No es una tarea fácil, y generaciones de constructores lo consideraron el «enigma de la arquitectura» (Silberschlag 1772).

Existe un primer problema de lenguaje. Hoy día asociamos el término empuje al concepto de fuerza (medida por ejemplo en kN o toneladas). Los antiguos constructores no distinguían claramente entre el empuje y su consecuencia, el estribo. Medían el empuje de los arcos por su efecto: un arco empuja mucho si requiere grandes estribos, y poco si estos son pequeños. Por ejemplo, para Tosca (cap. 8) el cimborrio de la catedral de Valencia no «produce empuje» porque el propio espesor de la pared es suficiente, no habiendo estribos propiamente dichos.

Actualmente calculamos el empuje de los arcos basándonos en la teoría de las estructuras, esto es, aplicando las leyes de la mecánica y de la resistencia de materiales. Este tipo de cálculo, que podríamos denominar «científico» es relativamente reciente; nace a finales del siglo XVII, se desarrolla durante el siglo XVIII y su empleo sólo se generaliza a lo largo del siglo XIX. El Panteón de Roma, Santa Sofía, las catedrales góticas, en resumen, los mejores ejemplos de la construcción de fábrica son muy anteriores a este cálculo científico. Resulta evidente, sin embargo, que estas grandes obras del pasado no fueron hechas por aficionados; la sabia disposición de sus formas, su estructura interna, su construcción, manifiestan una seguridad y una maestría que sólo pueden ser el fruto de un profundo conocimiento de la mecánica de las fábricas. Antes del cálculo científico hubo otro cálculo, un cálculo tradicional fruto de otra teoría de las estructuras de fábrica.

La naturaleza de este cálculo tradicional es muy diferente de la del científico, pero su objetivo principal es idéntico: construir estructuras suficientemente seguras. El maestro medieval, o el moderno arquitecto o ingeniero, quieren lo mismo: disponer de un conjunto de procedimientos que les permita proyectar con seguridad sus estructuras. El cómo se llega a estos procedimientos concretos es un aspecto en cierto modo secundario; el constructor quiere por encima de todo levantar un edificio y que éste no se derrumbe en un plazo razonable (para nosotros del orden de un siglo; para los romanos del orden de un milenio). De hecho, entonces y ahora, quienes aplican los procedimientos de cálculo son con frecuencia incapaces de comprender el origen de la teoría que los fundamenta.

El cálculo tradicional de bóvedas y estribos estaba basado en la experiencia, era un cálculo empírico fruto de la observación atenta de ejemplos construidos y en construcción, y también de algunos hundimientos. Estas observaciones cristalizaron en una serie de preceptos aplicables a los tipos estructurales más usuales en cada momento histórico; así, los arquitectos romanos daban casi siempre al espesor del tambor que soportaba una cúpula de hormigón $1/7$ de la luz y esta proporción se verifica en numerosos edificios de tamaños muy diferentes. Los maestros góticos solían dar a sus estribos alrededor de $1/4$ de la luz de la nave central y, en el Renacimiento y barroco los arquitectos daban a los estribos de sus bóvedas de cañón algo más de $1/3$.

El empleo de este tipo de reglas geométricas se puede rastrear desde la antigüedad clásica hasta nuestros días. Las reglas sólo recogen una pequeña parte del conjunto muy amplio de conocimientos que es preciso tener para construir un edificio abovedado. En particular, la estructura no sólo debe ser estable cuando está terminada sino también en cada una de las fases de su construcción. Por otro lado, la fábrica debe adquirir resistencia con la suficiente rapidez y para ello se emplea en cada caso el aparejo adecuado (si es preciso se colocan dispositivos auxiliares; los zunchos de las cúpulas tienen probablemente la función de estabilizar la forma durante el fraguado). Además, el proceso de descimbrado puede ser crítico en algunos casos: ¿qué se descimbra antes, el arbotante o la bóveda? ¿cuánto tiempo hay que esperar antes de proseguir la construcción de una bóveda romana de hormigón?

Las reglas tradicionales de cálculo se refieren a la geometría de tipos estructurales concretos. Son una codificación de las proporciones de estructuras esta-

bles y se aplicaban en el contexto de un conjunto de conocimientos mucho más extenso. Sólo un maestro con experiencia podía enunciarlas y aplicarlas, o apartarse de ellas cuando lo consideraba conveniente. La flexibilidad en su empleo queda demostrada por la diversidad enorme que se encuentra dentro de cada tipo; piénsese por ejemplo en las distintas combinaciones de equilibrio de la arquitectura bizantina, en la casi infinita variedad de soluciones de arbotantes en el gótico, o en la complicada experimentación espacial de las bóvedas del barroco tardío alemán.

Con frecuencia se ha considerado que estas reglas son acientíficas, por ser meramente empíricas. Pero si el método científico consiste en el enunciado de leyes —esto es, en el descubrimiento de la regularidad de ciertos fenómenos— a partir de la observación y la experimentación, los antiguos constructores siguieron un método rigurosamente científico. Cada edificio construido fue un experimento con éxito y ese experimento quedaba en pie para las sucesivas generaciones de constructores; cada ruina era también una fuente valiosa de información. Por otra parte, durante la construcción la estructura se mueve, se agrieta, y esta respuesta del edificio en construcción puede ser interpretada y, a menudo, sugiere medidas correctoras para aumentar la estabilidad de la obra. (Los primeros pilares construidos de la catedral de Palma de Mallorca son más delgados; el curso de la construcción manifestó la necesidad de un cierto regresamiento.)

La clave para distinguir entre el cálculo tradicional y el científico hay que buscarla, de nuevo, en los objetivos. El cálculo tradicional busca una teoría para ciertas bóvedas; es, por su propia naturaleza, particular y las reglas del gótico no sirven para las bóvedas renacentistas. El cálculo científico busca una teoría de bóvedas que se pueda aplicar a cualquier bóveda y esa teoría debe ser una parte de otra teoría general que engloba a todas las estructuras, sean éstas de fábrica o no. Como se ha dicho, ambos tienen el mismo objetivo final: deducir un procedimiento seguro de cálculo. Pero el camino que se sigue es muy diferente, y su elección depende de una cierta visión del mundo, del ambiente social e intelectual en que trabaja el constructor.

Para un arquitecto romano o gótico el manejar una serie de «recetas» que conducían a buenos resultados era un procedimiento no sólo correcto sino habitual; también había recetas para curar ciertas enfermedades, teñir los tejidos o cortar

los árboles: el conocimiento técnico se codificaba de esta manera. A partir de la Revolución Científica este enfoque se vuelve inaceptable para cualquier persona culta. La «irracionalidad» de las reglas tradicionales, su falta aparente de fundamento, hace que los científicos (filósofos de la naturaleza, geómetras, matemáticos), arquitectos e ingenieros ya a principios del siglo XVIII las rechacen con vehemencia o las ignoren por completo. Philippe de La Hire, uno de los fundadores de la teoría científica de las bóvedas afirmaba en 1712: «Los arquitectos emplean algunas reglas para hallar el espesor que se les debe dar [a los estribos de las bóvedas], pero como éstas no están basadas en ninguna demostración geométrica, no se puede decir que estén demostradas». El desarrollo de la teoría científica de las bóvedas va unido a un juicio cada vez más negativo de las reglas tradicionales de cálculo. El argumento de La Hire, la falta de «demostración geométrica», esto es, de fundamento racional, se repite una y otra vez. Sin embargo, las reglas tradicionales, que no recogen otra cosa que las proporciones de edificios construidos, son el referente, consciente o inconsciente, para la prueba de las distintas teorías científicas. El error fue separar las reglas del contexto en el que nacieron: la experiencia práctica de la construcción de bóvedas, la observación crítica de edificios ya construidos.

La actitud de La Hire ha llegado hasta nuestros días. Existe un consenso a la hora de considerar el cálculo tradicional como acientífico e incorrecto. Se insiste en la imposibilidad de realizar ningún cálculo válido sin las ciencias de la mecánica y la resistencia de materiales. Así, por ejemplo, el ingeniero americano Parsons (1939), cuando escribe sobre los conocimientos estructurales de los arquitectos e ingenieros del Renacimiento afirma: «No había medios para ensayar los materiales . . . [y] por consiguiente el proyectista no podía estimar la resistencia de los distintos elementos; tampoco disponía de una teoría que le permitiera calcular el esfuerzo que dichos elementos debían resistir. Había, por tanto, un círculo vicioso de ignorancia que permaneció cerrado hasta que Galileo lo cortó.»

La opinión de Mainstone (1983), que ha publicado numerosas contribuciones sobre la historia del diseño y análisis de estructuras, abunda en el mismo sentido: «. . . [el cálculo de estructuras] hubiera sido prácticamente imposible hasta la última parte del siglo XVIII, pues sólo entonces se llegó a conceptos claros sobre sistemas de fuerzas actuando en cualquier dirección y su composición mediante el paralelo-

gramo de fuerzas.» Se infiere, claro está, que antes del siglo XVIII no había un cálculo de estructuras. En muchos casos se muestra el asombro de que a pesar de emplear reglas básicamente incorrectas los resultados fueran tan buenos. Por ejemplo Dorn (1970): «Una muestra de la habilidad de los arquitectos del Renacimiento es que empleando una mezcla de analogías antropomórficas, generalizaciones cualitativas, proporciones aritméticas tradicionales, reglas empíricas y una intuitiva (e incorrecta) teoría de arcos, consiguieran construir edificios magistrales y duraderos.»

Esta actitud negativa no debería admitirse sin más. Hay una contradicción evidente que podríamos resumir así: 1) Los antiguos constructores usaban una teoría de estructuras, expresada en reglas, que era esencialmente acientífica e incorrecta; 2) usando esta teoría construyeron obras de una audacia y perfección nunca superadas.

Para explicar este hecho se han barajado desde antiguo una serie de explicaciones. La primera de ellas alude a la intuición estructural, a una suerte de instinto muy desarrollado que guiaba las decisiones de los constructores. En este caso habría que preguntarse cuál es el conocimiento en que se basaba esta intuición. La intuición correcta que no se basa en algún tipo de conocimiento es, simplemente, buena suerte y, en esta hipótesis, habría que concluir que los antiguos constructores fueron muy afortunados. Otra explicación consiste en imaginar que el progreso del proyecto de estructuras estuvo guiado por un empirismo ciego, por un sistemático trabajo de prueba y error. Se construía un edificio; unas veces se derrumbaba y otras no. Los constructores se inspiraron en los edificios supervivientes; de ahí el progreso. El proceso se asemeja a la selección natural propuesta por Darwin, sólo sobreviven los más aptos. Es cierto que ha habido hundimientos a lo largo de la historia, pero su número es pequeño en comparación con el número de éxitos. Además, en determinadas épocas se detectan cambios repentinos, mutaciones bruscas en las formas y procesos constructivos, que no se explican por el mecanismo costoso de la selección ciega. La construcción abovedada de hormigón en Roma o las catedrales góticas tuvieron un desarrollo muy rápido (se ha comparado con el surgimiento de los rascacielos en Chicago) que no se puede explicar con la hipótesis anterior.

Finalmente, un gran edificio de fábrica se empieza por los cimientos y a continuación se levantan los muros y estribos; las bóvedas se terminan muchas veces

al cabo de decenios, o siglos. ¿Realmente se puede pensar que el resultado del descimbramiento era una incógnita? ¿No manifiestan los edificios una seguridad desde sus arranques? ¿Podía en la Edad Media, por ejemplo, una ciudad destinar durante, digamos un siglo, la práctica totalidad de sus recursos a la construcción de una catedral que posiblemente se hundiría? Cualquier estudioso de la arquitectura o la ingeniería de la construcción debe descartar esta hipótesis, como lo haría sin dudar cualquier constructor experimentado.

La solución la ha apuntado el profesor Heyman desde el marco de la moderna teoría de estructuras. Las reglas estructurales, la teoría tradicional de las estructuras, en definitiva, el énfasis en la geometría, es esencialmente correcto. En efecto, como se demuestra rigurosamente dentro del marco del moderno análisis límite de estructuras de fábrica, la seguridad de una estructura de fábrica depende de su forma geométrica independientemente de su tamaño y, en este sentido, las reglas que han llegado hasta nosotros son del tipo correcto. Esto no significa que lo sean sino que su énfasis en aspectos geométricos es acertado y refleja un conocimiento de los parámetros esenciales de proyecto.

Lo más importante es que este marco teórico permite dar a la investigación sobre el cálculo tradicional un nuevo giro. Como ha señalado el profesor Heyman, del Teorema Fundamental de la Seguridad se deduce el «enfoque del equilibrio», que nos da el marco teórico más correcto y adecuado para entender el funcionamiento de las estructuras de fábrica.

En efecto, el enfoque del equilibrio nos permite salvar una dificultad clave. Nuestro propósito es entender la teoría tradicional de estructuras de fábrica, pero no podemos, sin embargo, pensar como un ingeniero romano o un arquitecto medieval: se puede sumar pero no restar al conocimiento, y la interpretación de la antigua teoría pasa, necesariamente, por un conocimiento de la moderna teoría de las estructuras de fábrica. El lenguaje del equilibrio es universal; en el caso de las fábricas tradicionales, se expresa en formas y masas. La moderna teoría permite analizar y cuantificar, lo que nuestros predecesores registraban como un catálogo de formas. Ambas cosas son equivalentes: un complejo análisis moderno de una estructura de fábrica conduce en último término a afirmaciones geométricas.

En este libro se realiza, creo que por primera vez, un estudio específico y detallado sobre la naturaleza de la teoría tradicional de estructuras de fábrica, y sobre la validez de sus reglas. En particular, se estudia en detalle la información que se puede encontrar en documentos escritos: tratados de arquitectura, construcción e ingeniería, informes y peritajes, condiciones de obra, etc. Como punto de partida, se ha supuesto que la teoría tradicional de estructuras es correcta; que la información que nos han transmitido los antiguos constructores en sus escritos y edificios es interesante, y abunda en aspectos de crucial importancia sobre el proyecto de estructuras de fábrica; que leyendo a Rodrigo Gil de Hontañón, a Palladio o a Perronet, podemos aprender sobre estructuras; que la prosa imprecisa y desordenada de los tratados medievales enmascara un entendimiento magistral de la mecánica de las estructuras de fábrica. Se trata de sacar a la luz un pensamiento que ha permanecido ignorado, quizá por el juicio negativo que merecía la propia teoría.

Por tanto la investigación no está motivada por un afán meramente erudito; no se trata de sacar a la luz los restos enterrados de la antigua teoría. Creo firmemente que se puede aprender y éste ha sido el motor de la investigación. He pensado que cualquier afirmación de un gran constructor del pasado debe ser estudiada con cuidado y respeto.

En la primera parte del libro se expone un resumen de la teoría del arco de fábrica. Se trata de suministrar la parte fundamental del marco teórico necesario para entender, desde nuestro moderno punto de vista, las estructuras de fábrica. Se hacen numerosas referencias históricas a su desarrollo, pues estoy convencido de que el desarrollo histórico de una teoría es fundamental a la hora de comprender mejor la esencia de los problemas a que se dirige. La segunda parte recoge la teoría tradicional de estructuras a partir de los documentos escritos, principalmente entre 1400 (primeras fuentes escritas) y 1800 (inicio de la consolidación del cálculo científico). No es una recopilación exhaustiva pero sí suficientemente amplia como para obtener una idea precisa de la naturaleza del cálculo tradicional. Finalmente, en la tercera parte se analiza la validez de la teoría tradicional y de sus reglas estructurales. Se aplica la teoría del análisis límite al estudio de la estabilidad de los tipos más usuales de bóvedas y sus estribos (así como las torres), comparando los resultados con las reglas empíricas.