

Las geometrías de las estructuras abovedadas

Marcello D'Anselmo

Un recorrido por la Historia de la Arquitectura, analizando los elementos constructivos en conexión con las cubiertas, muestra una estrecha correlación con los acontecimientos que, de manera paradigmática, han marcado la Historia de los pueblos y cómo ésta guarda inferencias entre los diferentes ámbitos, teóricos y prácticos, de las diferentes disciplinas.

Sin extendernos en el desarrollo histórico de las estructuras abovedadas, pero teniendo en consideración los elementos que han inspirado las construcciones, será necesario tener en cuenta, como dato obvio, que las estructuras pueden entenderse como pertenecientes a las dos clases siguientes: estructuras resistentes por masa y estructuras resistentes por forma.

Por motivos evidentes, en esta exposición haremos de excluir las referencias relativas a las estructuras resistentes por masa; las estructuras resistentes por forma, precisamente porque su resistencia depende de la forma que adquieren en la realidad de la construcción histórica y en las hipótesis y concepciones que las contienen, remiten, necesariamente, a los signos que permiten representar lo que todavía no se da o se ha dado ya como perteneciente a la Historia de la Arquitectura.

La variedad y complejidad de las estructuras abovedadas induce a cuestionar sus posibilidades resistentes, desde diversos puntos de vista; esta investigación sólo se puede realizar mediante una interpretación articulada de las tipologías más habituales y de sus variantes. Sin embargo, el hecho de

que el patrimonio edilicio histórico tan sólo se haya dado a conocer en contadas ocasiones, para la persecución de este fin será condición prioritaria y obligada realizar un análisis que integre de las descripciones que los tratados y los manuales recogen de diversas formas de las estructuras abovedadas con los diferentes ejemplos realizaciones del patrimonio edilicio.

Para obtener las indispensables reducciones a esquemas y tipos, y compara e interpretar sus correspondientes ejemplos, es necesario realizar una concisa selección de ellos. Por lo tanto, tales esquemas resultan menos abundantes que los numerosos ejemplos que derivan de una interpretación analítica de la realidad de la construcción histórica.

Cuando la geometría de las estructuras abovedadas es sencilla, por ejemplo, cuando se trata de arcos, es decir cuando son geometrías planas, con tan solo unos pocos elementos se pueden describir sistemas abovedados que, si bien presentan formas y materiales diferentes, son atribuibles a curvaturas y centros de curvatura fácilmente reconocibles. Sin embargo, en el caso de las estructuras abovedadas espaciales, la determinación de sus características y su descripción así como su descripción exigen de un mayor cuidado a la hora de analizar las leyes constitutivas que han regido su materialización.

Un código de interpretación que permite establecer una clasificación suficientemente sencilla de las estructuras abovedadas espaciales, interpretadas como superficies laminares, es el que se basa en la

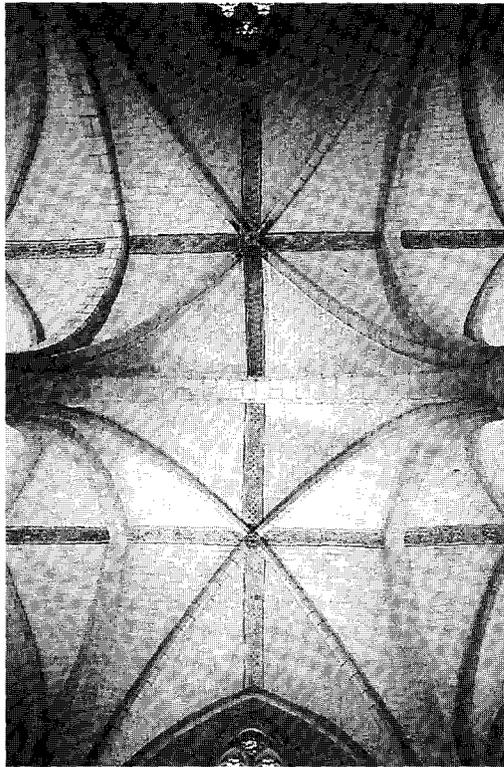


Figura 1

curvatura de Gauss. Esta curvatura vincula el producto de las dos curvaturas principales medidas en correspondencia de un punto genérico perteneciente a la superficie media de la lámina.

En el caso en que una superficie laminar curva presente, en correspondencia de uno de sus puntos, una curvatura del mismo signo en cualquiera de las direcciones consideradas, ésta se define *sinclástica* en aquel punto y su curva de Gauss será de signo positivo. La lámina de revolución es un típico representante de las superficies laminares sinclásticas. Las superficies sinclásticas no son superficies *desarrollables*; por contra, se puede desarrollar la superficie laminar por la cual la curva, en correspondencia de un punto, aunque admita el mismo signo en todas las direcciones, resulte nula en una determinada dirección. En este caso la superficie considerada presenta curvatura de Gauss nula; la superficie cilíndrica, por ejemplo, es una superficie desarrollable en todos sus puntos.

En el caso en que la superficie laminar curva admita, en correspondencia de uno de sus puntos y contemporáneamente, dos curvaturas de signo opuesto en referencia a dos direcciones distintas, ésta se define, en correspondencia de ese punto, *anticlástica* o *de ensillado*, con la consiguiente curvatura de Gauss de signo negativo. Al igual que las superficies sinclásticas, tampoco se pueden desarrollar las superficies anticlásticas.

Otro código de interpretación, aparentemente un poco más sencillo, y que tiene como finalidad una clasificación diferente de las superficies laminares curvas, la da el modo con el que éstas se crean. Los procesos fundamentales que crean las superficies de lámina curva se pueden clasificar de esta manera:

- por rotación o por revolución de una curva directriz alrededor de un eje fijo;
- por translación de una directriz, tanto rectilínea como curvilínea, a lo largo de una generatriz, rectilínea o curvilínea, casi siempre perteneciente a un plano ortogonal al que pertenece la directriz;
- por translación de una directriz, tanto rectilínea como curvilínea, que se apoya en dos líneas, curvas o rectas, planas u oblicuas y que en cualquier caso están orientadas en el espacio.

Hay que subrayar que, si se quisiera centrar la atención en las estructuras abovedadas que han marcado la arquitectura realizada con materiales y técnicas tradicionales, es decir, excluyendo los materiales modernos como el hormigón armado y el acero, sería bastante evidente que sólo las estructuras abovedadas que tienen curva de Gauss equivalente a cero o mayor de cero serían el objeto de dicha atención. Ello porque, en función a las leyes relativas al comportamiento mecánico de las estructuras, hasta que no se descubrieron los nuevos materiales, no era posible realizar estructuras abovedadas cuya forma evidenciara una resistencia por masa. Las estructuras resistentes por forma sólo pueden existir en caso de haber sido realizadas con materiales tradicionales, por tanto, vinculadas a los valores positivos o nulos de la curva de Gauss.

En resumen; se puede afirmar, sin ninguna duda, que las estructuras abovedadas que se realizaron con anterioridad al siglo XIX son comparables a superficies sinclásticas. Esta observación lleva a optar por la clasificación de Gauss como alternativa a la relativa

al modo en que éstas se generan, ya que resulta más evidente la determinación de los períodos históricos que, gracias al descubrimiento de los nuevos materiales y de la puesta a punto de nuevas técnicas de producción y elaboración, han permitido el tránsito de una época a otra. La segunda clasificación describe de manera más analítica los elementos geométricos que determinan las estructuras abovedadas; en tal caso, se produce una especie de simbiosis entre los elementos geométricos, directriz-generatriz, descripciones de la forma estructural y los procedimientos de construcción que permiten realizarla.

En cualquier caso, antes de plantear otras consideraciones sobre las estructuras resistentes por forma, será útil detenerlos en las más sencillas de ellas. El arco es un elemento de construcción que ha provocado notables desarrollos en la Historia de la Arquitectura; dejando a un lado la cuestión de sus orígenes, cabe señalar que éste es la respuesta a un problema que el hombre se ha planteado desde siempre, tanto cuando quería marcar una pared, natural o artificial, con vanos, como cuando quería superar un obstáculo natural, un río o un precipicio, mediante estructuras más sólidas de las que probablemente, y con razón, se pueden considerar las primeras estructuras suspendidas; en el segundo caso en especial, pero también en el primero, se manifiesta *una actividad humana que viola la intangibilidad del cosmos para unir lo que está dividido en la naturaleza*.

El arco ha sido, y lo es aún, la primera gran invención que, optimizando los recorridos de las fuerzas que desde las cotas más elevadas de una construcción alcanzan los cimientos, ha permitido desviar los esfuerzos a los muros de manera, satisfaciendo las exigencias de los pueblos de épocas muy diversas; sobre todo, ha permitido descodificar las concepciones espaciales de quienes lo han utilizado. Actualmente, es fácil afirmar lo anteriormente indicado: el arco resiste por forma, esto es, considerándolo con un grosor no infinitésimo, una porción de superficie de una lámina que tiene una curva nula en una dirección y, por lo tanto, una superficie con curvatura de Gauss igual a cero. Por ello, se puede desarrollar en el plano, pero esto conlleva el hecho de que la longitud del rectángulo obtenido, en el caso en que se trate de un arco de medio punto y se considere la superficie de desarrollo de la superficie de intradós, es igual a aproximadamente una vez y media la abertura de un arquitebe correspondiente realizado con un mate-

rial genérico. Pero el arquitebe de piedra o de madera que marca la construcción tradicional no puede soportar cargas excedentes que dificultan la capacidad de resistencia; los resultados formales y, por lo tanto, las geometrías de la arquitectura realizada con materiales tradicionales, estarían condicionados, como de hecho ha sucedido.

Además, el arquitebe está necesariamente realizado con un elemento monolítico, piedra o madera, a diferencia del arco, que puede realizarse con un material discreto como la arcilla o la piedra elaborada en sillares de diferentes dimensiones y formas. Por lo tanto, lo que en un principio parecía una deseconomía, es decir, la relación entre la longitud de la superficie de intradós del arco y su proyección en el plano horizontal, resulta, en realidad, la condición que genera la superación de los límites impuestos tanto por la resistencia de los materiales como por la posibilidad de elaboración de los mismos.

La subdivisión de la materia utilizada en las construcciones otorga a los muros, tanto planos como curvos, una mayor maleabilidad respecto a las realizadas con sillares megalíticos, estableciendo una premisa que concretiza desarrollos condicionados, no tanto por la resistencia de los materiales sino por como las fuerzas actuando en un sillar se trasladan al que se encuentra debajo de éste.

Teóricamente, si el mortero no uniera las juntas, dado que se trata de sillares cuyas superficies de contacto son completamente lisas, podríamos determinar que la capacidad portante de una sillería de este tipo podría permitir la realización de estructuras que se elevan cientos de metros; pero no es así, tanto porque los muros normalmente se realizan utilizando mortero, lo que reduce la capacidad portante, como porque entran en juego otros factores de naturaleza técnica y de construcción.

Realmente, la mampostería es un material compuesto como el hormigón, aunque muy poco resistente a tracción; se podría definir un *no sólido* parecido a un hilo de lana, como afirma S. di Pasquale, o un material no controlable mecánicamente como afirma A. Giuffré.

Lo más fascinante de lo que hasta ahora se ha afirmado es la síntesis existente entre ciencia, técnica y construcción. Las observaciones efectuadas añaden al reconocimiento de los diferentes tipos de estructuras abovedadas, que vienen dados por las formalizaciones teóricas que fueron codificadas mucho más tarde



Figura 2

de que se hiciera efectiva la construcción de las estructuras abovedadas.

Sin duda, en el pasado, la construcción de una estructura abovedada puso en juego más conocimientos técnicos que científicos, más práctica que ciencia. En efecto, si se quisieran analizar las estructuras abovedadas con los instrumentos y los códigos de interpretación que se disponen en la actualidad, se podría decir que muchas de esas estructuras se pueden atribuir a formas y por lo tanto geometrías, que mal representan las leyes de la mecánica; A menudo, encontramos situaciones en las que la estabilidad de una bóveda o de una cúpula se remite a factores poco ponderables pero que coparticipando materializan lo que la lectura unívoca de la ciencia pondría en crisis.

Todo lo anteriormente dicho, nos lleva necesariamente a efectuar análisis más exhaustivos del patrimonio histórico construido, y, sobre todo, nos obliga a actuar valorando las peculiaridades, tanto las más manifiestas como las menos evidentes, para captar las correlaciones intrínsecas.

La identificación de una bóveda o de una cúpula se puede efectuar inmediatamente mediante consideraciones geométricas, aunque resulta más complejo establecer la relación que ha habido en las diferentes épocas entre la tradición constructiva y los conocimientos técnicos. Sin duda, durante muchos siglos, la tradición, entendida como transmisión de la experiencia constructiva acumulada por un pueblo, ha representado todo el patrimonio técnico que, seleccionado y enriquecido precisamente por las experiencias concretas en la construcción, ha permitido enfrentar y resolver los problemas de la edificación.

Con el nacimiento del mundo moderno, la tradición, basada en la experiencia transmisible, cada vez pierde más consistencia y se establece un clima especulativo fundado sobre el experimento repetible sostenido por proposiciones científicas que tienen un valor demostrativo.

Dejando a un lado las consideraciones sobre el arco, nos referiremos a la bóveda de cañón como el conjunto de muchos arcos unidos. El tratamiento estático de la bóveda de medio cañón, al menos hasta el siglo XVII, se efectuaba mediante la utilización de reglas geométricas; el mismo Rondelet con respecto a este argumento afirma: «se ha empezado tardísimo a sentir la necesidad de someter el problema del equilibrio de las bóvedas a las leyes de la Mecánica. Parece que los antiguos arquitectos, como los de la época del renacimiento, no estuvieran guiados por principios ciertos y geométricos a la búsqueda de los medios empleados para asegurar la solidez de varias partes de sus edificios, y en especial de las bóvedas. La experiencia, la imitación, y una mecánica natural les servían de guía...»; de este modo, se creía que estructuras geoméricamente similares tenían las mismas propiedades estáticas, debido a que la práctica constructiva estaba relacionada con un código formal que se aplicaba independientemente de las dimensiones, como afirma el mismo L.B. Alberti a propósito del arco de medio punto que habría tenido que mostrar la máxima estabilidad.

En sustancia, Alberti y otros tratadistas remiten a la geometría la definición de la forma de las bóvedas y de las proporciones de los elementos constructivos de manera que la estática y la estética se configuran en un cuerpo único de principios.

Obviamente, ésto no es cierto. Una regla constructiva con sólo proporciones no puede existir; además, desde el punto de vista teórico, no puede conciliarse con construcciones cuyas dimensiones implosionan o se extienden desmedidamente. Pero es verdad que aún hoy en día es difícil comprender las normas o reglas seguidas por los constructores de catedrales góticas para dimensionar sus obras, aunque algunas indicaciones han sido dadas por Viollet Le Duc y, últimamente, por A. Giuffré; también resultan evidentes las aportaciones de investigadores como L. da Vinci, de La Hire, de Belidor, Couplet, C. Bossut, L. Salimbeni, C. Coulomb, L. Mascheroni y otros que han contribuido a transformar lo que antes se veía como un problema de proyecto en uno de verificación.

ción; el paso del proyecto a la verificación ocupará, de manera más consistente, a los científicos a partir del siglo XIX con los resultados que ya conocemos.

Pero no podemos decantarnos exclusivamente por a favor un análisis desde el punto de vista mecánico. Al contrario; la Historia de la Construcción no se puede interpretar sólo desde el punto de vista de los esquemas estructurales y de los algoritmos matemáticos; ésta, más allá de las construcciones más importantes y significativas de las que se conoce bien su importancia, muestra construcciones realizadas con materiales tradicionales que se presentan de manera muy variada y que, desde el punto de vista mecánico, son muy difíciles de descodificar.

Así, las geometrías que caracterizan las estructuras abovedadas, desde la más sencilla bóveda de arista a las más complejas bóvedas sobre pechinas o claustrales, también son complejas y, un análisis exhaustivo de los existentes en diversas zonas evidenciará la extremada riqueza y variedad de ejemplares. Baste considerar las estructuras abovedadas del sur de Italia. Geometrías que contienen elementos arquitectónicos de indudable valor testimonial que, dadas las condiciones y la consistencia de las estructuras abovedadas existentes, no pueden ser considerados desde un único punto de vista o reducirse a esquemas simples. Éstos no pueden analizarse con algoritmos matemáticos que difícilmente responden al comportamiento real que tienen con respecto a las acciones a las que se someten.

El mismo V. Le Duc, cuando afirma que *no hay superficie, por irregular que sea, que no se pueda cubrir sin dificultad...*, corrobora que las formas arquitectónicas, con una geometría cualquiera, se pueden realizar sin ninguna limitación; dicha afirmación, de hecho, representa la consistencia real de la construcción histórica, pero también, y por derecho, la casi ilimitada posibilidad proyectual que hoy se ofrece a los arquitectos dependiendo de los adelantos que se han logrado en el campo de la ciencia y de la técnica.

También es cierto, como indica Musil, que *en los malos tiempos se pueden hacer casas horribles y horribles poesías siguiendo los mismos y bellísimos principios de los buenos tiempos...*, y esto permite volver a observar los principios, las reglas de la geometría y de las ciencias en general como un universo al que nos podemos referir pero sin tender a una elección que prevalezca instrumentalmente, redu-

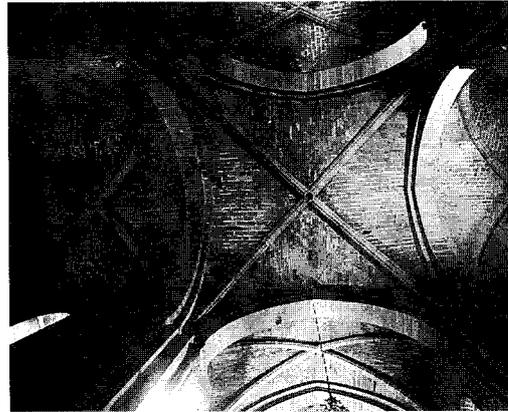


Figura 3

ciendo la complejidad, la riqueza de la construcción histórica.

En la arquitectura histórica, no hay estructuras abovedadas de formas incorrectas y, aunque las hubiera habido, el tiempo transcurrido desde su construcción habría evidenciado el estado precario y las debilidades intrínsecas; las obras históricas que nos han llegado han superado la prueba del tiempo. Tenemos el deber de conservarlas, pero para ello es necesario efectuar una interpretación de las mismas que pueda sacar a la luz las leyes constitutivas que las generaron. En realidad esto avala al hecho de que, aunque los estudios de la mecánica, nueva ciencia introducida por G. Galilei con la finalidad de sustituir la regla geométrica para el dimensionamiento de las estructuras, alcanzaron una gran difusión, el proceso de la Historia de la Construcción tuvo lugar con mayor lentitud, por lo menos en todas aquellas construcciones que marcan el territorio de manera casi sumisa, pero que también contribuyen a comprender mejor la Historia de los pueblos.

Además, frecuentemente, a partir de las mediciones y análisis efectuados en estas estructuras, se descubre que hay una perfecta concordancia entre verificaciones estáticas de tipo gráfico y las realizadas con procedimientos analíticos, lo que confirma que los principios y las reglas de la construcción premoderna no son unívocos y que, si existió el arte de construir, que ha sido sustituido por la ciencia de las construcciones, éste necesariamente debía poseer un repertorio de leyes y reglas que permitían obrar bien. Hay

que hacerse cargo, tarea no de poca importancia, de las leyes y reglas que aún hoy no se han descubierto completamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Arcolao, C.: *Le ricette del restauro*. Ed. Marsilio, Venezia, 1998.
- Crotti, S.: «Il ponte tra retorica e logica», *Casabella*, num. 469, Gruppo Editoriale Electa, Milano, 1981, pp. 10-16.
- D'Anselmo, M.: «The building characteristics of wallings historical edificies», *Atti del III Congresso Internacional de Rehabilitacion del Patrimonio Arquitectonico y Edificacion*, Pardo-Espinosa-Zezza Editori, Granada, 1996, pp. 217-220.
- Di Pasquale, S.: «Fondamenti di meccanica delle murature», in *Il progetto di restauro e i suoi strumenti*. Ed. Il Cardo. Venezia, 1995.
- Fancelli, P.: «Tecnica e tecnologia nell'architettura dell'ottocento», *Atti del quarto seminario di storia delle scienze e delle tecniche*, Istituto veneto di scienze, lettere ed arti, Venezia, 1998, pp. 221-242.
- Giuffrè, A.: *Meccanica delle murature storiche*. Ed. Kappa. Roma, 1998.
- Musil, R.: *L'uomo senza qualità*. Ed. Einaudi. Torino, 1982.
- Pizzetti, G.: Zörgno triscioglio, A. M.: *Principi statici e forme strutturali*. Ed. Utet. Torino, 1980.
- Rondelet, G.: *Trattato Teorico e Pratico dell'Arte di Edificare*. Società Editrice. Mantova, 1834.
- Viollet le Duc, E.: *L'architettura ragionata* (a cura di Crippa M.A.). Jaca Book. Milano, 1982.