

Segunda parte

Inventario de reglas empíricas

5. EL SIGLO XVI

El siglo XVI marca la divisoria entre dos modos estructurales bien diferenciados: el correspondiente a la arquitectura gótica y el clásico, heredero de la tradición romana, que se inició en el Renacimiento. El primero se caracteriza fundamentalmente por el arco apuntado y la bóveda de crucería, en cualquiera de sus modalidades. El segundo por el empleo del arco de medio punto, la bóveda de cañón y la cúpula.

Los métodos de diseño estructural que nos han llegado correspondientes a ambos modos son también diferentes, como veremos más adelante. Simplificando, podríamos decir que los métodos góticos son geométricos y los clásicos se basan en fracciones de números enteros. También podemos afirmar que los primeros son más complejos y sofisticados que los segundos, como corresponde, en general, a estructuras de mucha mayor complejidad y ligereza.

Ambos métodos coexistieron durante el siglo XVI, produciendo una ambigüedad que se hace patente con extraordinaria claridad en el tratado de Rodrigo Gil de Hontañón, donde el autor da con frecuencia la solución al mismo problema siguiendo ambos enfoques.

5.1 Geometría y estructura en el gótico tardío

La enorme riqueza de los procedimientos geométricos góticos aplicados al replanteo y construcción, y al diseño estructural es un descubrimiento relativamente reciente. En 1952, Straub afirmaba en su libro sobre historia de la ingeniería:

...the formulas, and the mathematical and geometrical rules of construction in which the professional experience of the guilds was comprehended, and handed down from master to

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

master, were no doubt mostly concerned with questions of form and composition, and had nothing to do with engineering science proper...¹

Esta idea de que la geometría era empleada por los constructores góticos únicamente con fines decorativos o artísticos, tratando de buscar un ideal de belleza basada en un conocimiento esotérico y misterioso, tiene su origen en los tratados románticos de final de siglo sobre la arquitectura gótica². Los estudios de Frankl³, Ackerman⁴, Shelby⁵ y, sobre todo, de Müller⁶, han puesto de manifiesto que los constructores góticos empleaban también la geometría aplicándola a casos prácticos de replanteo, construcción y diseño estructural⁷.

1. H. Straub *A History of Civil Engineering. An outline from ancient to modern times.* London: 1952, pp. 41-42.

2. Esa fue la tendencia dominante. Hubo, sin embargo, excepciones como el tratado de Ungewitter *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. III Auflage neu bearbeitet von K. Mohrmann.* 2 vols. Leipzig: T.O. Weigel Nachfolger, 1890.

3. P. Frankl "The Secret of Medieval Masons." *Art Bulletin* Vol.27, 1945. pp.46-64, y, *The Gothic: Literary Sources and Interpretations Through Eight Centuries.* Princeton: Princeton University Press, 1960.

4. J. S. Ackerman "Ars sine scientia nihil est". Gothic theory of architecture at the Cathedral of Milan." *Art Bulletin* Vol.31, 1949. pp.84-111

5. Lon R. Shelby "Medieval Mason's Tools, I: The Level and the Plumb Rule." *Technology and Culture* Vol.2, 1961. pp. 127-130; *The Technical Supervision of Masonry: Construction in Medieval England.* Ph.D.: University of North Carolina at Chapel Hill, 1962; "Medieval Mason's Tools, II: Compass and Square." *Technology and Culture* Vol.6, 1965. pp. 236-248; "Setting out the Key Stones of Pointed Arches: A Note on Medieval 'Baugeometrie'." *Technology and Culture* Vol.10, 1969. pp. 537-548; "Medieval Mason's Templates." *Journal of the Society of Architectural Historians* Vol.30, 1971. pp. 140-154; "The Geometrical Knowledge of Medieval Master Masons." *Speculum* Vol.47, 1972. pp. 395-421;y, *Gothic Design techniques: The 15th Century Design Booklets of Mathes Roriczer and Hans Schumttermayer.* Carbondale and Edwardsville: Southern Illinois University Press, 1977.

6. W. Müller "Technische Bauzeichnungen der deutschen Spätgotik." *Technikgeschichte* Vol.40, 1973. pp. 281-300, y "Zum Problem des technologischen Stilvergleichs im deutschen Gewölbebau der Spätgotik" *Architectura*, Vol. 3, 1973, pp. 1-12.

7. Un caso similar ha sucedido con las cubiertas de tracería mozárabes en cuyos intrincados trazados geométricos los historiadores del arte han visto una motivación puramente formal. El desciframiento por Enrique Nuere del manuscrito de carpintería de Lope de Arenas, ha demostrado el sentido constructivo de esos trazados y el empleo de una geometría práctica muy desarrollada para resolver, con gran sencillez, los problemas que plantean este tipo de cubiertas. Véase: E. Nuere *Los cartabones como instrumento exclusivo para el trazado de lacerías.* (Sonderdruck der Madrider Mitteilungen, nº23). Mainz: Verlag von Philipp von Zabern, 1982, y, *La carpintería de lo blanco. Lectura dibujada del primer manuscrito de Diego López de Arenas.* Madrid: Ministerio de Cultura, 1985.

Hasta nosotros han llegado contados manuscritos de la época gótica que contengan información sobre aspectos constructivos o estructurales. La mayor parte de los que se conservan corresponden al gótico tardío. El único manuscrito que ha sobrevivido anterior a la segunda mitad del siglo XV es el de Villard de Honnecourt⁸, alrededor de 1230.

En este marco de referencia, los tres manuscritos españoles del siglo XVI que se conservan y que incluyen reglas estructurales góticas tienen una extraordinaria importancia.

El manuscrito de Rodrigo Gil de Hontañón contiene la más variada recopilación de reglas estructurales aplicables a todo tipo de estructuras: iglesias salón, puentes, torres... La variedad y complejidad de estas reglas convierten a este manuscrito en un caso único dentro de la historia del diseño estructural. Los manuscritos de Martínez de Aranda y Hernán Ruiz contienen sendas reglas cuyas anterior mención correspondía respectivamente a Francia y Alemania, demostrando de esta forma la extraordinaria pervivencia y difusión de estos métodos de diseño estructural. El manuscrito de Vandelvira⁹, aunque de enorme importancia para la historia de la estereotomía, no contiene ninguna referencia sobre reglas estructurales.

8. R. Hahnloser ed. *Villard de Honnecourt*. Viena: 1935. Para un estudio sobre el cambio de mentalidad que propició la aparición de los primeros tratados de tecnología en la segunda mitad del siglo XV, véase Lynn White "Medieval Engineering and the Sociology of Knowledge." *Medieval Religion and Technology. Collected Essays* Berkeley: University of California Press, 1978. pp. 317-338.

9. El manuscrito de Vandelvira, de difícil lectura e interpretación, ha sido descifrado recientemente, con estupendas ilustraciones, por J. C. Palacios Gonzalo *Invencción y convención en las técnicas constructivas del Renacimiento Español: la estereotomía renacentista a través del tratado de Vandelvira*. Tesis doctoral: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura., 1987 Enero. Véase también: S. L. Sanabria "From Gothic to Renaissance Stereotomy: The Design Methods of Philibert de l'Orme and Alonso de Vandelvira." *Technology and Culture*, Vol. 30, 1989, pp. 266-299.

Addenda:

Aunque fuera del ámbito cronológico de la Tesis, y a pesar de que hemos tenido noticia hace apenas unos meses¹⁰, es preciso citar el manuscrito que se conserva en el Archivo Municipal de Zaragoza¹¹ sobre la construcción del llamado Puente de Piedras. El manuscrito recoge documentos y actas sobre la construcción del citado puente, que comienzan a partir de 1401. Se trata del manuscrito más antiguo de esta naturaleza del que tenemos noticia. El códice manuscrito en folio, sin ilustraciones ni dibujos, con cubiertas de pergamino resulta bastante difícil de leer. Afortunadamente se conserva una transcripción parcial de finales del siglo pasado realizada por Herranz¹².

El manuscrito es una mina de información sobre los procedimientos constructivos, materiales, maquinaria etc., empleados en la construcción del puente. Nos interesa la parte en la que se describe la formación de las pilas, pues, las dimensiones que aparecen sugieren el empleo de una regla aritmética sencilla en su dimensionamiento: asignar a cada pila el tercio del vano correspondiente. Los párrafos resultan un poco confusos. Al parecer, según Herranza, existía un antiguo puente del siglo XIII que se derrumbó quedando solamente una arcada. Según el manuscrito este arco era de 99 palmos y su pila de 34 palmos (1/3), y parece deducirse, en el extremo contrario quedaba otra pila de 20 palmos. Restaban por cubrir 456 palmos de río. En el

10. Aparece citado en P. Alzola y Minondo, *Las Obras Públicas en España. Estudio Histórico*. Bilbao: 1899, págs. 80-83.

11. "Manuscrito del Puente de Piedras de Zaragoza." Ms. 47, Archivo Municipal de Zaragoza. Su foliación denota que por lo menos tuvo 104 hojas, reducidas hoy a 99. En la primera página aparece el texto: "Libro comenzado de la manera como el puent de piedra de la Ciutat de Zaragoza se deve comenzar i acabar i de las piedras quantas son necesarias i qual piedra es millor para qualcina i de qual arena era millor para fazer largamasa i de qual pedrera se tallaria la piedra para comenzar i acabar el dito puent."

12. C. Herranz y Laínz, *Fábrica del Puente de Piedras de Zaragoza*. Zaragoza: 1887. in 8º, 64 págs (Archivo Municipal de Zaragoza, 2 F.1-19). Este librito no aparece en la Biblioteca Nacional, ni en ninguna otra de las bibliotecas consultadas en Madrid. Al parecer recientemente María Teresa Iranzo ha realizado una Tesis Doctoral en la Univeridad de Zaragoza sobre el manuscrito, pero no hemos podido confirmar esta información.

informe se barajan dos propuestas. La primera es de tres tramos con su pila correspondiente de 133 palmos (se supone la misma proporción que antes, arco 99 pila 34), quedando un vano de 60 palmos (lo que guardaría también la misma relación, 1/3, con la pila existente de 20). La segunda contempla tres pilas de 30 palmos, dos vanos de 90 palmos, dos vanos de 80 palmos y una pila de 20. La pila de 20 resultaría insuficiente según la susodicha regla. No sabemos si debido a ello, los maestros citados recomiendan construir en ella dos torres defensivas. A continuación el texto del manuscrito según la transcripción de Herranz¹³ :

... Et apres los dos maestros [Maestre Johan de Frenoya y Maestre Colrat] visto almallo el dito puent consellaron sobre la forma como aquell se podia comenzar y acabar sus la forma sigüent.

Primerament trobaron que la ultima arquada feyta del puent de piedra en tal Rio Ebro que ha de tono novante i nueu palmos de canya... Continuando que medida la ampleza del pilar de la dita ultima archada i que trobade Trenta y Quatro palmos de canya ...

... que trobado que del piet zagüero de la buelta zagüera de piedra entró a la puerta del puent ha Quatrocientos cinquante y seys palmos. los quales compartidos en tres arcadas y tres pïedes a rason de cient trenta i tres palmos entre archada y piet vista de tono para la quarta archada del puent sixante palmos.

Maestre Johan de Frenoya y Maestre Colrat conselleron y ordenaron que en la obra del puent de piedra avia necesarias quatro archadas y tres pïedes y otro piet a la puerta de vint palmos. Et que los ditos tres pïedes havian pro de cada trenta palmos de amplo. Et las primeras dos arcadas consegutivas al puent de piedra cada novante palmos de tono. Et las otras dos cada huytante palmos de tono i que les parecia que en el piet de la puerta de vint palmos que por bel parecer de la hobra se deviesse prender en tal manera que hi pudiesen seyer feytas Dos torretas una de cada part que serian delant la puerta del dito puent.

5.2 Rodrigo Gil de Hontañón

Rodrigo Gil de Hontañón es quizás uno de los arquitectos españoles más prolíficos y versátiles del siglo XVI. Durante su carrera vivó el último florecimiento del gótico y el nacimiento y desarrollo de la arquitectura

13. Op. cit. págs. 16-17.

renacentista en España. Hijo de un conocido maestro constructor gótico, Juan Gil de Hontañón, su familia fue de constructores durante varias generaciones. Por tanto heredó la tradición constructiva gótica, lo que no le impidió asimilar el nuevo vocabulario arquitectónico, siendo también uno de los principales maestros del plateresco.¹⁴

En su trabajo combina las fórmulas geométricas góticas con formas renacentistas. Otras veces emplea las reglas proporcionales simples o fórmulas algebraicas, características del Renacimiento, para dimensionar sus iglesias góticas.

5.2.1 El Tratado de Arquitectura de Rodrigo Gil de Hontañón

El tesoro de experiencia acumulada, procedente de la tradición gótica, y sus propias observaciones y reglas, quedaron registradas en un Tratado manuscrito que no llegó a publicar. No se conserva el original que aparentemente permaneció en la fábrica de la catedral de Salamanca. Antes de desaparecer fue copiado en 1681 por Simón García, que lo incluyó en su *Compendio de Arquitectura y Simetría de los Templos*¹⁵, formando los seis primeros capítulos; también se le atribuyen una ilustración al final del capítulo 16 y el capítulo 75.

14. La mejor monografía hasta la fecha sobre Rodrigo Gil es la de John Hoag Rodrigo Gil de Hontañón. Gótico y Renacimiento en la Arquitectura Española del Siglo XVI (Madrid: 1985), basada en su Tesis Doctoral para la Universidad de Yale "Rodrigo Gil de Hontañón: his work and writing. Late medieval and renaissance architecture in sixteenth Century Spain" (Yale University: 1958). Existe también una Tesis de la Universidad de Salamanca sobre Rodrigo Gil, leída por el Profesor Casaseca en 1979(?).

15. El texto manuscrito se conserva en la Biblioteca Nacional, Madrid, Ms. 8884. Consta de 141 folios y está dividido en 77 capítulos. Fue publicado por primera vez por Eduardo Mariátegui, El Arte en España, Vol. 7, 1868: 113-127; 154-184 y 193-215. Esta publicación recoge la parte que, como indica el propio Simón García, pertenecía a un texto de Rodrigo Gil de Hontañón. En 1941 apareció una reedición con prólogo de José Camón Aznar, publicada por la Universidad de Salamanca. La única edición completa del manuscrito es la preparada por Carlos Chanfón, Churubusco, México: 1979. Contiene un estudio introductorio, una reproducción facsímil de no muy buena calidad y una transcripción que es la que he utilizado fundamentalmente en la redacción de este capítulo.

La fecha del manuscrito original de Rodrigo Gil sólo puede deducirse a partir de referencias internas; basándose en éstas, Sanabria¹⁶ lo sitúa entre los años 1544 y 1554.

El manuscrito trata de diferentes aspectos sobre la composición de los Templos, tratando de establecer sus proporciones y dimensiones correctas. El método empleado por Rodrigo Gil es muy sistemático.

En primer lugar calcula la superficie que ha de tener la iglesia, en función del número de habitantes, el tamaño de la sepultura y de una previsión del crecimiento de la población¹⁷.

Conocida la superficie, pasa a determinar las trazas generales del templo, la malla geométrica en la que se sitúan pilares, paredes y contrafuertes. Para ello emplea dos métodos: uno clásico, basado en la doctrina de las proporciones del cuerpo humano de Vitruvio¹⁸, y otro gótico mediante trazados geométricos. Al primero lo denomina 'por analogía', al segundo 'por ieometría'. Por último, aplica una serie de reglas o fórmulas para dimensionar los elementos estructurales: pilares, contrafuertes, bóvedas y torres.

Esta última parte es lo que convierte el manuscrito en una pieza única. En ningún otro manuscrito o tratado de los examinados aparece de una manera tan consciente la separación de la estructura del resto de los elementos que componen el edificio¹⁹. Las reglas estructurales son completamente independientes del proceso de diseño de las trazas generales y constituyen probable-

16. Sergio Luis Sanabria "The Mechanization of Design in the 16th Century: The Structural Formulae of Rodrigo Gil de Hontañón", *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 41, 1982, p. 283.

17. Simón García *Compendio...*, Cap. 2, fol. 3v.

18. Así Rodrigo Gil dice, citando a Vitruvio Libro III, cap. I: ...que los edificios fueren repartidos por el menor mundo que era el cuerpo del hombre, porque en el allavan todas las razones y medidas de machinas organicas, y en el hallaron dos cuerpos regulares, que es el cuadrado y el redondo... y para dar reglas y razones del uso midieron el dicho cuerpo... (Simón García *Compendio...*, op. cit. fol. 1r.).

19. Comparéense por ejemplo con las reglas estructurales contenidas en el manuscrito de Lorenz Lechler, 1516, del gótico tardío alemán: Lon Shelby y R. Mark "Late Gothic Structural Design in the 'Instructions' of Lorenz Lechler." *Architectura* Vol. 9, 1979. pp. 113-131

mente el primer intento documentado de crear una 'ciencia' independiente para el diseño de estructuras (aunque su base no sean los principios de la mecánica sino la experiencia acumulada y la observación del comportamiento de las estructuras existentes o en construcción).²⁰

Entre las reglas estructurales de Rodrigo Gil podemos distinguir dos grupos fundamentales:

- 1) fórmulas particulares que se refieren a una tipología determinada, las iglesias salón del s. XVI.
- 2) fórmulas generales que tratan de investigar la dimensión de los contrafuertes de un arco cualquiera.

Creemos que es importante realizar esta distinción a diferencia de Kubler y Sanabria que las estudian juntas. La posición dentro del manuscrito y, sobre todo, los distintos fines, práctico en el primer caso y de investigación el segundo, justifican esta división.

5.2.2 Dimensionamiento estructural y construcción de las Iglesias Salón

En el siglo XVI, en España, son pocas las iglesias parroquiales que no hayan sido concebidas como iglesia salón tres naves.

El sistema estructural es notablemente diferente del empleado en las Catedrales Góticas Europeas de los siglos XIII y XIV. Se caracteriza por tener las naves de la misma altura y por cubrir los tramos mediante bóvedas cupuliformes, muy semejantes a bóvedas vaídas. Así, el extradós en vez de presentar unas claras líneas de coronación donde se sitúan las claves, como ocurre en el gótico de los siglos XIII y XIV, muestra una sucesión de super-

20. Sobre las reglas estructurales de Rodrigo Gil existen dos trabajos fundamentales: George Kubler "A Late Gothic Computation of Rib Vault Thrusts", *Gazette des Beaux-Arts* (1944): 135-148, y Sergio Luis Sanabria "The Mechanization of Design in the 16th Century: The Structural Formulae of Rodrigo Gil de Hontañón" *Journal of the Society of Architectural Historians* (1982): 281-293.

ficies cupuliformes que, naciendo de los riñones de los arcos perpiaños, alcanzan su máxima altura en la clave de los arcos cruceros.

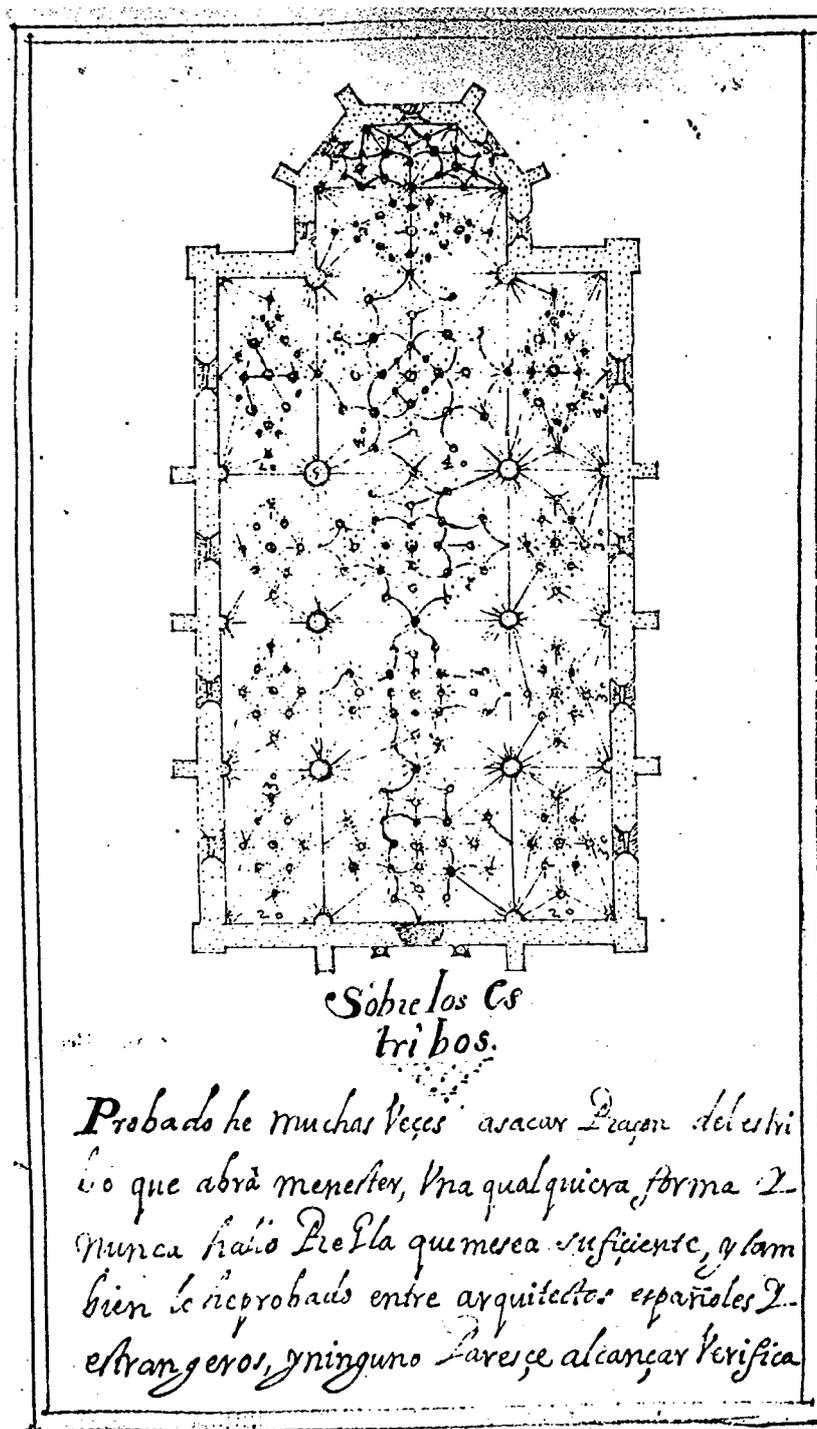


Figura 5.1. Iglesia salón. La planta de la figura es el resultado de la aplicación de los métodos geométricos y aritméticos de Rodrigo Gil. Tanto las trazas como las dimensiones de los elementos estructurales (pilares, muros, contrafuertes, claves y nervios de las bóvedas) están determinadas utilizando sus reglas.

Las razones que da Rodrigo Gil para fundamentar su preferencia por esta tipología son estrictamente estructurales y las expone en distintos lugares de su manuscrito:

... yendo así a un alto es el edificio mas fuerte porque todo se ayuda uno a otro lo qual no hace quando la principal sube mas, porque es menester que desde la colateral se le de fuerza a la maior y desde la ornacina a la colateral lo qual se da con arbotantes y a este que no se puede subir a un alto o por menoridad de gastos, ²¹ por las luces que se fueren a un alto no se le podrían dar que gozabe mas de la una nave.

El estribo no tan solo sustenta a el arco de su capilla, mas tambien al arco de la colateral y de la maior, las quales si fueren echas a un alto audale mucho el arco de la una a la otra, como el de la colateral a la maior. Mas si fuese mas baja la colateral que la maior ²² el pilar sobre la que carga es menester mas grueso que quando ba la una al peso de la otra.

La terminología, método de construcción y reglas estructurales que veremos a continuación, son aplicables preferentemente a este tipo estructural. La exposición se desarrolla en el capítulo 6 "Sobre los Templos y sus Alturas con Reglas Generales", en la forma de un ejemplo de aplicación. La exposición de Rodrigo Gil es sistemática: primero define las trazas generales de la planta, después las alturas correspondientes a naves y bóvedas. Definida la geometría general del templo pasa a dimensionar los elementos estructurales. La exposición no está exenta de repeticiones y la hemos sistematizado en los siguientes apartados. Al final de la misma Rodrigo Gil nos da la planta definitiva del Templo.

5.2.3 Elementos y construcción de una bóveda vaída nervada

Rodrigo Gil da una terminología muy precisa de los elementos que componen la bóveda que cubre un tramo tipo de iglesia salón, y describe el proceso seguido en su construcción.

21. Simón García "Compendio...", Cap.3, 8v.

22. *Ibíd.*, Cap.6, 21r. Rodrigo Gil tiene razón en este punto. Para un análisis extenso de la influencia de las alturas y luces de las naves laterales sobre los pilares centrales, realizando comparaciones entre distintas Catedrales góticas españolas y europeas, véase Juan Rubió y Bellver "Conferencia sobre los conceptos orgánicos, mecánicos y constructivos de la Catedral de Mallorca." Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña (1912): 121-132.

Los elementos que componen una bóveda de crucería que cubre un tramo de iglesia salón son: los arcos cruceros u ogivales, que atraviesan diagonalmente el tramo; los arcos de forma, embebidos en las paredes laterales; los arcos perpiaños (perpiaños) o transversales, que cruzan el tramo paralelamente a las direcciones principales; los terceletes, que subdividen la bóveda entre los anteriores, y las claves.

Rodrigo Gil da gran importancia al problema de la construcción y presenta, quizá la mejor exposición del procedimiento seguido en el levantamiento de una bóveda de crucería:

Y por que esta materia que tanto importa, quede bien esplicada y exemplicada, pondré a la buelta una demostracion, en que se entienda esto quanto me sea posible, aunque estas cosas, podran ser difiçiles de comprehender faltando en quien las procura la experiencia, la practica, la profesion de la canteria, y la execucion, o el aberse allado presente a algunos çierres de cruçeria, para haçerse capaz en el asiento de ella...²³

Para explicar el proceso de construcción Rodrigo Gil realiza un dibujo, simultáneamente en planta y sección, donde aparecen un arco crucero, los jarjamentos o arranques, y las claves primarias y secundarias. El procedimiento es el siguiente:

- 1) sobre los riñones de la bóveda, un poco por encima del nivel de los arranques, línea S en la figura, se construye una plataforma.
- 2) se dibuja sobre ella la traza completa de los nervios de la bóveda, es decir, la montea.
- 3) se colocan sobre ella cimbras, para los nervios, y tornapuntas de madera que sitúan las claves.
- 4) se construyen los nervios.
- 5) se construye la plementería entre los nervios.

23. Simón García *Compendio...*, Cap. 6, fol. 24r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Esta descripción confirma el papel auxiliar, de cimbra, de las nervaduras góticas²⁴. El examen del trasdós de las bóvedas góticas apoya esa teoría ya que cada plemento, porción de bóveda entre nervios, no sigue la curvatura general de la bóveda sino que presenta un pequeño abovedamiento que indica que éstos fueron construidos independientemente apoyándose en los nervios del borde²⁵.

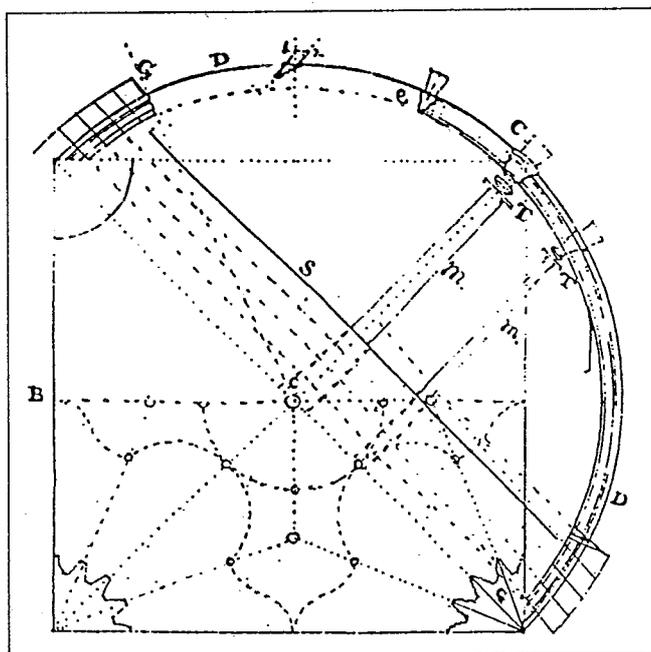


Figura 5.2. Elementos de una bóveda nervada. El dibujo corresponde al tratado de Rodrigo Gil (fol. 25 recto) y en él aparece dibujada la monte de una bóveda de crucería con todos sus elementos en una interesante representación combinando planta y sección.

24. Desde que en el siglo pasado Viollet-le-Duc expuso su teoría "funcional" sobre las estructuras góticas en su *Dictionnaire Raisonné...*, Paris: 1854-1868, ha existido un animado debate sobre el particular. Para un resumen del estado de la cuestión hasta los años cuarenta véase G. Kubler *A late gothic computation...*, op. cit., pp. 135-138. En España Torres Balbás se interesó por el debate, ver por ejemplo "Función de Nervios y Ojivas en las Bóvedas Góticas.", *Investigación y Progreso*, Vol. 16, 1945, pp. 214-31, y "Las teorías sobre la arquitectura gótica y las bóvedas de ojivas." *Las Ciencias* Vol. 4, 1939, pp. 223-233. Convencido del papel auxiliar de las nervaduras explora esta posibilidad en la construcción Romana: "Bóvedas romanas sobre arcos de resalto." *Archivo Español de Arqueología*, Vol. 64, 1946, pp. 173-208. El tema continúa despertando interés: R. Mark "Robert Willis, Viollet-le-Duc and the structural approach to gothic architecture." *Architectura*, Vol. 7, 1977, pp. 52-64.

25. Nos llamó la atención sobre este punto las observaciones realizadas por Frézier, *Traité de la coupe des pierres...*, op. cit., vol. 3, pp. 24-31., 'Des voûtes d'arêtes gothiques': "...les doëles des Voûtes d'arêtes Gothiques, sont très rarement des portions de surfaces cylindriques,..., mais chaque Pandentif est une portion triangulaire d'un espece de Sphéroïde irrégulier, dont la surface se courbe depuis sa naissance insensiblement,... de sorte que chaque Pandentif est une surface à double courbure..."

Por último, Rodrigo Gil aconseja que las claves, primarias y secundarias, vayan perforadas longitudinalmente. Estas perforaciones servirían para colgar lámparas y retirar los encofrados una vez terminada la bóveda.

5.2.4 Pilares y contrafuertes

Tras haber establecido las proporciones generales del templo (relación entre las medidas de las naves y entre éstas y la altura), Rodrigo Gil enuncia sus fórmulas estructurales para dimensionar los pilares y contrafuertes de una iglesia de las proporciones dadas:

Pues que se ha tratado del repartimiento, y de todos sus interbalos sera bien tratar de la grosseza de los pilares, y salida de los estribos, para que todo quede medido y proporcionado.²⁶

Rodrigo Gil suministra, como hemos visto, al final de todo el proceso la planta de la iglesia (Figura 5.1.).

5.2.4.a Pilares

La fórmula permite obtener el diámetro del pilar en su base. Dado que en esta época los pilares suelen ser cilíndricos éste es el parámetro más representativo. Lo obtiene en función de las dimensiones de la nave mayor y la altura hasta el arranque de los arcos:

Pues bolbiendo a tratar de la grosseza de los pilares digo, que se tomen los pies que tienen por el ancho la nave maior que son 40 y 30 que tiene la capilla de avajo, y sumense y serán 70, junto con estos 70 lo que a de subir esta columna, que son 40 pies, y serán 110, la raíz quadrada de 110 serán 10 y 10/21 abos. Su mitad son 5, 5/21 abos, tanto tenga de diametro la tal columna por la parte de abajo, y esto es lo mas cercano a raçon.²⁷

Si expresamos la fórmula en términos algebraicos tomará la siguiente forma:

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{H + L + A}$$

donde: D = diámetro del pilar
H = altura de la nave
L = luz de la nave
A = longitud tramo

26. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 17r.

27. *Ibidem*.

5.2.4.b Contrafuertes

Para hallar el valor del canto del contrafuerte utiliza una compleja fórmula que implica calcular las longitudes de los nervios que acometen en el estribo. Luego divide este número por tres y le suma la altura de la nave hasta las impostas de los arcos. Extrae la raíz cuadrada y obtiene un número del cual la tercera parte es el ancho y las dos terceras partes el canto del contrafuerte:

Para saber la salida del estrivo, toma los pies de circunferencia que tienen todos los miembros que acuden al estrivo, esto se entiende la mitad de cada miembro que es en los terçetes hasta las claves, y los cruçeros asta la clave maior, y el arco asta su mitad, y esto se sume todo junto y de la suma saca la terçia parte; que es lo que rova el molde ordinariamente, la terçia parte y si mas o menos robare, sacalo a el respecto de como fue-re; y esto se reste de lo que montó la suma de lo otro. Echo esto mira lo que sube el estrivo y lo que fuere juntalo con la suma de lo que quedó la resta; de esta saca la raiza quadrada, y lo que saliere a la raiz se parta en tres partes, la una tendra de ancho ²⁸ el estrivo, y las otras 2 tendra de largo con el medio pilar y pared y salida de estrivo.

A continuación realiza los cálculos, paso a paso, para las dimensiones del ejemplo, y afirma que este valor del contrafuereete en su parte superior es el que puede resistir, si bien el 'artifice' puede añadir algo para mayor seguridad:

... y esto es lo que podra sustentar lo que embotan los arcos. Aqui podra el artifice añadirle un poco mas, porque mas ²⁹ hale que llebe de mas que de menos; pero esto es lo que podra susten-tar como queda dicho.

Esta fórmula aparece citada otras dos veces en el manuscrito en distin-tas partes³⁰, por lo que Rodrigo Gil parece considerarla como una regla de uso común y muy segura, como el mismo afirma en el propio capítulo 6, fol. 22r y 22v:

28. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 17v.

29. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 18r.

30. La aplicación de esta fórmula aparece por primera vez en el capítulo 2 donde expone varios ejemplos de dimensionamiento de templos. Aplica la fórmula de corrido como algo de práctica habitual (Simón García Compendio..., Cap.2, fol. 5r.). Aparece de nuevo citada al final del Cap. 6, fol. 22r y 22v.

Pues queriendo buscar la intrinseca raçon, y la irreprobable causa, combendra mirar la manera de la montea que tal templo tiene, y que miembros ofenden a el tal estrivo... y açiendo todas las circunstancias arriva dichas quedará fuerte, seguro y ermoso, como le toca...

Si expresamos algebraicamente esta regla toma la forma:

$$C = \frac{2}{3} \sqrt{H + \frac{2}{3} \Sigma N}$$

donde: C = canto del contrafuerte en su parte superior
 H = altura del contrafuerte
 ΣN = suma de la mitad de las longitudes de los nervios que acometen al contrafuerte

Como es natural la fórmula también permite calcular los contrafuertes de lo tramos extremos.

5.2.5 Nervios y claves

Tras haber dado reglas para dimensionar pilares y contrafuertes, pasa a considerar los elementos que considera estructurales en las bóvedas: claves y nervios. Estos deben tener las dimensiones correctas porque de no ser así la bóveda puede colapsar y este colapso se produce en general por la insuficiente estabilidad de la bóveda en el momento del descimbramiento.

Por quanto bemos que en las capillas que açen de cruçeria, es bien que se sepa la grandeça que an de tener las claves, y que gruesos los miembros, por quanto bemos que muchas se arruinan, o por ser las claves mui pesadas, mas de lo que los miembros pueden sustentar, o por ser tan libianas que la gravedad de los miembros, las lebantan y açen sentimientos. Y diçen aberse apartado las paredes, lo qual es falso, porque la pared no la puede el casco de la capilla apartar, por mala que sea la montea.³¹

A continuación dice que, en ocasiones, son los tejados los que cargando sobre las bóvedas o empujando contra las paredes son los causantes de la ruina; aconseja que estos lleven tirantes y que los muros sean los suficientemente altos como para que las armaduras no afecten a la bóveda. (El aumentar la altura de los muros tiene, además, el efecto beneficioso de centrar más la carga en su interior.)

Los tejados suelen algunas veces cargando sobre las claves ofender, por la carga que tienen; otras veces suelen ofender, estrivando contra las paredes, los cuales perjuicios se evitan,

31. Simon García Compendio..., Cap. 6, fol. 22v.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

con subir las paredes tan altas como la clave maior, de manera que los tirantes, no carguen sobre las claves, ni casco.

5.2.5.a Nervios

Da una regla general para obtener el canto de los nervios, diferenciando unos de otros en función del trabajo que realizan. Para ello realiza una analogía con los dedos de la mano: el arco perpiaño es el pulgar, los terceletes están representados por el índice y el anular, el crucero por el corazón y el de forma por el meñique.

Pues para tener regla general (que es lo que pretendemos) se entenderá que el dedo pulgar, se tenga por el arco; y el índice, y el anulo por terceletes, y el de en medio por crucero, y el auriculi, por forma; y para saber que proporcio tengan estos con la mano, son la mitad de las onzas de estos dedos, que es el largo de la uña.³³

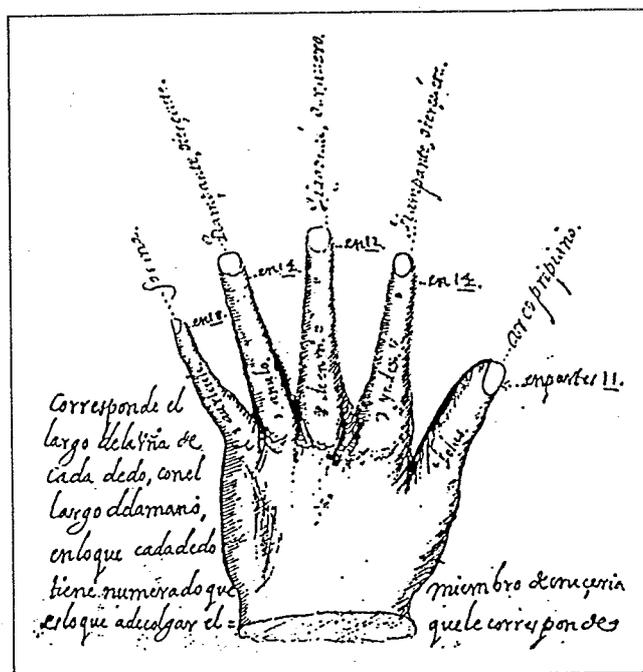


Figura 5.3. Relación de analogía entre los dedos de la mano y los nervios.

32. Ibídem.

33. Simon García Compendio... , Cap.6, fol. 23r.

Basándose en estas proporciones y tras dividir por dos, porque 'una mano mide lo mismo que un rostro y en una nave caben dos rostros' obtiene las proporciones para cada uno de los nervios para la bóveda de un tramo. La aplicación de las proporciones es un poco forzada y parece como si Rodrigo Gil hubiera buscado una forma de adaptar unos valores conocidos al sistema de las proporciones del cuerpo humano. Estas proporciones son las siguientes para un tramo cuadrado de luz L:

- arco perpiaño $1/20 L$
- arco crucero $1/24 L$
- terceletes $1/28 L$
- arco de forma $1/30 L$

Como veremos estos valores se aproximan bastante a un diseño 'óptimo' o de 'mínima cantidad de material' para estos elementos³⁴. Las hemos expuesto en forma algebraica, en el tratado aparecen, como todas las reglas, discursivamente:

...partiendo lo largo o lado de la capilla en 20 partes una sera el alto del arco pripiaño, y que el largo partido de este lado en 24 partes, una sera el alto del crucero. Y el terçetele una $\frac{28}{36}$, y la forma una de 30. Y de esta manera serán proporcionados, segun lo que trabaja cada uno.

Rodrigo Gil especifica que esta es la fórmula para cuando la altura de los pilares es igual a la luz del tramo; si esta altura es mayor o menor se aumentará o disminuirá el canto de los nervios en la misma proporción. Es preciso también realizar una corrección si la montea, la altura de la bóveda en relación con la luz, fuera más rebajada ('a paynel') de lo normal:

34. Curiosamente las proporciones coinciden bastante bien con las suministradas por Lechler en sus 'Instrucciones', para las bóvedas del gótico tardío alemán. Véase: L. Shelby y R. Mark "Late Gothic structural design in the 'Instructions' of Lorenz Lechler", op. cit., p. 126.

35. Simón García *Compendio...*, Cap. 6, fol. 23r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Adbiertase que esta regla damos, subiendo la capilla de pie otro tanto como tubiera por lado, y si mas subiera se le añada por regla de 3. Y si menos se le disminuia. No obstante que si la montea fuera a paynel por la mesma regla de 3 se le acreçiente segun bajare.

En el caso de que los lados del tramo fueran desiguales se tomará para realizar el cálculo de los nervios la media aritmética de ambas cantidades:

Si fuera perlongada no se toma, el lado maior, ni el menor mas juntese, y partase por medio. Y de aquello se saque esta regla. Exemplo: supongo ser una capilla que tiene por un lado 20 y por otro, 30, juntos son 50. La mitad son 25. Pues de esto se a de sacar y repartir lo dicho.³⁷

Se trata evidentemente de una regla usada con frecuencia en la práctica pues se ha matizado su aplicación para los casos particulares más usuales. Veremos más adelante que, tanto la diferente proporción de los nervios, como las citadas matizaciones tienen una base estructural cierta.

5.2.5.b Claves

Ya al empezar a hablar del dimensionado de los elementos estructurales de las bóvedas Rodrigo Gil destacó el importante papel que juegan las claves. Al estudiar en la Primera Parte de este trabajo los arcos apuntados vimos que la clave ayuda a estabilizar los arcos apuntados y es un elemento esencial en las estructuras ojivales. Para proceder a su dimensionamiento distingue entre los elementos que 'sustentan' y los que 'son sustentados'. Las claves que pertenecen a esta última clase son, lógicamente, las que ayudan a estabilizar los arcos.

En las claves se an de entender los miembros que sustentan y los que son sustentados. Porque los que son sustentados se an de restar de los que sustentan conoçese en que los que sustentan, naçen de los jarjamentos, y los que son sustentados naszen de las claves. Tambien ay claves que sustentan; y otras que son sustentadas, las que estan en el arco del cruzero, o terçelete, son sustentadas. Y las que estan en los ultimos fines de los arcos de los terçeletes, o cruzero, sustentan todas.

36. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 23v.

37. *Ibídem.*

38. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 24r.

A continuación da una fórmula para determinar el peso de la clave mayor de una bóveda de crucería:

Pues queremos saber una capilla que tiene de lado 20 pies, tiene de cruceño 28 pies, tiene por circunferencia 44. Y otros 44 del otro arco cruceño, son 88 pies. Resta lo que es sustentado como el rampante, y allo en sus 4 medios 12 pies. Quitados de 88, quedan 76. De esto saca raíz quadrada, y bienen a la raíz 8 pies y 12/17 abos. Si pesase quintal el pie de cruceño, la clave maior pesa 8 quintales y 12/17 abos de quintal.

Podemos expresar esta fórmula algebraicamente de la siguiente forma:

$$Q = P \sqrt{\Sigma R - \Sigma S}$$

Q = peso de la clave (quintales)

P = peso cruceños (quintales/pie)

ΣR = longitud el.sustentantes (pies)

ΣS = longitud el.sustentados (pies)

5.2.6 Torres

Como hemos dicho las anteriores fórmulas aparecen todas ellas en el capítulo 6 donde se muestra su aplicación en base a un ejemplo de iglesia salón de tres naves. En el capítulo 2 aparecen citadas otras fórmulas que permiten dimensionar otro elemento esencial de este tipo de iglesias: las torres.

Rodrigo Gil da dos reglas: una para dimensionar el espesor de la pared y otra para dimensionar el canto de los contrafuertes en su coronación. Estas fórmulas aparecen citadas en uno de los ejemplos que da en este capítulo sobre 'medidas de los templos':

Considerese mas que en este templo ha de aber dos torres que tienen 30 pies cada una por lado, por causa de los fuertes vientos, y el sitio de templo estar en alto, se quatro duple, porque el viento no le empezca con furia, que sumado haze 120.

39. *Ibidem*.

40. Simón García Compendio..., Cap. 2, fol. 5v.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Así pues, Rorigo Gil era muy consciente del papel estabilizador de las pesadas torres del gótico tardío español. A continuación expone las fórmulas para el dimensionamiento de la pared:

Para saber que groseza tengan las pilades por lo alto de arriva, serán de estos 120 pies la raíz quadrada. Su mitad será lo que cave a cada grueso de pared la qual raíz son $11\frac{1}{4}$ pies. Por manera que puesto en el angulo le viene los 5 $\frac{1}{2}$. Y así a los otros angulos...

y del contrafuerte:

...para el estrivo se parte la suma de toda la altura en que a estas torres, se les da otros 30 pies Para agujas y remates, que todo suma 150 cuya raíz quadrada son 12 pies y $\frac{1}{4}$ su mitad es $6\frac{1}{2}$; tanto le cabe al estribo, y esto a de tener quando sea en lo ultimo de la cornija.

Dándole expresión algebraica obtenemos, siendo H la altura de la torre, A su anchura ($H = 4 A$), y E y C los espesores de la pared y el contrafuerte respectivamente en la coronación de la torre:

$$E = \frac{1}{2} \sqrt{H}$$
$$C = \frac{1}{2} \sqrt{H + A}$$

A continuación hace una alusión muy interesante a una matización que hacen a esta regla otros 'arquitectos y arismeticos', diciendo finalmente que esta regla es la mejor de las que 'están escritas'. Esto hace suponer que estas reglas no son un capricho de Rodrigo Gil sino que tenían una amplia difusión entre los constructores del gótico tardío español, constituían el procedimiento habitual de dimensionamiento y, además, estaban publicadas⁴³:

Tambien otros diestros arquitectos y arismeticos, añaden a este alto de los estrivos la semicircunferencia que tiene la media naranja que lo çierra en lo supremo, que en esta traça propuesta le sale 23 pies escasos que juntos con 150, açen 173. Su raíz son 13 y $\frac{4}{31}$ abos su mitad son $6\frac{1}{4}$ y medio poco mas. Y esta es una de las mas llegadas A raçon de las que se allan escritas.

41. *Ibídem.*

42. *Ibídem.*

43. Quizá se refiera a las reglas sobre torres de Alberti. Son las únicas que conocemos publicadas con anterioridad al manuscrito.

44. Simón García Compendio..., Cap. 2, fol. 5v y 6r.

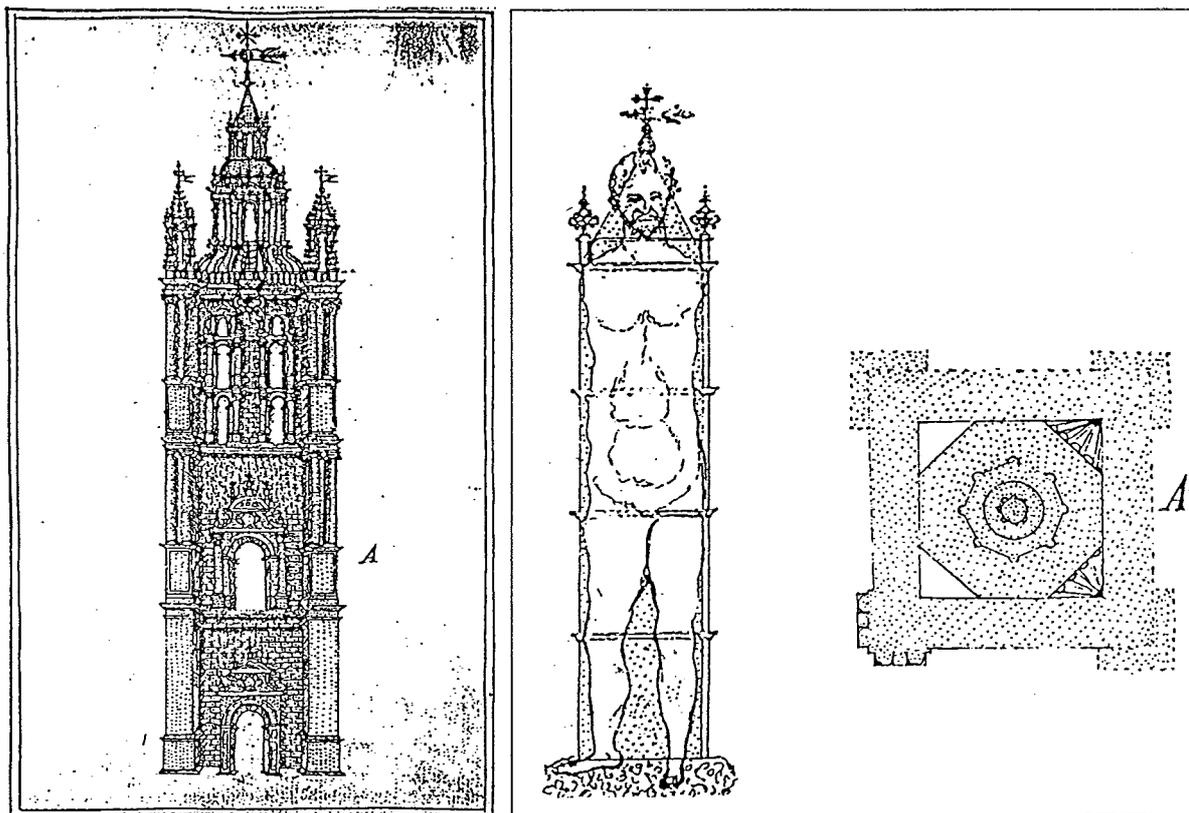


Figura 5.4. Diseño y proporción de torres

Para confirmar el empleo de esta regla por Rodrigo Gil es interesante el Cap. 75 "En que se ponen unas condiciones generales para proseguir un edificio arruinado"⁴⁵. En realidad, se trata de un pliego de condiciones para la construcción de una nueva torre en el emplazamiento de una antigua en ruinas. El alzado de la torre aparece en los fols. 9v y 10r, Figura 5.4. La descripción es sumamente minuciosa y, evidentemente, se trataba de una obra existente. Lo que nos interesa es que los gruesos dados a muros y contrafuertes coinciden con los resultantes de aplicar las reglas anteriores:

45. Simón García *Compendio...*, fols. 135r-137r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

...tendran las paredes 5 pies de grueso en su macizo supremo, y abran disminuido en los dichos 120 pies en cada cornija de cada cuerpo, $\frac{2}{3}$ de pie, de manera que començaran con 7 y acabaran con 5. Así mesmo los 2 estrivos al dicho alto quedaran en 7 pies y abran disminuido lo que las paredes, y segun arismeticos es su propia mensura.⁴⁶

La torre tiene de altura 120 pies, hasta la cornisa y 40 pies de ancho. Aplicando las fórmulas anteriores obtenemos los siguientes espesores: para la pared 5.4 pies y para el estribo 6.4 pies. Rodrigo simplemente ha redondeado estos números a pies enteros.

5.2.7 Investigación sobre los contrafuertes: contrafuertes para un arco cualquiera

El conjunto de fórmulas anteriores permite dimensionar los elementos estructurales fundamentales en una iglesia salón cubierta por bóvedas nervadas (pilares, contrafuertes y nervios), así como los de sus torres (paredes y contrafuertes). Se aplican por tanto a un tipo determinado de edificio.

Las reglas que veremos a continuación forman un apartado del Tratado titulado 'Sobre los estribos', al que se puede añadir una anotación suelta en el cap. 16.⁴⁷ En su conjunto presentan el aspecto de ser el resultado de una investigación empírica realizada por Rodrigo Gil sobre el problema de hallar el estribo necesario para un arco cualquiera. Las distintas propuestas presentan una clara evolución en el sentido de su grado de complejidad y generalidad, por lo que es de suponer que reflejan un trabajo desarrollado durante bastante tiempo. Como veremos la exposición y el análisis estructural de estas reglas sugiere el empleo de modelos.

Rodrigo expresa su profundo interés por el tema y su descontento con el estado de la cuestión en su época, al comienzo del apartado:

46. Simón García *Compendio...*, Cap. 75, fol. 136r.

47. Simón García *Compendio...*, Cap. 6, fol. 18r-21v, y Cap. 16, fol. 59r.

Probado he muchas vezes a sacar Raçon del estribo que abrá menester una qualquiera forma y nunca hallo regla que me sea suficiente, y tambien le he probado entre arquitectos españoles y estrangeros, y ninguno parece alcançar verificada regla, mas de un solo albedrio; y preguntando por que sabremos ser aquello bastante estribo, se responde por que lo a menester, mas no por que raçon. Unos le dan el $\frac{1}{4}$ y otros por ciertas líneas ortogonales lo hacen y se osan encomendar a ello, teniéndolo por firme.

Expondremos a continuación las fórmulas en orden de aparición dentro del manuscrito.

5.2.7.a Reglas 1 y 2. Relación entre contrafuerte y carga

Las dos reglas siguientes permiten obtener el canto de un contrafuerte que sostiene un arco de medio punto, el cual soporta una pared de altura dada.

Regla 1.

La regla adopta la forma de una receta a seguir paso a paso⁴⁹. La construcción geométrica aparece explicada por etapas en la Figura 5.5.

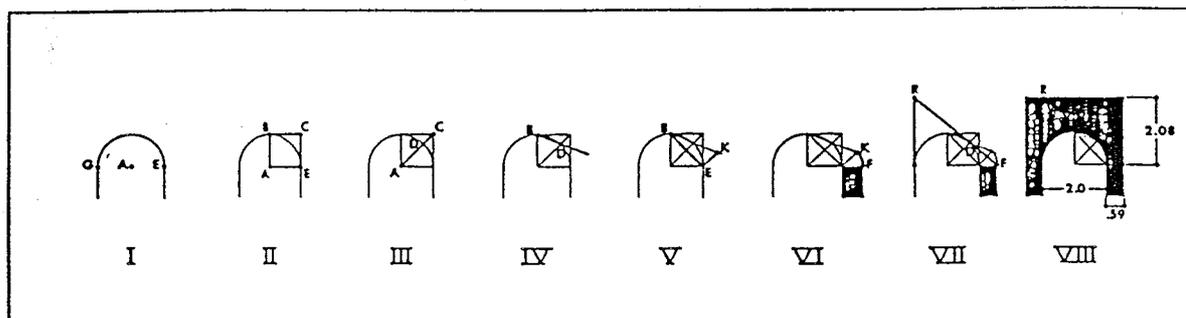


Figura 5.5. Regla geométrica n°1 para un arco de medio punto.

48. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 18v-19r.

49. "Formada la manetud del arco que supongo ser á medio punto, en el medio del dicho arco, que es un $\frac{1}{4}$ de circulo, forma un quadrado de lados yguales, como la figura siguiente muestra, y desde A, que es el centro del arco y angulo del quadrado, tira una línea asta el angulo C, y donde se crusa esta línea con la buelta del arco que será en D, pon la regla y en el angulo B, y pasa esta línea recta a la larga oculta, pues aora tira desde B hasta E otra línea, y del angulo E saca una ortogonal que aga angulo recto con la línea ABE, y mira adonde se crusa con la línea BD y allaras que en K, y teniendo quedo en E, mira donde alcanza en el diametro AE y allaras que en F; pues dirás que aquello es lo que toca quanto a regla a el tal arco de estribo. Y si quisieres saber que tanta carga se le podra encomendar a el tal arco con el dicho estribo, saca una línea perpendicular por la eleccion del pie derecho, paralela con el hueco del dicho arco, como muestra la línea GM, pues asienta la regla en FD y mira donde corta la línea GM, y allarás que en el punto R; pues pasa una línea trasbersal a nibel que cause angulo rcto con la línea GM..." Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 19r y 19v.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Se trata de obtener los puntos R y F que definen el canto del contrafuerte y la altura de carga. El reconocimiento de que ambas variables están relacionadas es importante, si bien la construcción produce unas relaciones fijas, que podemos expresar algebraicamente de la siguiente forma⁵⁰, siendo R el radio del arco, L = 2R la luz, E el canto del contrafuerte y Q la altura de carga:

$$E = (2 - 2) R = 0.586 R$$

$$E/L = 1/3.414$$

$$Q = (2/3 + 2) R = 2.081 R$$

La construcción le parece a Rodrigo tener una seguridad suficiente:

... y aquello se puede bien fiar, que ni será mucho trabajar, ni tampoco olgar, ni estará de mas el estribo.⁵¹

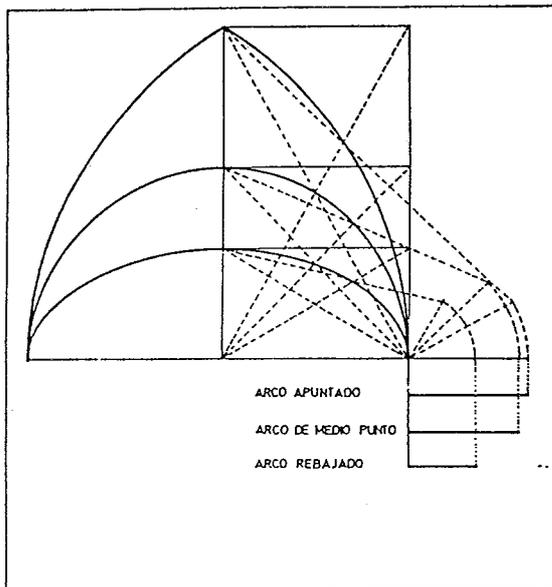


Figura 5.6. Generalización de la Regla n°1

La regla no se puede generalizar a arcos distintos del medio punto (Rodrigo afirma explícitamente que es para este tipo de arcos), ya que conduce a resultados absurdos: el arco rebajado precisa menos y el apuntado más contrafuerte que el de medio punto, como demuestra la figura.

50. Según Sanabria, op. cit., pág. 287.

51. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 19v.

*Y mira donde corta la linea GM. Y hallarás que en el punto
R. pues para una linea trasberral anibel que canse
una línea recta con la linea GM. y aquello se pide bien fi
ar. queni será mucho trabajar, Nitampoco algunas
estarán demás el estrius=*

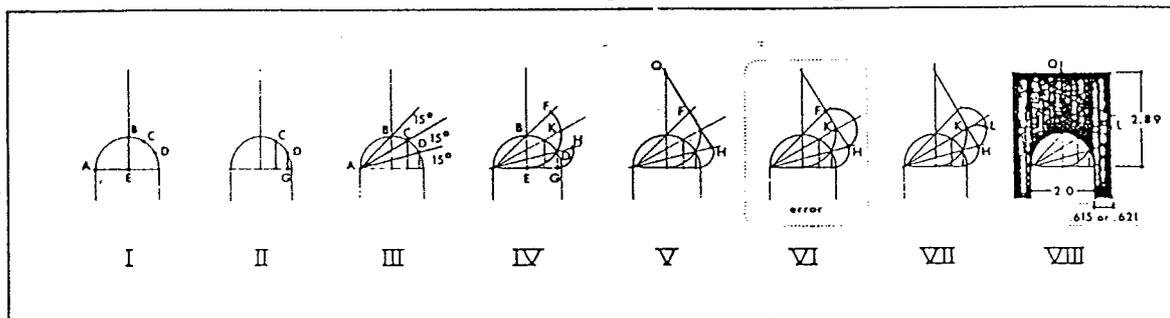
Otra Regla

*Parte el un quarto de la circumferencia en 3. par
tes. Y baya plemos. puertira de A asta B. y C. y D. pues
lo que ay de B. a E. pónlo de B. asta E. Y lo que ay de D. a G.
pónlo desde D. asta H. puertira desde H a F. Y una linea yon
tará la linea A. C. en I. pues con la punta del compas en B. Y lastra
c. en E. Y alcarrá en K. y de allí circunda con la cantidad que ay
desde K. asta H. Y con esta distancia desde H. señala en I.*

Figura 5.7. Regla n°1. Dibujo original del manuscrito

Regla 2

Esta regla es análoga a la anterior. Se trata también de una construcción geométrica, expuesta paso a paso, y, como antes, se obtienen dos puntos que definen el canto del contrafuerte para una la altura de carga en un arco de medio punto⁵². La construcción se explica en la Figura 5.8.



SANABRIA (1982)

Figura 5.8. Regla geométrica n°2 para un arco de medio punto

Las relaciones que resultan en este caso, empleando la misma notación que antes, son las siguientes⁵³:

$$E = 0.626 R$$

$$E/L = 1/3.25$$

$$Q = 2.894 R$$

Como era de esperar, al aumentar la carga aumenta el contrafuerte a igualdad de luz. Como en el caso anterior, Rodrigo afirma al final de su exposición que de esta forma se obtiene el contrafuerte necesario, ni más, ni menos:

... y aquella carga podra sostener sin que aya menester mas estrivo ni este superfluo.⁵⁴

52. "Parte el un quarto de la çirconfereñcia en 3 partes y baja plomos, pues tira de A asta B y C y D, pues lo que ay de B a E ponlo de B asta F y lo que ay de D a G, ponlo desde D asta H, pues tira desde H a F una linea y cortarà la linea AC en I, pues pon la punta del compas en B y la otra con E, y alçarà en K y de alli çircunda con la cantidad que ay desde K asta HF y con esta distançia desde H señala en L Pues baja perpendicular paralela con el semidiámetro como LMN muestran." Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 19v y 20r.

53. Según Sanabria, op. cit., págs. 288-289.

54. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 20r.

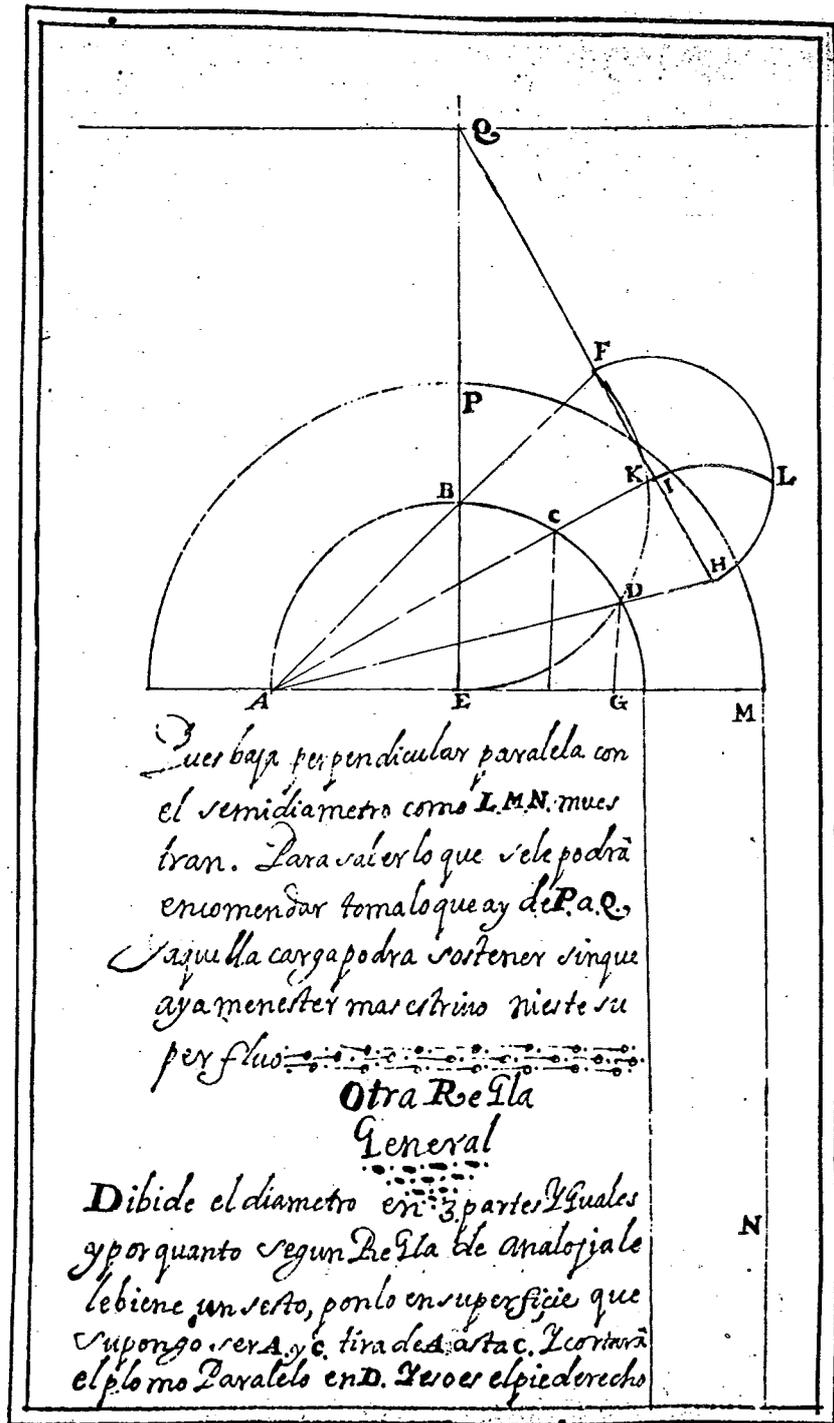


Figura 5.9. Regla nº2. Dibujo original del manuscrito

En estas dos reglas geométricas aparece un ajuste de dos variables. Esto es interesante ya que parece, como sugiere Sanabria⁵⁵, que se hubieran realizado ensayos con dos arcos de la misma luz y diferentes contrafuertes aumentando la carga hasta que se producía el colapso, para luego fijar las proporciones obtenidas con un cierto margen de seguridad. Estos ensayos podrían haberse hecho sobre modelos o con arcos de piedra 'reales' ya que la posición de Rodrigo Gil como maestro mayor de las fábricas de Salamanca y Segovia disponía de suficiente mano de obra a su cargo para realizar los ensayos descritos. En el manuscrito sin embargo no aparece la menor referencia al respecto.

Lo que sí se puede afirmar con certeza es que Rodrigo Gil estaba familiarizado con el concepto de 'coeficiente de seguridad' como se deduce de las observaciones antes citadas sobre el contrafuerte necesario.

5.2.7.b Regla 3. Generalización del problema del arco de medio punto

La construcción que expone a continuación constituye un intento de establecer una regla estructural general que determine las proporciones correctas de un arco y sus contrafuertes. La regla considera todos los parámetros geométricos que intervienen: canto del arco, luz del vano (diámetro del arco), canto y altura del contrafuerte.

Los párrafos en los que Rodrigo Gil expone su regla son bastante oscuros⁵⁶; sin embargo, una lectura detenida y la comparación con la figura del

55. Sanabria, op. cit., p.283.

56. "Dibide el diametro en 3 partes yguales, y por quanto segun regla de analogia le biene un sexto, ponlo en superficie que supongo ser A y C, tira de A asta C y cortará el plomo paralelo en D y eso es el pie derecho, y lo que ay de C asta E es la magnitud, y si a de subir tanto y medio que es de 2 de hueco, 3 de alto, se le da la una quinta parte a la rosca que sera en H; pues tira desde H asta K y cortará al diametro en L, y lo que ay de L a E es lo que le cabe, y si mas sube se le de por la raçon de la regla de 3, diciendo, si doce pies que este arco tiene de hueco bienen a la rosca 2, de tanto, que le bendrá, ni mas ni menos será en la salida de este mesmo estrivo, será por regla de 3, diciendo: si de 12 de hueco bienen 4 y un ochavo de salida de estrivo, de tanto, que bendrá estos es subiendo su cuadrado de pie derecho mas si es que sube tanto y medio, como si tiene 12 de hueco 18 de pie derecho, tenga de rosca la una quinta parte que serán 2 pies y mas $\frac{2}{5}$ que

fol. 21r, permiten deducir el procedimiento. El mérito de haberlo descifrado corresponde a Sanabria⁵⁷; Kubler y Hoag lo ignoran por su dificultad, la cual atribuyen a un error de transcripción por parte de Simón García.

La regla relaciona mediante una traza geométrica el canto y la luz del arco y el canto y la altura del contrafuerte, para arcos de medio punto, si bien en el propio dibujo aparece un tanteo de lo que podría ser su aplicación a los arcos apuntados; más tarde esto se convertirá en su última regla geométrica 'para todo tipo de arcos' que veremos más adelante.

Sanabria interpreta el trazado superpuesto de los arcos ojivales como un sistema para encontrar la altura de carga; esto no aparece citado en el manuscrito y la naturaleza de la última fórmula, que no acierta a interpretar, establece este dibujo como un tanteo intermedio.

Rodrigo explica el método citando dos casos concretos con proporciones determinadas, si bien tanto su dibujo, superponiendo ambas construcciones, como la discusión escrita que les sigue expresan en forma explícita la generalidad de la construcción:

... y sabida la rosca, será sabida la grandeza del estrivo, usando la regla de 3, y sabido el hueco y alto del pie derecho, por la dicha regla de 3, se sabrá la rosca, y estrivo.⁵⁸

Para que la anterior afirmación sea cierta es preciso que el canto del arco, la 'rosca', sea función de la luz, el 'hueco', como así hace Rodrigo más arriba en el texto y como es práctica habitual para el dimensionado de arcos de fábrica como hemos visto en la primera parte de este estudio. Además, de no ser así, la regla daría lugar a resultados absurdos, puesto que un

será haciendo un pie 5 partes, y tomar las 2; de manera que le viene de los dichos 12 pies, 2 pies y 2/5, esto es de rosca, y de aquí se sacará para otro; y sabida la rosca, será sabida la grandez del estrivo, usando la regla de 3, y sabido el hueco y alto de pie derecho, por la dicha regla de 3, se sabrá la rosca, y estrivo." Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 20v.

57. S.L. Sanabria "The Mechanization of Design...", pp. 289-290.

58. *Ibidem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

arco de más canto, y por tanto con más carga, precisaría de menos contrafuerte. Esto es cierto en la hipótesis de un arco sometido a su propio peso, sobre contrafuertes.

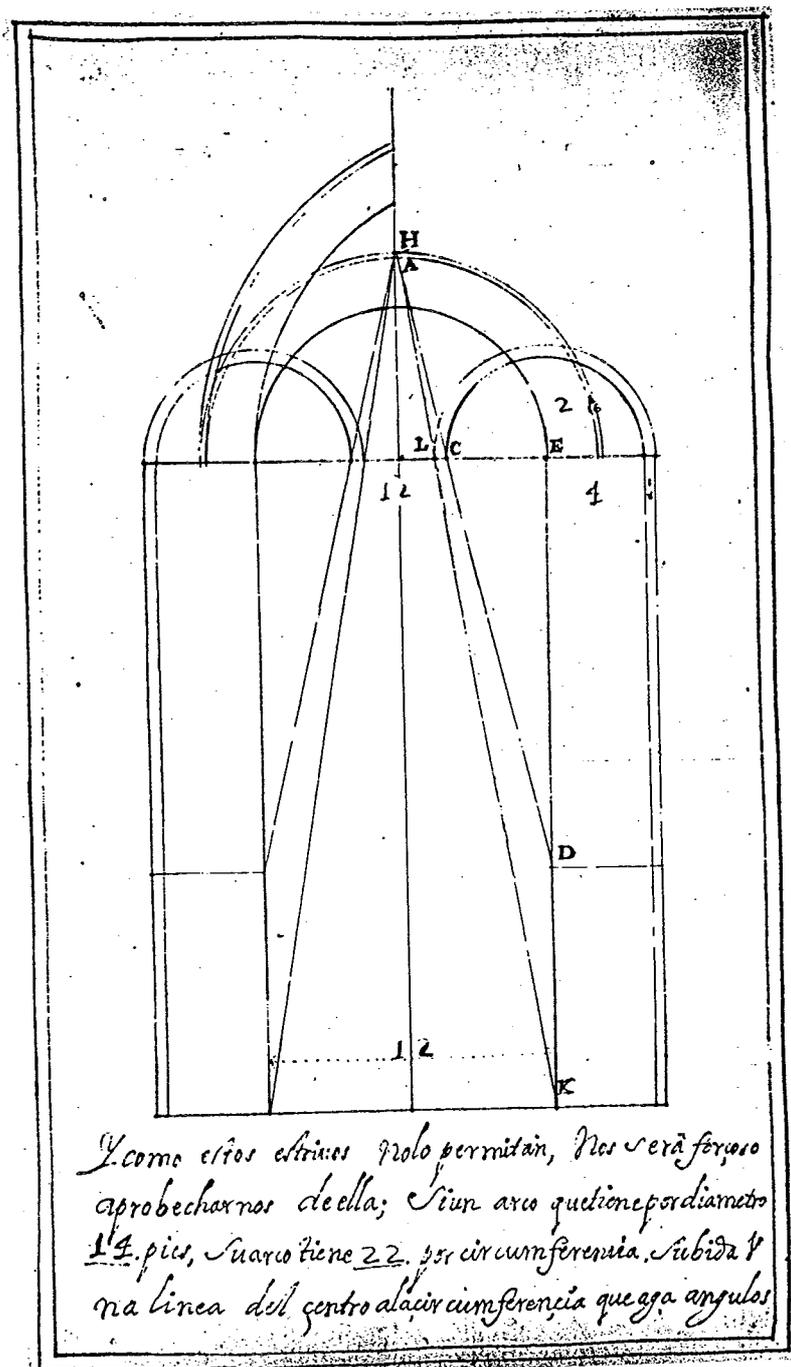


Figura 5.10. Regla nº3. Dibujo original del manuscrito

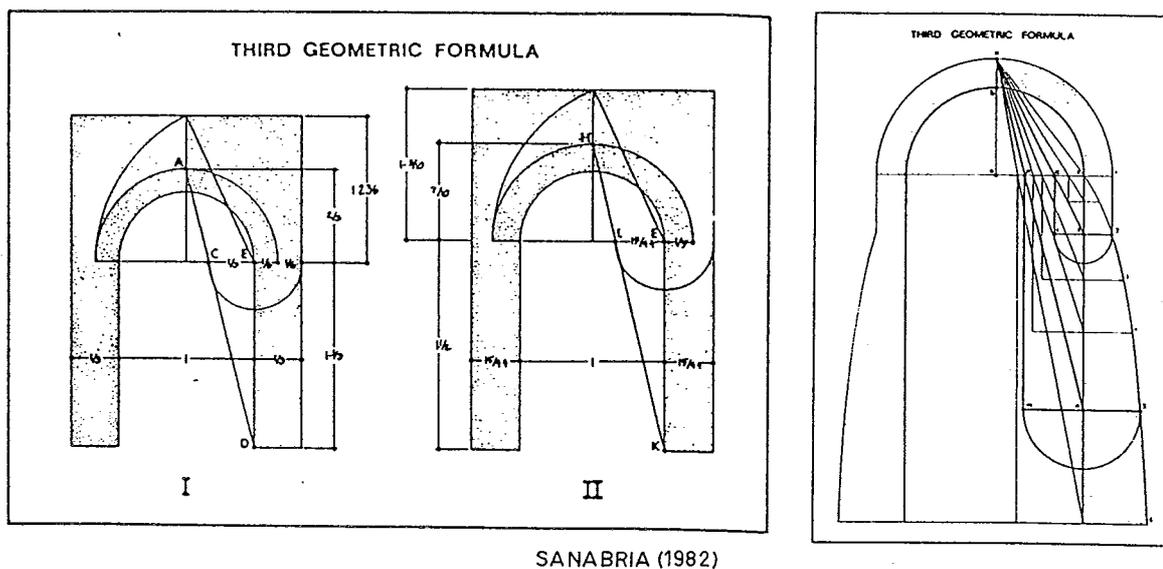


Figura 5.11. Regla nº3. Interpretaciones de Sanabria

5.2.7.c Regla 4. Contrafuerte para cualquier tipo de arcos

La siguiente regla aparece al final del capítulo de 16 , 'Reglas generales para disminuir las columnas', en el folio 59 recto, fuera de todo contexto, y del mencionado apartado 'Sobre los estribos'. La intercalamos sin embargo a continuación por ser un desarrollo evidente de la regla anterior. La regla consiste en un dibujo, análogo al de la regla número 3, que lleva al lado el siguiente texto:

Esta demostracion sirbe para saber lo que le toca de estribo a cualquiera enero de arco.

En la figura aparecen representados tres tipos de arcos, apuntado, de medio punto y rebajado, representados por sus líneas de intradós, cubriendo la misma luz. Dada una altura, representada por un punto sobre la vertical que pasa por el arranque del arco, el contrafuerte de cada uno de ellos se obtiene uniendo el punto medio de la curva de intradós con dicho punto. La

regla, como puede apreciarse en la figura, da menores contrafuertes para los arcos apuntados y mayores para los rebajados.

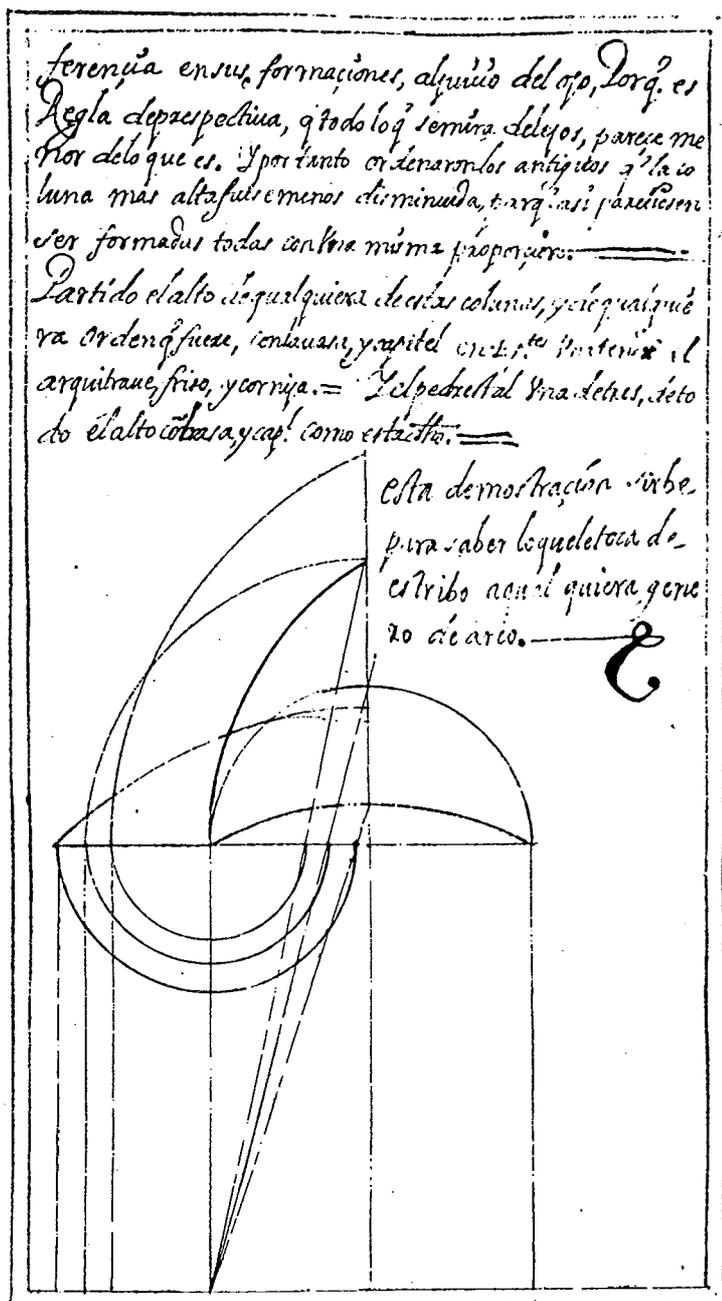


Figura 5.12. Regla nº4. Dibujo original del manuscrito

En relación con la regla número 3, las diferencias consisten en su generalización para todo tipo de arcos y en la supresión en la construcción del espesor del arco.

Esta simplificación, que Sanabria interpreta como un error o una simplificación del dibujo, supone una verdadera mejora en la fórmula que de esta forma se hace más sintética y representativa.

¿Porqué decimos ésto? En arcos sometidos a su propio peso o cargados por un relleno extradosado horizontalmente, el diseño del arco se reduce a una relación canto/luz que varía según la forma del arco. Dado que podemos considerar esta relación fija, si consideramos un buen diseño del arco, el canto desaparece como variable. Así pues, no se trata de un error sino de una mejora.

Esta simplificación aparece en otras reglas geométricas que veremos más adelante y simplemente implica que la construcción es válida solamente para unos determinados estados de cargas que incluyen, como veremos, los más usuales.

5.2.7.d Regla 5. Fórmula aritmética para el contrafuerte de un arco de medio punto

Esta regla aparece inmediatamente a continuación de la regla 3. Su ámbito de aplicación es el mismo: se trata de hallar el contrafuerte de un arco semicircular para una altura dada. Emplea para ello una fórmula algebraica que considera mejor por su mayor precisión y, problablemente, sencillamente por usar lo que para él es su herramienta más sofisticada, la raíz cuadrada.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

No contentandonos con los dicho, por ser la arismetica una disçiplina que no rescive engaño y como estos estrivos no lo permitan, nos será forçoso aprobecharnos de ella...

Como de costumbre y para mayor claridad, Rodrigo Gil da primero un ejemplo, lo que resulta muy útil dado que su exposición general es muy confusa:

...si un arco que tiene por diametro 14 pies, su arco tiene 22 por circumferencia, subida una linea del çentro a la çircumferencia que aga angulos rectos con el diametro, parte el diametro en 2 partes y biene a tener 11 pies, lo que sube de pie derecho es tanto como tiene de hueco, que es 14 pies; juntandolos con 11, montan 25, raiz quadrada de 25 son 5, tantos pies tenga el estribo... De lo dicho se advierta que la mitad del arco se junte su balor de dicho medio arco, con el balor de todo lo que sube de pie derecho, y de ello se saque la raiz quadrada, y que este estribo a de ser de la groseça del mismo arco.

Si expresamos algebraicamente la fórmula llamando E el espesor del contrafuerte, C a la longitud de la semicircunferencia y H la altura del contrafuerte:

$$E = \sqrt{H + C/2}$$

La forma es similar a la fórmula para hallar los contrafuertes de una iglesia salón y, probablemente esta derivada de allí. Como puede verse fácilmente sólo es aplicable a arcos de medio punto, ya que si la usamos para arcos apuntados o rebajados da el mismo resultado contrario a la práctica de que el arco apuntado tendría más contrafuerte y el rebajado menos⁶¹.

Sin embargo, a pesar de este evidente defecto Rodrigo Gil considera esta fórmula como la mejor de las que había expuesto hasta el momento (reglas 1, 2 y 3): "Esto allamos lo mas çercano y racional de todas las reglas..."⁶².

59. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 20v y 21r.

60. Simón García Compendio..., Cap. 6, fol. 21v.

61. A la fórmula para el contrafuerte de las iglesias salón se le puede achacar el mismo fallo; sin embargo, como hemos visto el mismo Rodrigo Gil matiza su aplicación y dice que en el caso de que sea rebajada se aumente el contrafuerte en la misma proporción. Quizá tuviera en mente la misma corrección para esta última.

62. Ibidém.

5.3 Martínez de Aranda

5.3.1 El manuscrito

Ginés Martínez de Aranda, arquitecto natural de Baeza, que desarrolló su actividad profesional en Andalucía y Galicia en la segunda mitad del siglo XVI y principios del XVII, nos dejó un manuscrito sobre el arte de la cantería.

El manuscrito⁶³ del que se tenía alguna referencia sobre su existencia⁶⁴, ha sido descubierto recientemente en la Biblioteca de Ingenieros del Ejército de Madrid⁶⁵, y pasa a formar parte del muy escaso número de tratados sobre cantería y estereotomía anteriores al siglo XVII⁶⁶.

No tiene fecha, pero Bonet Correa lo sitúa aproximadamente a finales del siglo XVI⁶⁷. La obra está dividida en cinco partes. La primera trata de 'arcos dificultosos', la segunda de 'capialçados y puertas', la tercera de 'caracoles y escaleras', la cuarta de 'pechinas y bobedas' y la quinta de 'capillas y ochabos'. La copia que se conserva, realizada en la segunda mitad del siglo XVII, es incompleta y faltan las dos últimas partes.

A pesar de ello, constituye uno de los más completos tratados de cantería pues contiene 131 cortes distintos (el libro de De l'Orme contiene 51 trazas, el de Vandelvira 104, y el del Padre Tosca 75)⁶⁸.

63. Ginés Martínez de Aranda *Cerramientos y trazas de montea*. Ms. Biblioteca del Museo de Ingenieros, Servicio Histórico Militar.

64. Véase: A. Bonet Correa "Ginés Martínez de Aranda, arquitecto y tratadista de cerramientos y arte de montea.", en: G. Martínez de Aranda *Cerramientos y trazas de montea*, Madrid: CEHOPU, 1985, pp. 13-34.

65. Véase: J. Mañas Martínez "El tratado de Ginés Martínez de Aranda: Breve historia de un descubrimiento.", *ibídem*, pp. 9-12.

66. Véase: S. L. Sanabria "From Gothic to Renaissance Stereotomy: The Design Methods of Philibert de l'Orme and Alonso de Vandelvira.", *Technology and Culture*, Vol. 30, 1989, pp. 266-299.

67. A. Bonet Correa "Ginés Martínez de Aranda...", *op. cit.*, pp. 22 y 30.

68. Véase A. Bonet Correa "Ginés Martínez de Aranda...", *op. cit.*, pág. 24.

5.3.2 Regla para dimensionar contrafuertes y arcos

La primera parte del manuscrito que trata de arcos presenta en el primer apartado, *Difinitiones*, diversas construcciones básicas sobre arcos, por ej. como ejecutar arcos apuntados o rebajados a partir de arcos de medio punto, o como extender un arco sobre una circunferencia. Entre este tipo de construcciones básicas, tratadas como axiomas, sin demostración, aparecen las reglas para dimensionar contrafuertes y arcos.

La regla para los contrafuertes consiste en dividir el arco del intradós del arco en tres partes y en proyectar una de ellas sobre el diámetro; la distancia entre este punto y el arranque del arco es el canto que debe darse al contrafuerte. La exposición es clara, sintética, y viene aplicada a los tres tipos fundamentales de arcos: semicircular, rebajado y apuntado, aunque luego especifica que se puede aplicar a cualquier tipo de arcos. La transcribimos a continuación:

Difinition quinta muestra Restribar los arcos y darles sus gruesos

Para Restribar el arco çimicirculo .X. le repartiras su çircunferençia en tres partes y por una destas que es el punto .a. baxaras un plomo perpendicularmente que baya a tocar su diamitro al punto .b. y lo que ubiere des del punto .b. al punto .c. eso tendra de Restribo este dicho arco çimicirculo.

Para Restribar el arco en Segmento menor de circulo .Y. le Repartiras su çircunferençia en tres partes y por una dellas que es el punto .d. baxaras un plomo de quadrado que toque en el punto .e. y lo que ubiere des del punto .e. al punto .f. eso tendra de Restribo este dicho arco en Segmento menor de çirculo.

Para Restribar el arco apuntado .Z. le Repartiras su çircunferençia en tres partes y por una dellas que es el punto .g. baxaras un plomo de quadrado que toque en el punto .h. y lo que ubiere des del punto .h. al punto .i. eso tendra de Restribo este dicho arco apuntado y desta manera se an de Restribar todas qualesquiera manera de arcos..⁶⁹

A continuación da la regla para obtener el espesor de las dovelas de los arcos. La regla da el canto del arco como una fracción entera del vano, pero esta fracción varía en función de su tamaño:

69. G. Martínez de Aranda *Cerramientos y trazas...*, op. cit., pp. 3-4.

Tamaño	e / L
arcos de 5 - 10 pies de luz	1/6
arcos de 10 - 20 pies de luz	1/8
arcos de 20 - 40 pies de luz	1/10

Tabla 5.1 Espesores de arcos según Martínez de Aranda

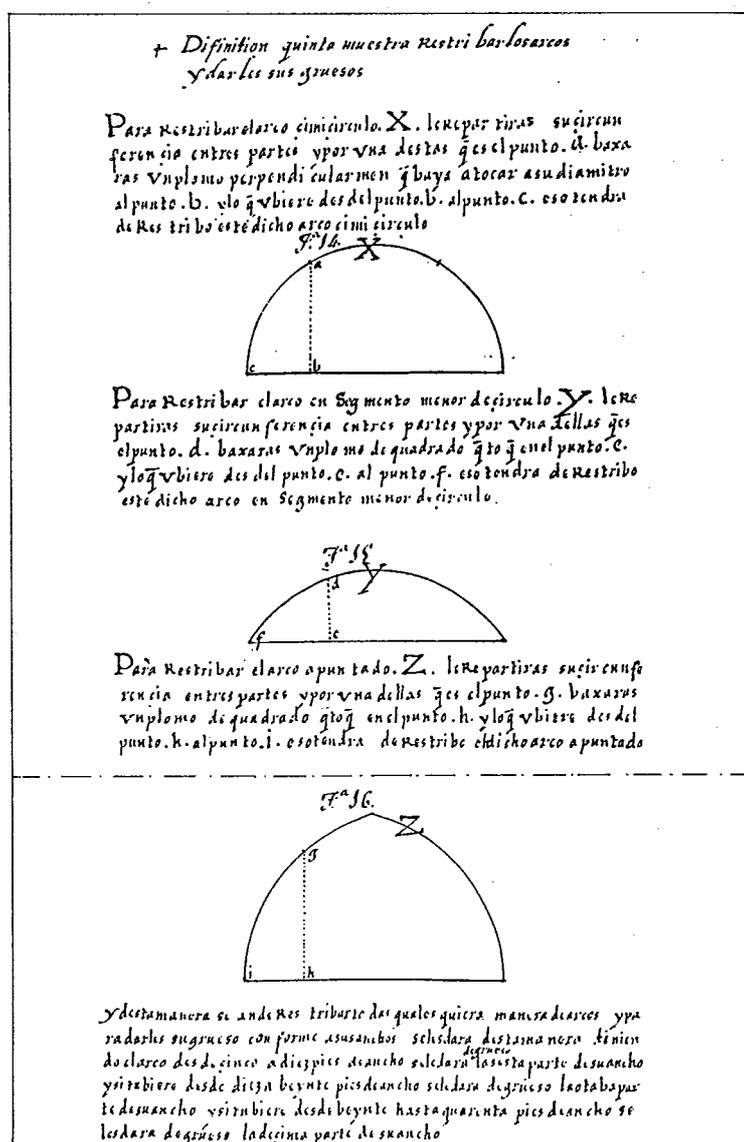


Figura 5.13. Martínez de Aranda: dibujos y texto del manuscrito

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

En el manuscrito la exposición es discursiva, sin fórmulas ni quebrados: dos:

... y para darles su grueso conforme a sus anchos se les dara desta manera teniendo el arco desde cinco a diez pies de ancho se le dara de grueso la sesta parte de su ancho y si tubiere desde diez a beynte pies de ancho se le dara de grueso la otava parte de su ancho y si tubiere desde beynte a quarenta pies de ancho se les dara de grueso la decima parte de su ancho.⁷⁰

5.3.3 Origen, difusión e importancia de la regla de Martínez de Aranda

La regla de Martínez de Aranda para el dimensionamiento de contrafuertes es la misma, con una construcción geométrica simplicada, más abstracta, que la conocida como 'regla de Blondel'. Esta regla había aparecido publica-

da por primera vez en el tratado de esteorotomía del Padre Derand en 1643⁷¹ y fue posteriormente popularizada por su aparición en el curso de Blondel⁷², de donde le viene el nombre de 'regla de Blondel' con el que se la conoce normalmente.

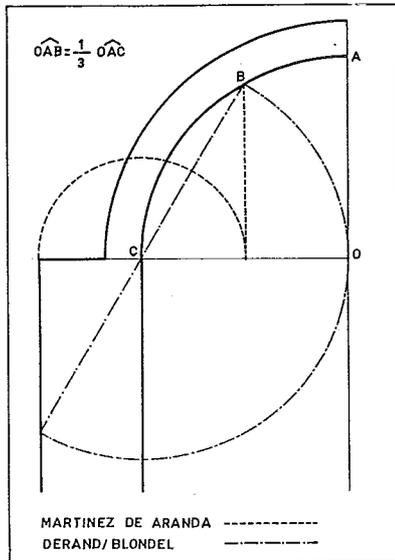


Figura 5.14. Equivalencia entre las reglas de M. de Aranda y Derand

70. G. Martínez de Aranda *Cerramientos y trazas...*, op. cit., pp. 4-5.

71. F. Derand *L'architecture des voûtes ou l'art des traits et coupe des voûtes*. Paris: Sebastian Cramoisy, 1643, Chapitre VI, "Du trait des poussées des voûtes, d'où on infere quelles épaisseurs doivent avoir les murs, & arcbotants qui les portent", pp. 16-17. Es interesante que Derand especifica que la regla se aplica a los contrafuertes tanto si éstos forman parte del muro como si son exentos y reciben el empuje de los arbotantes: "... il n'est pas toujours necessaire que les susdites épaisseurs trouvées par la pratique ... se gardent en toute l'estendue des murs qui portent les voûtes: ainsi il suffira de les conserver à l'endroit des arcs principaux, où elles formeront des avances, lesquelles se nomment vulgairement, corps saillans ou arcbotants."

72. F. N. Blondel *Cours d'Architecture*. Paris: Lambert Roulland, 1675 y 1683, Livre VI, Chapitre VII "De quelques autres especes d'Arcs.", pp. 418-19.

Tiene sin duda su origen en el gótico. Viollet-le-Duc⁷³ la cita en ese sentido, así como Ungewitter⁷⁴, aunque ninguno de ellos menciona fuentes documentales concretas.

Los constructores góticos la podrían haber usado tanto para dimensionar arcos como para los contrafuertes de sus naves de crucería⁷⁵. En este sentido, aunque es aventurado sacar conclusiones en base a la superposición de trazados geométricos sobre edificios existentes, hemos aplicado la regla a la nave única de la Catedral de Gerona y hemos encontrado una coincidencia perfecta, en base a la sección realizada por Bassegoda. Sin embargo, la regla no aparece citada en los debates de la comisión de expertos convocada para decidir la construcción de esta gran bóveda de piedra; más adelante discutiremos en detalle las conclusiones de esta comisión y su importancia.⁷⁶ Warth realizó la misma comprobación para dos construcciones del gótico alemán: la iglesia de Wimpfen y la catedral de Freiburg. También realizó la prueba con las dimensiones de los contrafuertes calculados por Hübsch empleando la catenaria para la iglesia católica de Bulach con idéntico resultado.

La regla tuvo una enorme difusión posterior y aparece expuesta, como veremos, en numerosos tratados de arquitectura en los siglos XVII y XVIII

73. E. Viollet-le-Duc, E. *Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française du XI au XVI siècle*. Paris: Ve A. Morel & C., editeurs, 1874.

74. G. G. Ungewitter *Lehrbuch...*, op. cit., pp. 273-76.

75. Ungewitter *Lehrbuch...*, op. cit. pp. 273-74, la considera en este sentido. Apoya esta hipótesis un comentario de Derand sobre la aplicación de la fórmula: "...il n'est pas toujours nécessaire que les susdites épaisseurs trouvées par la pratique ... se gardent en toute l'étendue des murs qui portent les voûtes ... il suffira de les conserver à l'endroit des arcs principaux, où elles formeront des avances, lesquelles se nomment vulgairement, corps saillans ou arcsboutants.", op. cit. pág. 16.

76. Véase J. Bassegoda *La Catedral de Gerona. Apuntes para una monografía de este monumento*. Barcelona: Tipografía de Fidel Giró, 1889, donde se recogen y discuten parte de las actas, y B. Bassegoda *Muste Fermento Científico de la Estática*. Barcelona: Imprenta Ange Ortega, 1970, pp. 16-18, donde discute algunas implicaciones en relación con la historia de las estructuras.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

(además de las obras ya citadas de Derand y Blondel)⁷⁷. Para arquitectos con una gran experiencia constructiva como Vittone era la regla más segura⁷⁸. Con el nacimiento y difusión del cálculo de estructuras recibió fuertes críticas por su carácter empírico, sin embargo aparece todavía citada como un buen método aproximado a finales del siglo XIX⁷⁹, e, incluso en este siglo⁸⁰.

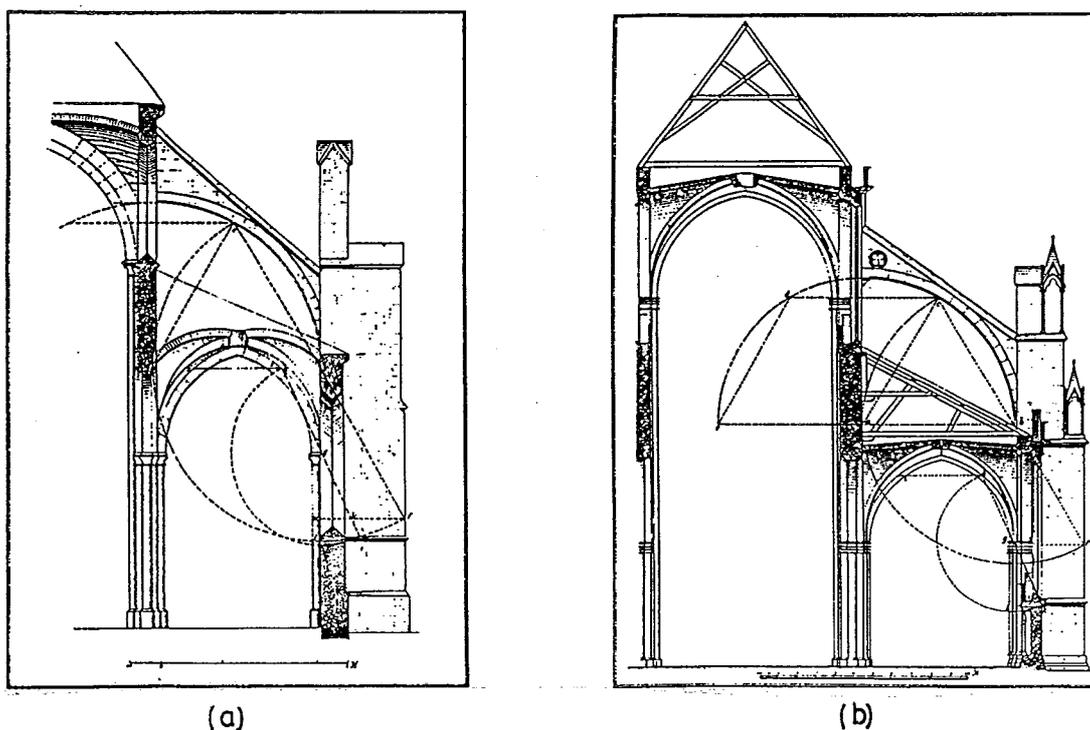


Figura 5.15. Iglesia de Wimpfen (a) y Catedral de Freiburg (b)

77. La regla aparece también en el muy popular tratado de J. B. de la Rue *Traité de la Coupe des Pierres...*, París: 1728, "Regle pour trouver l'épaisseur des pidoits, pour toutes sortes d'Arcs, par rapport à leur poussées.", pp. 182-83. En Alemania se cita en uno de los manuales más conocidos: C. F. von Wolff, *Der Anfangs-Gründe aller mathematischen Wissenschaften...*, 4a ed. Leipzig: 1732, como el método más habitual. Del mismo aparece mencionada en la monumental enciclopedia de Zedler: J. H. Zedler, *Grosses vollständiges Universal-Lexikon Aller Wissenschaften und Künste...*, Halle und Leipzig: 1735., Band 10, término 'Gewölbe'.

78. B. A. Vittone *Istruzioni elementari per indirizzo dei giovani allo studio dell'Architettura*, Lugano, 1760. Citado por E. Benvenuto *La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico*. Firenze: Sansoni, 1981, pp. 323-24.

79. Véase en E. Barberot *Traité de Constructions Civiles*. Paris: Librairie Polytechnique, 1895, 'Stabilité de voûtes', pp. 91-97, donde cita aparece expuesta la regla.

80. La regla aparece como un método aproximado en C. Esselborn, *Tratado General de Construcción*. Barcelona: Gustavo Gili, 1928, Vol. I, pp. 139-140, edición española de un tratado alemán muy popular a finales del siglo pasado y comienzos de este. También se cita en el mismo sentido en F. Cassinello *Bóvedas y cúpulas de ladrillo*. 2a Ed. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1964.

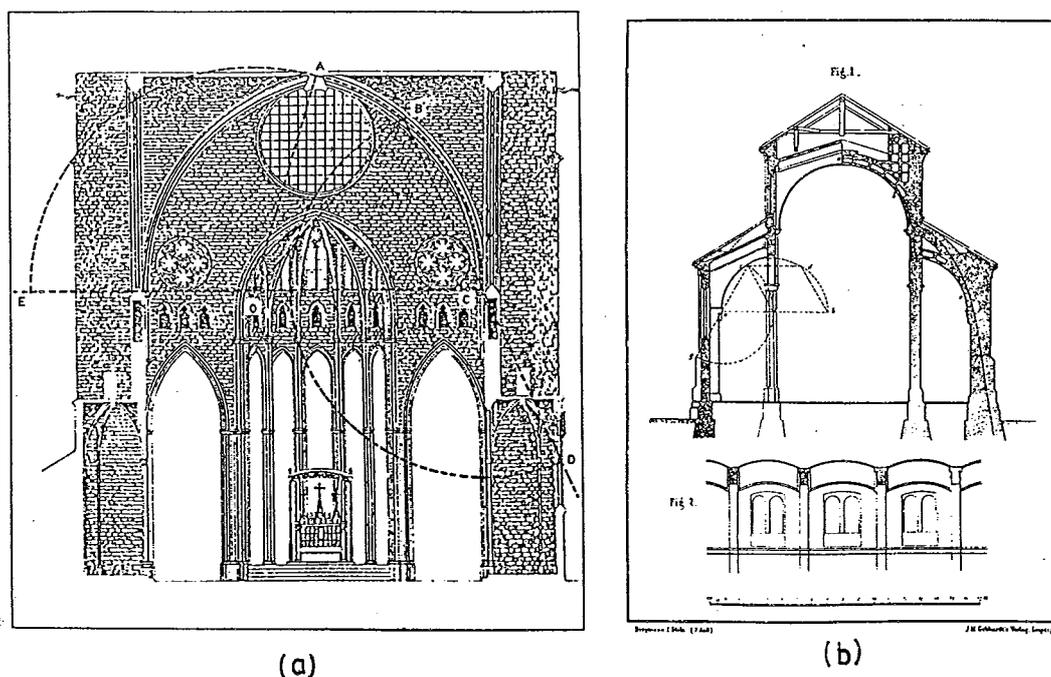


Figura 5.16. Catedral de Gerona (a) e Iglesia Católica de Bulach (b)

La aparición de esta regla en el manuscrito de Martínez de Aranda, con 50 años de antelación y más de 1000 km de distancia con respecto a su publicación en el libro de Derand es importante pues demuestra el alto grado de difusión y aceptación de este tipo de reglas proporcionales entre los constructores del gótico tardío⁸¹.

81. La regla quizá tenga un origen más antiguo. No es este el lugar para hacer una digresión que intente explicar la rapidísima difusión del arte gótico en Europa tras su primera entrada por Montecassino, pero cabe pensar si los constructores góticos no recibirían de los bizantinos, además de la forma apuntada su bagaje de experiencia acumulada en la forma de este tipo de reglas estructurales de extraordinaria sencillez y amplio espectro de aplicación. Esta hipótesis aparece por primera vez en: A. Hertwig "Aus der Geschichte der Gewölbe. Ein Beitrag zur Kulturgeschichte." *Technikgeschichte* Band. 23, 1934. pp.86-93. Sobre el empleo de reglas estructurales por los arquitectos bizantinos véase: A. Petronotis "Der Architekt in Byzanz", *Bauplanung und Bauphysik der Antike (Diskussionen zur archäologischen Bauforschung 4)*. Berlín: Wasmuth, 1984. págs. 329-341.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

5.4 Hernán Ruiz

5.4.1 El manuscrito

El manuscrito de Hernán Ruiz el Joven que se conserva en la Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid⁸² aborda numerosas disciplinas relacionadas con la arquitectura: geometría, proporciones, órdenes clásicos, relojes solares, ... precedidas de una traducción de Vitruvio. Los temas aparecen desordenados y tratados desigualmente. No sabemos, por tanto, si el autor tenía intenciones de publicarlo o, lo que parece más probable, se trataba simplemente de una colección de textos y dibujos de uso personal.

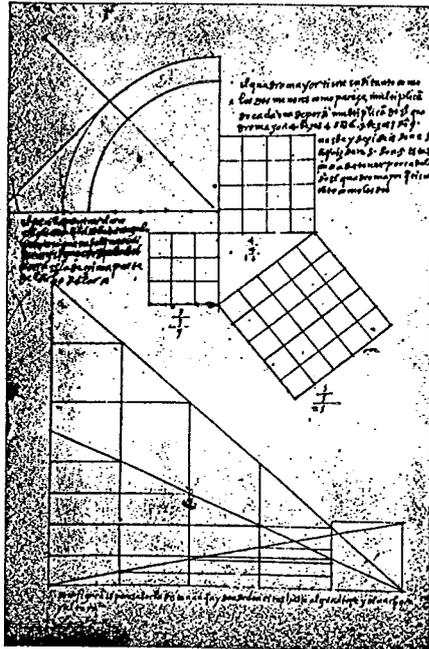
5.4.2 Regla para contrafuertes

Dentro de la enorme diversidad de temas que trata el manuscrito, Hernán Ruiz nos da una regla para encontrar el contrafuerte correspondiente a cualquier arco. La regla aparece en tres lugares distintos del manuscrito, folios 23, 25 y 79, con texto y figura explicativa en cada caso. Los textos son algo confusos, pero con ayuda de las figuras, hemos podido descifrar el procedimiento aludido por Hernán Ruiz. Consideremos un semiarco cualquiera:

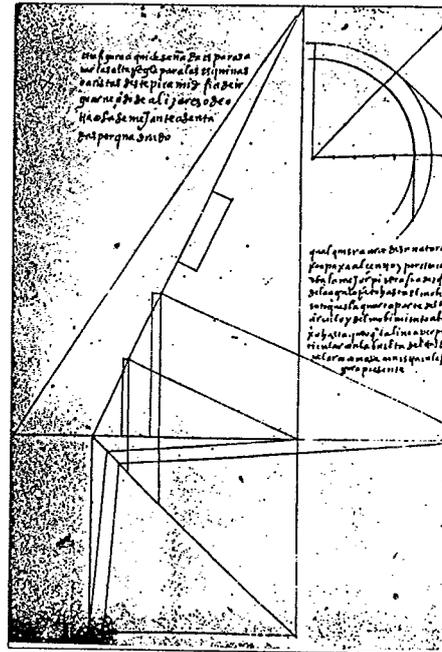
- 1) dividimos su línea de extradós en dos partes iguales;
- 2) trazamos por dicho punto medio del arco una tangente a dicha línea de extradós;
- 3) el punto de intersección de la tangente con la línea horizontal definida por el arranque del arco, nos da el espesor del contrafuerte.

82. Hernán Ruiz *Libro de arquitectura*. Ms. R.16, Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Existe una edición crítica publicada por P. Navascués Palacio *El Libro de Arquitectura de Hernán Ruiz el Joven. Estudio y edición crítica por ...* Madrid: E. T. S. Arquitectura, 1974. También del mismo autor: "El 'manuscrito de arquitectura' de Hernán Ruiz, el Joven." *Archivo Español de Arte*, Vol. 44, 1971. pp. 295-331, 12 láms.

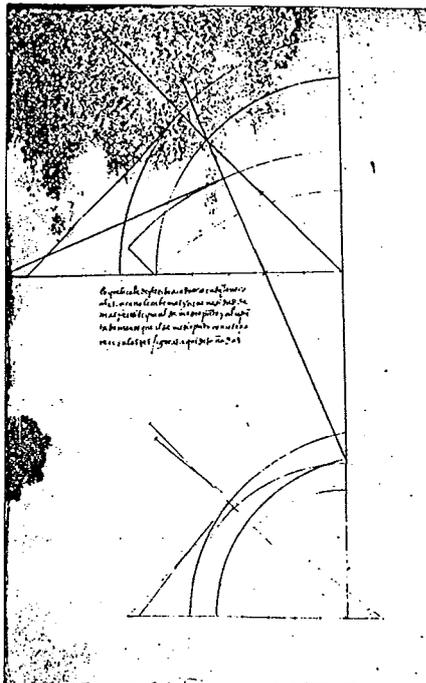
El procedimiento aparece aplicado a los tres tipos básicos de arco, apuntado, de medio punto, y rebajado en la Figura 5.17 (d).



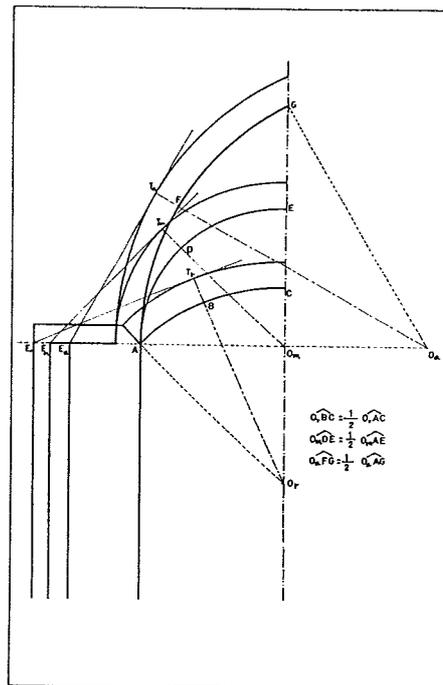
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.17. Regla de Hernán Ruiz. Las figuras (a), (b) y (c) corresponden al manuscrito original. La (d) es una interpretación aplicada a los tres casos más habituales: arco apuntado, de medio punto y rebajado.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

El contrafuerte es, pues, función del espesor del arco y de su forma. La regla, como la de Martínez de Aranda, da respecto al arco de medio punto, mayor espesor a los arcos rebajados y menor a los apuntados.

A continuación, hemos transcrito los citados pasajes del manuscrito, indicando con la letra entre paréntesis a qué figura corresponden:

(a)

El restribo que debe tener el arco es la línea que buelbe en angulo recto a toque en la línea, y el grueso de la bolsura es la dezima parte de largo del arco. [fol. 23 vº]

(b)

Qualquiera arco de su natural rempuxa al centro y por esta causa la mejor piedra se a de echar del angulo recto hasta el mobimiento que es la quarta parte del simicirculo, y del mobimiento abaxo hasta que toque a la línea perpendicular con la buelta del trasdos se le ara como se muestra en la figura presente. [fol. 25 vº]

(c)

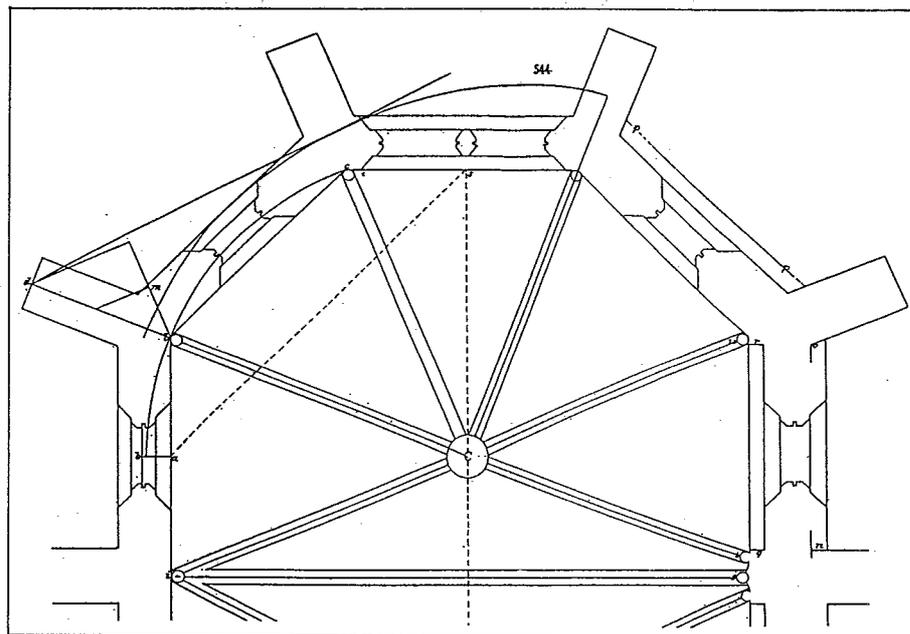
Lo que le cabe de restribo a cada arco en su Jenero. Al escarçano le cabe mas y tiene necesidad de mas restribo que al de medio punto, y al apuntado menos que el de medio punto como se parece en las tres figuras aqui deseñadas. [fol. 79 vº]

El párrafo (c) es el más claro. El (b) sugiere la conveniencia de cargar los riñones hasta el nivel de la mitad del semiarco, como corresponde a la práctica constructiva habitual y que, como veremos, es de importancia fundamental a la hora de estabilizar los arcos y bóvedas. En el (a) se menciona la conocida regla (Alberti) de dar al espesor del arco la décima parte de la luz que cubre.

5.4.3 Origen e influencia posterior

Como en el caso anterior de Martínez de Aranda, casi lo más interesante de esta regla es su más que probable origen gótico y la amplia difusión que tuvo que tener. En efecto, aunque no la hemos vuelto a ver mencionada en ninguno de los tratados y manuscritos examinados en el curso del presente

estudio, tras más de 300 años aparece citada en el libro de Ungewitter⁸³ sobre construcción gótica, como una regla para dimensionar los contrafuertes de los coros de las iglesias góticas.



UNGEWITTER (1875).

Figura 5.18. Regla para los contrafuertes según Ungewitter⁸⁴

Ungewitter y el resto de los tratadistas neo-góticos alemanes de fines del siglo XIX, Reichensperger⁸⁵, Hoffstadt⁸⁶, etc., bucearon en los manuscritos del gótico tardío alemán tratando de conocer los métodos de diseño empleados por los constructores góticos. Es muy significativo que, tanto la regla de Martínez de Aranda como la de Hernán Ruiz aparezcan también en algunos manuscritos del gótico tardío alemán, según los citados autores.

83. G.G. Ungewitter *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen*, op. cit., véase el apartado "Geometrische Beziehungen in den Grundrissmassen. Verhältnis der Widerlager zu den Spannweiten.", Vol. I, pp. 273-76, donde recopila todas las reglas por el conocidas.

84. La figura está tomada de la 2a. ed. de 1875, lámina 19.

85. A. Reichensperger *Vermischte Schriften über Christliche Kunst*. Leipzig: T. O. Weigel, 1856. No hemos encontrado esta obra en las bibliotecas consultadas.

86. F. Hoffstadt *Gotisches ABC Buch, das ist: Grundregeln des gotischen Styls für Künstler und Werkleute*. Frankfurt am Main: S. Schwerber, 1840. Hemos consultado la traducción al francés de T. Aufschlager, *Principes du style gothique exposés d'après des documents authentiques du moyen-âge...* Liège: E. Nublet, 1851.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Por último, hemos de decir que esta regla parece que fue utilizada por el arquitecto inglés Betty Langley para dimensionar las pilas en su proyecto para el puente de Westminster⁸⁷. No hemos tenido acceso al texto completo de Langley, pero sí a una reproducción de la lámina principal, así como a la restitución ampliada de Ruddock⁸⁸.

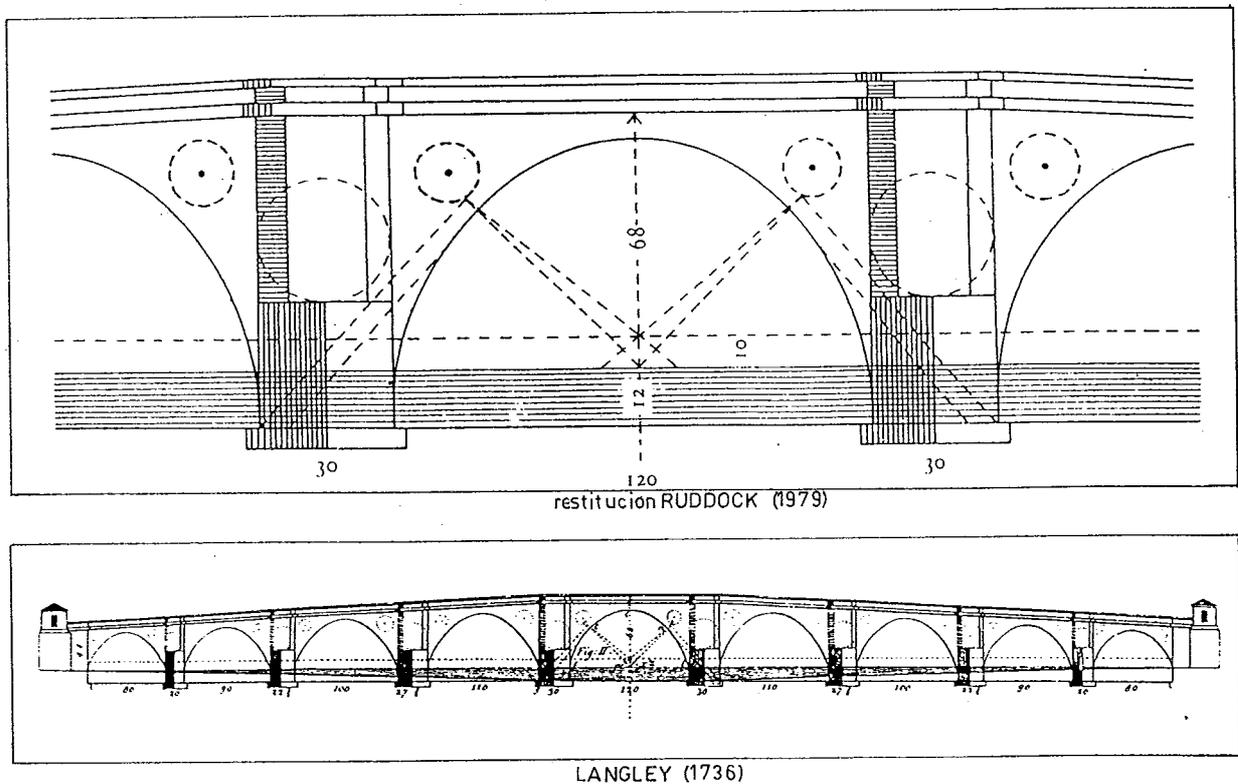


Figura 5.19. Proyecto para el Puente de Westminster

87. B. Langley *A Design for the Bridge at New Palace yard, Westminster... composed of Nine Arches, independent of each other...* London: 1736. Para un comentario sobre el diseño de este puente, véase I. Ruddock *Arch Bridges and Their Builders, 1735-1835*. Cambridge: 1979, pp. 1-18.

88. La ampliación en Ruddock, op. cit. pág. 7, fig. 4. La reproducción de la lámina original en E. C. Ruddock "Hollow spandrels in arch bridges: a historical study." *Structural Engineer*, Vol. 52, 1974, pág. 281, fig. 1.

5.5 Leon Baptista Alberti

5.5.1 Los diez libros de Arquitectura

El tratado de arquitectura de Alberti fue iniciado probablemente hacia 1435-1440 y fue presentado formalmente al Papa Nicolás V en 1452. La edición príncipe, en latín, se publicó en 1485 y es, por tanto, anterior a la primera edición de Vitruvio⁸⁹. En España, la primera traducción se publica en 1582 (basada en la traducción italiana de Bartoli de 1565)⁹⁰. Esta última es la que hemos utilizado.

Desde el punto de vista de la historia de las técnicas constructivas este tratado no ha recibido la atención que merece. Aunque Alberti leyó diligentemente a los antiguos, Vitruvio, Plinio, Frontino, ..., en modo alguno su obra es una mera recopilación de opiniones diversas, sino, más bien, el fruto de sus investigaciones no sólo de las fuentes escritas sino de los monumentos existentes, así como de su propia experiencia profesional. El resultado es un compendio de todo el saber constructivo de su época. Su influencia en este sentido ha sido, como veremos, enorme, apareciendo citado en la práctica totalidad de los tratados de construcción hasta el siglo XIX.

El tratado de Alberti contiene algunas reglas estructurales y observaciones constructivas muy interesantes. Las hemos agrupado por temas.

5.5.2 Sobre arcos

Alberti distingue tres tipos básicos de arcos: de medio punto, rebajado y apuntado.

Los arcos difieren entre sí, porque uno es recto el cual constituye un entero semicírculo, la cuerda de este se endereza por el centro del círculo. Ay otro que imita más la naturaleza de viga que no de arco, a este llamamos disminuido, por ser no entero medio círculo, sino que

89. Dora Wiebenson (ed.) *Architectural Theory and Practice from Alberti to Ledoux*. Charlottesville, Va.: Architectural Publications Inc., 1982. s/pS

90. León Baptista Alberti *Los Diez Libros de Arquitectura de León Baptista Alberto. Traduzidos de Latín en Romance*. [por Francisco Lozano] Madrid: Casa de Alonso Gómez, 1582.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

es alguna parte quita de el, la cuerda deste dista del centro y esta encima. Ay tambien arco compuesto el qual mismo unos llaman angular, otros arco que se compone de dos arcos disminuydos, y tiene su cuerda dos centros de dos lineas flechadas que se cortan entre si.

Recomienda que los arcos se hagan de dovelas de gran tamaño y que éstas sean iguales entre sí:

Los cuños de que se haze el arco querria que fuessen todos de piedra ancha, y quanto pueda ser grande, porque la naturaleza de qualquier cuerpo es mas indisoluble, la que esta allegada y unida por natura que no la que es conjuncta y compuesta con la mano, y arte de los hombres, y conviene que sean entre si iguales, para que como en valança correspondan las cosas diestras a las siniestras en haz, grandeza, peso y en las demas semejantes.

y que las juntas entre dovelas sean perpendiculares a la línea de intradós. Esta última observación, por obvia, suele pasarse por alto, pero esta prescripción es fundamental para evitar los posibles colapsos por deslizamiento. En todo arco haras que las apegaduras de las juntas, y los cerramientos se enderecen a su centro.⁹³

Por último, recomienda que la clave sea una piedra grande. En efecto, colocar un clave de cierto tamaño reduce el empuje del arco, como ya hizo notar por primera vez Danizy como resultado de sus ensayos sobre modelos⁹⁴.

El cuño del espinazo sienpre, los exercitados, le pusieron de una piedra entera y muy grande...

A continuación comenta las características estructurales más sobresalientes de cada uno de ellos, añadiendo disposiciones constructivas que mejoran o responden a dicho comportamiento estructural.

91. *Ibidem*.

92. L. B. Alberti, *op. cit.*, pág. 86.

93. *Ibidem*.

94. A. A. H. Danyzy "Méthode générale pour déterminer la résistance qu'il faut opposer à la poussée des voûtes." *Histoire de la Société Royale des Sciences établie à Montpellier*, Vol. 2, 1732 (Lyon 1778). pp. 40 y ss.

95. L. B. Alberti, *op. cit.*, pág. 86.

5.5.2.a Arco de medio punto:el arco ideal

Alberti consideraba el arco mas estable y resistente el de medio punto. Y así fue considerado, en general, hasta el siglo XVIII. Trata de demostrarlo por 'razon y argumento'. Sus observaciones son interesantes por dos motivos:

- 1) porque constituyen el primer intento de explicación del funcionamiento estructural de un arco, e influyeron muy posiblemente en los comentarios de de Baldi⁹⁶ sobre los arcos, postriormente recogidos en forma de teoremas por Wotton⁹⁷.
- 2) porque ponen de relieve la importancia de la distribución de las masas en la estabilidad de un arco, hecho éste clave en el diseño estructural de las estructuras de fábrica.

En el segundo aspecto los comentarios de Alberti no dejan lugar a dudas sobre la importancia una adecuada proporción de las masas para conseguir el equilibrio de un arco:

El arco recto ser el mas firme de todos se vee por ello mismo, y demuestrase por razon y argumento. Y no veo en que manera se pueda deshazer de suyo, sino es que de los cuños el uno empuje al otro echandole fuera, de la qual injuria estan tan apartados que aun el uno se confirma con la ayuda del otro, y si por ventura acometiessen hazer esto son prohibidos por la natura de los pesos debajo de que estan, o con que los mismos cuños estan embutidos. De aqui es aquello de Varro, que dize, en las obras de arcos no se rigen mas las cosas diestras por las siniestras, que las siniestras por las diestras. Y esto se puede ver porque el cuño mas alto que es uno solo en el espinazo de en medio, como puede echar fuera los cuños de los lados o apremiandoles ellos mismos quando podra el ser echado fuera del asiento y ocupado: pero los cuños que succeden cercanos por los costados facilmente son retenidos en sus officios con la igualdad de los pesos. Finalmente los cuños que estan aseñtados en las dos cabeças, porque han de ser movidos estando los de arriba en sus officios?

96. Bernardino Baldi *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes...* Moguntiae: Viduae Joannis Albini, 1621. Citado por H. I. Dorn *The Art of Building and the Science of Mechanics. A Study of the Union of Theory and Practice in the Early History of Structural Analysis in England*. Ph.D.: Princeton University, 1970. pp. 52-53.

97. H. Wotton *The Elements of Architecture*. London: 1624. Citado por Dorn, op. cit. pp. 53-59. Existe una traducción al español del siglo XVII que comentamos en el correspondiente apartado.

98. L. B. Alberti, op. cit., pág. 85.

5.5.2.b Arcos rebajados

El hecho más relevante en cuanto a los arcos rebajados es el poderoso empuje que producen. Alberti resalta este hecho y propone, para eliminar el empuje la colocación de tirantes de hierro:

...luego en los arcos rectos que facilmente se defienden no tenemos necesidad de cuerda, pero en los disminuydos afirmamos una cadena de hierro, o cosa que tenga fuerza de cuerda a las extensiones de las paredes de una y otra parte, y deseamos que estas extensiones ⁹⁹no sean mas breves de que con ellas pueda ser enterada de la redondez disminuyda que falta.

A continuación da dos consejos de buena práctica constructiva sobre los arcos rebajados: a) colocarlos dentro de los muros de modo que el espesor de las paredes resista su empuje; b) aún en este caso, colocar arcos de descarga de medio punto para aliviar el empuje.

Lo qual mismo nunca menospreciaron hazerlo los antiguos architectos, y los arcos disminuydos mientras pudieron nunca los dexaron de hazer enteros dentro de los lados de las paredes, y observaron excelentemente, que a las vigas derechas donde avia ocasion les aplicavan encima un arco disminuydo. Y de mas desto, a los mismos arcos disminuydos les sobreponian encima arcos rectos que defendiessen ¹⁰⁰debajo de si a los arcos disminuydos y recibiesen en medio las molestias de los pesos.

5.5.2.c Arcos apuntados

Señala el hecho fundamental de que los arcos apuntados resisten fuertes cargas verticales, en particular si éstas se colocan sobre la clave. De ahí la recomendación habitual de colocarlos en las bases de las torres:

Los arcos conpuestos no se ven acerca de los antiguos [;] ay algunos que piensan que se han de poner en las aberturas de las torres, para que hiandan los pesos puestos encima como con proa contrapuesta, ¹⁰¹porque los arcos conpuestos se confirman con los pesos puestos encima, mas que no son opprimidos.

5.5.3 Bóvedas

La parte correspondiente a las bóvedas del tratado de Alberti contiene escasas reglas estructurales. Sin embargo, las consideraciones constructivas

99. Ibídem.

100. Ibídem.

101. Ibídem.

son excepcionalmente interesantes y no tienen comparación con las vagas indicaciones recogidas, en general, en el resto de los tratados examinados. Por esta razón las comentamos a continuación.

5.5.3.a Esqueleto resistente

Alberti insiste en varias partes de su tratado en la necesidad de diferenciar un esqueleto resistente o estructura del resto del edificio. Del mismo modo que Rodrigo Gil, como hemos visto, y que Viollet-le-Duc casi cuatro siglos más tarde, parece distinguir entre partes 'activas' y 'pasivas'. Parecería obvio atribuir este hecho a la influencia gótica, sin duda presente en su obra, pero las citas de Alberti corresponden a las antiguas edificaciones romanas. En efecto, los romanos frecuentemente tejían en el interior de sus masivas estructuras un auténtico esqueleto resistente, en general de ladrillo. Este es el caso del tambor del Panteón de Roma donde un complicado entramado de arcos y machones de ladrillo transmite la carga de la cúpula (ésta sí es de hormigón en masa) a la cimentación. Torres Balbás rastreando el origen de la arquitectura nervada gótica cita numerosos ejemplos de cúpulas y bóvedas romanas con nervios de ladrillo embebidos¹⁰².

Como buen renacentista realiza, en primer lugar, una analogía con los esqueletos de los animales:

Advirtieron los philosophos, en los cuerpos de los animales aver acostumbrado la naturaleza perfeccionar de tal suerte su obra, que no haya¹⁰³ querido que en algun tiempo estuviessen los huessos apartados de los huessos, ni disjuntos.

La idea del esqueleto resistente o estructura como algo autónomo no puede expresarse con mayor claridad:

102. L. Torres Balbás "Bóvedas romanas sobre arcos de resalto." *Archivo Español de Arqueología*, Vol. 64, 1946. pp. 173-208.

103. L. B. Alberti, op. cit., pág. 84.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Assi nos ajuntaremos los huessos a los huessos, y los afirmaremos muy bien con nervios y ataduras, para que sea la orden y conpostura de los huessos tal, que con ella sola, aunque falten las demas cosas este en pie la obra y perfeccionada con sus miembros y firmezas.

La idea del esqueleto resistente aparece todavía más clara en el siguiente pasaje, donde vuelve a distinguir entre nervios ('huesos') y plementerías ('cumplimientos'), que son sostenidas por los nervios:

La razon del conponer las bovedas, guardar se ha la misma que en los muros porque se han de levantar los huessos enteros hasta lo alto de la boveda desde los huessos de la pared, y puestos alli se guiaran segun la manera dellos, y entresi distará por alguna parte quota. Pero de huessos a huessos se estenderán ligaduras y se replenaran los cunplimientos de en medio: pero diffieren en esto que en la pared se conponen y ajuntan las piedras y cada una de las hileras con esquadra y nivel y regla derecha. Pero en la boveda se enderezan¹⁰⁴ las hiladas y las junturas de las piedras azia el centro de su arco con regla flechada.

Más adelante en el tratado vuelve a insistir en la analogía con la naturaleza y en la impostancia del esqueleto resistente:

Finalmente en toda la boveda, como quiera que ella sea, imitaremos a la naturaleza la qual quando ajunto huessos a huessos entrmetio las mismas carnes con vellecillos y ataduras enxeridos por todos los diametros en largo, en ancho, en alto, en bajo, y al traves. Este artificio de la naturaleza me parece que hemos de imitar en el entretexer las piedras para las bovedas.¹⁰⁵

5.5.3.b Cúpulas esféricas

Los comentarios de Alberti sobre las cúpulas demuestran el profundo conocimiento del funcionamiento estructural de las cúpulas que tenían los arquitectos italianos del renacimiento, que ya quedó de manifiesto en el pliego de condiciones escrito por Brunelleschi para la construcción de la cúpula de Santa Maria del Fiore¹⁰⁶. Alberti explica el funcionamiento estructural de las cúpulas esféricas diciendo que se componen de 'arcos' y 'cornijas' (anillos), y efectivamente este hecho es el que determina su comporta-

104. Ibidem.

105. L. B. Alberti, op. cit., pág. 88.

106. El contenido de este pliego se recoge íntegramente en H. Saalman, *Filippo Brunelleschi. The Cupola of Santa Maria del Fiore*. London: Zwemmer, 1980. págs. 230 -236. Para un crítica detallada desde un punto de vista estructural, véase: H. J. Cowan, "A History of Masonry and Concrete Domes in Building Construction." *Building and Enviroment*, Vol.12, 1977. pp.1-24.

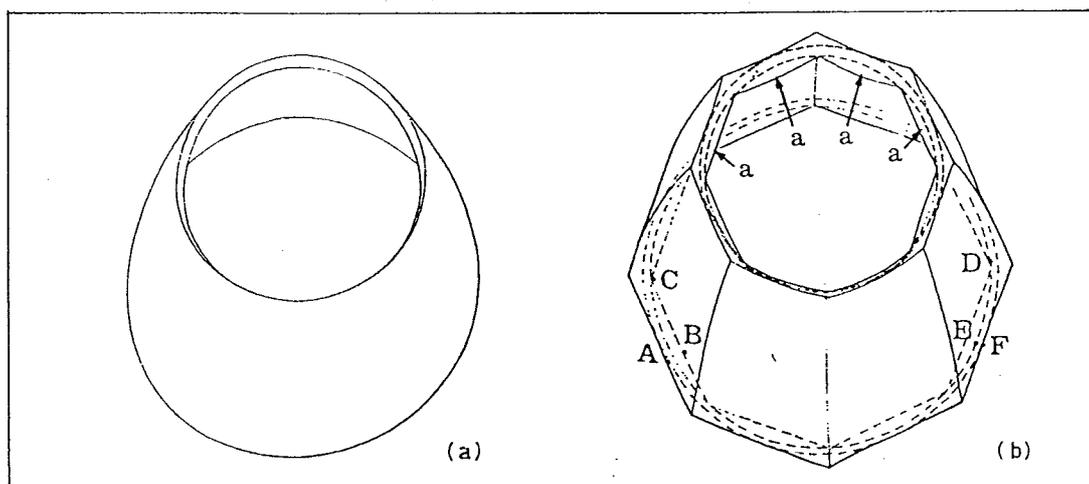
miento estructural, pues a partir de cierta altura la cúpula se vuelve autoportante, por efecto de las compresiones resistidas por los anillos, y puede construirse sin cimbra, o llevar un óculo en su coronación.

Pero entre las bovedas de todas, solo ay una que es la recta spherica, que no pide cimbrias pues ella cierto no consta solamente de arcos, sino tambien de cornijas. Quien podria contar o pensar, quanto sean el uno y otro destes innumerables apegados, aplicados, cortandose entre si en angulos iguales y desiguales, de suerte, que en cualquier lugar por toda la semejante boveda entrecortares alguna piedra, entiendas que tu has puesto cuño de muchos arcos y cornijas, y el que sobrepusiere cornija a cornija, y el que echare un arco sobre otro fingireys que quiere arruynar la obra, de done començara, yendo principalmente todos los cuños o volsores que miran a un centro con igual ahinco y fuerças...

5.5.3.c Cúpulas poligonales

También sabía Alberti que la cúpula poligonal es, en determinadas condiciones, autoportante y puede construirse sin cimbra. Da además la condición geométrica para que esto sea así:

Tambien podras levantar sin algunas cimbrias la boveda angular espherica, con tal que entreteraxas por la grosseza de ella misma otra recta espherica...



MAINSTONE (1977)

Figura 5.20. Estabilidad de cúpulas semiesféricas y poligonales. (a) la cúpula semiesférica es estable en todas las etapas intermedias de la construcción siempre que se ejecute realizando anillos completos, ya que el último anillo actúa como una clave; (b) la cúpula poligonal es estable es capaz de contener dentro de su espesor un anillo circular.

107. *Ibidem.*

108. L. B. Alberti, *op. cit.*, pág. 88.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Mainstone ya hizo notar este hecho en su estudio sobre la cúpula de Santa María del Fiore¹⁰⁹, aunque parece desconocer los citados párrafos de Alberti. Parece evidente que en el siguiente párrafo, donde habla del método a seguir en su construcción se refiere en forma implícita al método ideado por Brunelleschi.

Pero aprovechara que hechas, y endurezidas unas y otras cornijas de piedra enlazar allí debajo livianos cimientos y assas, a los quales los fies tanto andamio o cimbras, quanto baste para sostener las cornijas que se carguen desde ay sobre algunos pies, hasta que se sequen, y despues quando tambien estas partes se endureciesen cada una orden, traspasaras estas ayudas de andamio hasta perfectionar las cosas mas altas, y esto en tanto que acabas la obra.¹¹⁰

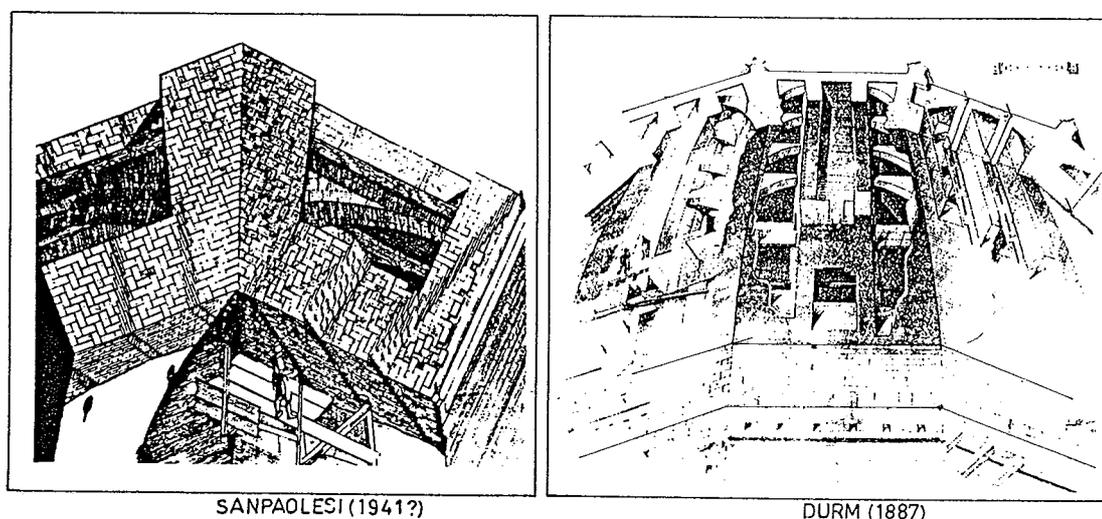


Figura 5.21. Método constructivo de Brunelleschi para Santa Maria del Fiore

5.5.3.d Necesidad de cargar y macizar los rifiones de las bóvedas

Como veremos más adelante, cargando adecuadamente una bóveda podemos aumentar de forma considerable su estabilidad. Además, cuánto más rebajada es una bóveda en arco de círculo es también más estable, pues su línea media se

109. Mainstone, R. J. "Brunelleschi's Dome." *Architectural Review*, Vol. 162, 1977. pp. 156-166.

110. *Ibidem*.

asemeja más a la línea de empujes de las cargas permanentes. Ambos hechos conducen a la práctica habitual, como veremos, de cargar o macizar los riñones.

... y los vacíos que quedan entre las flechaduras de las bovedas, y la pared en que restriban, al qual lugar los officiales llaman muslo, o embecaduras, hinchanse no de tierra o de pedaços secos de edificios viejos, sino antes con fabrica ordinaria y firme, y una vez y otra enlazada con la pared.

5.5.4 Puentes

Las reglas sobre el diseño estructural de puentes formuladas por Alberti constituyeron, con pequeñas alteraciones, la 'doctrina oficial' sobre los puentes hasta mediados del siglo XVIII¹¹². Aunque, como es natural, se construyeron puentes que se apartaban de lo estipulado por Alberti, en particular en lo que se refiere al empleo de arcos rebajados, la regla para el dimensionado de las pilas fue cuestionada por escrito por primera vez por Perronet¹¹³.

Las reglas de Alberti, afectan todos los aspectos fundamentales de su geometría y permiten dibujar la sección de un puente 'ideal'. Así lo hizo Straub, y su restitución aparece en la Figura 5.22.

De hecho no existe ninguna diferencia entre una regla proporcional y un dibujo a escala. Los párrafos que permitieron a Straub restituir la forma del puente de Alberti son los siguientes:

111. *Ibidem*.

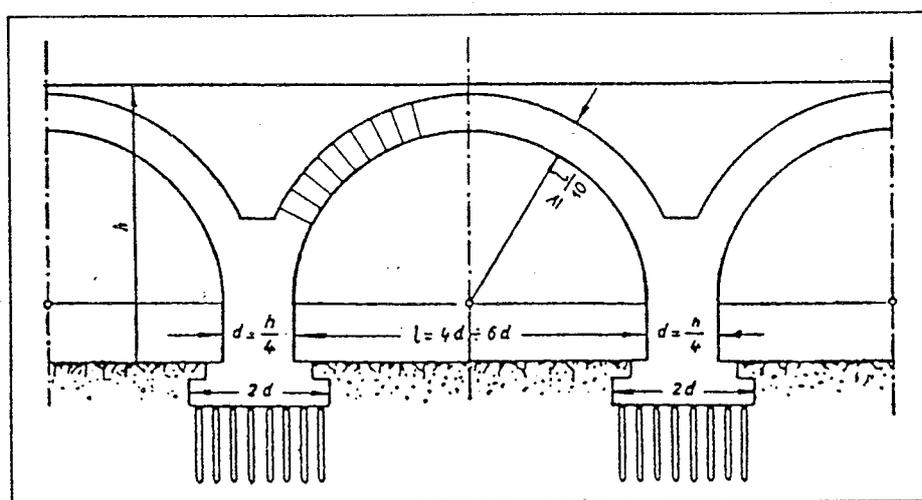
112. Alberti todavía aparece citado como una de las autoridades más importantes en el primer tratado específicamente de puentes el de H. Gautier *Traité des Ponts*. Paris: 1728. Este tratado incluye su primera memoria *Dissertation sur l'épaisseur des culées des Ponts, sur la Largeur des piles, sur la Portée des vousoirs, sur l'Erfort & la Pesanteur des Arches à differens surbaissemens...*, publicada en Paris en 1717. También aparece citado como fuente fundamental en la enciclopedia de J. H. Zedler *Grosses vollständiges Universal-Lexikon Aller Wissenschaften und Künste...* Halle und Leipzig: Im Verlag Johann Heinrich Zedlers, 1735, Vol. 4, *Brücke*, pp. 1542.

113. J. R. Perronet "Mémoire sur la réduction de l'épaisseur des piles et sur la courbure qu'il convient de donner aux voûtes, le tout pour que l'eau puisse passer plus librement sous les ponts." *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, , 1777. pp. 853-64.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

... la grosseza de los pilares sera con la altura de la puente en proporcion subquadrupla.¹¹⁴

... Finalmente cualquier arco que estuviere en la frente de esta boveda se hara de piedra muy dura y grande, no de otra suerte que aquella que tuviste por bien poner en los pilares, y no avra en el arco piedras mas delgadas, que a lo menos no respondan con su grosseza en la decima parte de su cuerda, y la cuerda no sera mas larga que seys vezes la grosseza del pilar, y no mas corta que quatro, y aya enxeridos pernos de arambre para enlazar estos tales cuños entre si, y barretas no flacas.¹¹⁵



(STRAUB 1952)

Figura 5.22. Restitución de las proporciones de Alberti por Straub

Apunta la posibilidad de utilizar el arco rebajado en vez del de medio punto cuando la situación lo exija, pero no se olvida de advertir, como lo hizo hasta la saciedad en el capítulo de las bóvedas, de reforzar en este caso los estribos:

... Diximos, que la boveda era contenida de arcos y cumplimientos, y que el arco era el mas firme el que era recto, y si por la disposicion de los pilares de tal manera corresponde el recto que seas offendido con su demasiado relieve de medio círculo, usaremos del disminuido confirmados muy mucho los lados de la ribera con mayor grosseza.¹¹⁶

114. L. B. Alberti, op. cit., pág. 114.

115. *Ibidem*.

116. L. B. Alberti, op. cit., pág. 115.

Insiste de nuevo en la necesidad de macizar los riñones de las bóvedas:

.... todos los cumplimientos se replenarán por la parte de dentro ¹¹⁷ con piedra; para que no se pueda dar ninguna ligazon mas entera ni mas ajustada que esta ...

Por último, alude a la necesidad de ejecutar las obras de los puentes con cuidado excepcional ya que deben resistir el paso de cargas en ocasiones de gran magnitud:

... las bovedas y arcos, assi por las demas cosas, como por los fuertes y continuos temblores de los carros, conviene que sean muy señaladamente fuertes y maravillosamente afirmados. Y añade que algunas vezes se han de traer por la puente, acaso, grandísimos pesos de colossos ... Y la razon persuade, que a las puentes se les deven muy grandes piedras enteras con el exemplo del yunque, porque si ella fuera grande y muy pesada facilmente sostiene los golpes de los martillos, pero si es mas liviana resiste a los golpes y se conmueve. ¹¹⁸

5.5.5 Torres

Alberti da también reglas sobre el dimensionamiento de las Torres. Aunque este tema se sale del ámbito de la Tesis lo comentaremos por su interés. De hecho, las reglas de Alberti estuvieron en uso hasta mediados del siglo XIX¹¹⁹. Los párrafos son un poco oscuros en ocasiones, pero cabe atribuirlo al hecho de que la obra que consultamos ha sufrido dos traducciones: primero del latín al italiano, y luego del italiano al castellano.

Distingue con absoluto corrección entre los dos parámetros fundamentales en relación con la altura: la anchura de la base y el espesor de los muros. Primero trata de las proporciones generales:

117. *Ibidem.*

118. *Ibidem.*

119. M. Carrillo de Albornoz en su estudio sobre la estabilidad de las torres de los faros decía: '... se sabe que para dar á un muro circular una grande estabilidad en las construcciones ordinarias, basta darle de espesor la dozava parte de su altura'. "Memoria sobre la construcción de la nueva torre de la farola del Puerto de la Habana, dirigida por el Coronel graduado Comandante de batallón de Ingenieros, D. José Benítez." Incluida en la edición castellana de los *Elementos de Arquietctura por John Millington...*, Madrid: Imprenta Nacional, 1848. Tomo II, Apéndice 10, pág. 738.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

... La torre, o sera quadrangula, o sera redonda. En las unas y en las otras es necesario que la altura responda con la anchura en cierta determinada parte.¹²⁰

Así mismo distingue entre los dos tipos básicos de sección: cuadrada y circular. La primera presenta un mayor momento de inercia a igual perfil aparente y puede tener proporciones más esbeltas¹²¹.

La quadrangula quando ha de ser delgada, hazer se ha ancha por la sexta parte de su altura. La redonda tendra quatro vezes el diametro en la altura.¹²²

También da las proporciones para torres menos delgadas:

La que ha de ser muy gruessa si fuere quadrangula hazerse ha ancha no mas que por la quarta parte de su altura. Si redonda tendra el diametro tres vezes la grosseza de la pared.¹²³

El espesor en la base, para torres de sección constante en toda su altura debe ser de 1/10 de la altura:

Si vuire de ser alta por quarenta cobdos dar le has no menos que quatro cobdos. Si se fiziere de hasta cinquenta cobdos, entonces dalle has cinco cobdos, y a la de sesenta cobdos dalla has seys, y proseguiras de ay adelante con semejante graducion, y estas cosas se deben a las torres puras y senzillas.¹²⁴

Las anteriores normas se refieren a torres de sección constante en toda su altura, 'torres senzillas'. Después describe la construcción de una torre donde la sección no es constante sino que se van produciendo reducciones en el espesor a medida que crece la altura. De esta forma, con una mínima reducción en la estabilidad se reduce notablemente el consumo de material:

120. L. B. Alberti, op. cit., pág. 245.

121. No es fácil en un primer momento relacionar estas esbelteces con torres reales. Para que sirva como punto de comparación damos las esbelteces aparentes (altura/ancho) de algunas torres, antiguas y modernas, muy conocidas:

Fábricas	altura (m)	
Faro de alejandría	130	4.3
Torre Asinelli en Bolonia	98	10
Saint Rollox Chimney, (s. XIX)	136	17 (truncocónica)
Acero		
World Trade Center (Twins), New York (s. XX)	410	7
Torre Picasso, Madrid (s. XX)	130	4

122. L. B. Alberti, op. cit., pág. 245.

123. *Ibidem*.

124. *Ibidem*.

Pero el que quisiere hazer torre muy segura contra la fuerza de la tempestad, y muy alegre a la vista sobrepondra cosas cuadradas en las redondas, y redondas sobre las cuadradas, y levantara de grado en grado la obra, de suerte que se vaya adelgazando segun la razon de las columnas, describire la que me parecera ser mas conveniente. Lo primero se levantaran de la planta unos embasamentos quadrangulos, la altura [anchura] dellos tendra la dezima parte de toda la altura que ha de aver en la obra, desde lo alto de arriba hasta lo bajo. La anchura tendra la quarta de esta misma altura...¹²⁵

Las reglas para torres se resumen en la siguiente tabla, donde H es la altura total y A el ancho de fuera a fuera de dos muros opuestos:

Torres	Sección en planta	Esbeltez (H/A)		Espesor
		delgadas	gruesas	
Sencillas	cuadrada	6	4	H/10
	circular	4	3	
Compuestas	variable	4		

Tabla 5.2. Reglas proporcionales de Alberti para las Torres

5.6 Palladio

5.6.1 Los Cuatro Libros de Arquitectura

El tratado de arquitectura de Palladio¹²⁶ publicado en Venecia en 1570 es quizás uno de los más influyentes de la historia de la arquitectura. Aunque en España fue traducido sólo parcialmente en el siglo XVII¹²⁷ y la prime-

125. *Ibidem*.

126. A. Palladio *I quattro libri dell'architettura*. Venecia: Doiminico Franceschi, 1750. Edición facsímil, Milán: Hoepli, 1976. Esta última es la que hemos manejado.

127. A. Palladio, *Libro primero de la Arquitectura de... Que trata de cinco órdenes para fabricar, y otras advertencias, Traducido de Toscano en Castellano, por Francisco de Praues, Architecto...* Valladolid: Ivan Lasso, 1625.

ra traducción completa data del siglo XVIII¹²⁸, fue sin duda conocido y empleado por los arquitectos españoles a finales del siglo XVI.

En su tratado solamente aparece mencionada una regla para dimensionar los contrafuertes y varios modelos de puentes con sus proporciones geométricas fundamentales.

5.6.1.a Contrafuertes y pilares de las Logias

Para dimensionar los contrafuertes Palladio propone, casi de pasada, la que podríamos llamar 'regla del tercio', que consiste en asignar al canto del contrafuerte el tercio de la luz del arco que soporta. Esta regla, como hemos visto fue también utilizado por los antiguos maestros constructores de puentes en España casi 150 años antes (véase la *Addenda* al apartado 5.1 más arriba). Como veremos más adelante en el dictamen que realizó sobre la logia de Brescia, Palladio consideraba esta regla segura y recomendaba su empleo.

Ma si faranno le Loggie co i pilastri, cosi si doveranno disporre, che i pilastri non siano manco grossi del terzo del vano, che farà tra pilastro, e pilastro: e quelli, che saranno ne i cantoni; andaranno grossi per la metà del vano, come sono quelli del Theatro di Vicenza, e dell'Anfiteatro di Capua, overo per li due terzi, come quelli del Theatro di Marcello in Roma; e del Theatro di Ogubio...¹²⁹

Gli fecero gli Antichi alcuna volta ancho tanto grossi, quanto era tutto il vano comme nel Theatro di Verona in quella parte, che non è sopra il Monte. Ma nelle fabriche private non si faranno nè meno grossi del terzo del vano, nè piu de i due terzi, e doverebonno esser quadri...¹³⁰

5.6.1.b Puentes

Palladio da varios modelos de puentes, estableciendo sus relaciones geométricas fundamentales: las dimensiones de la clave y de las pilas en

128. A. Palladio, *Los quatro libros de Arquitectura de ...*, Vicentino. Traducidos é ilustrados con notas por Don Joseph Francisco Ortiz y Sanz, Presbítero. Madrid: Imprenta Real, 1797.

129. Palladio, *I quattro libri...*, op. cit. pág. 16.

130. *Ibidem*.

relación con el vano. Cada uno de estos tipos dibujados puede considerarse como una 'regla de diseño', análoga a la deducida por Straub a partir de las reglas de Alberti. El arquitecto o ingeniero podía luego aceptar o modificar esas proporciones en función de las condiciones particulares del proyecto.

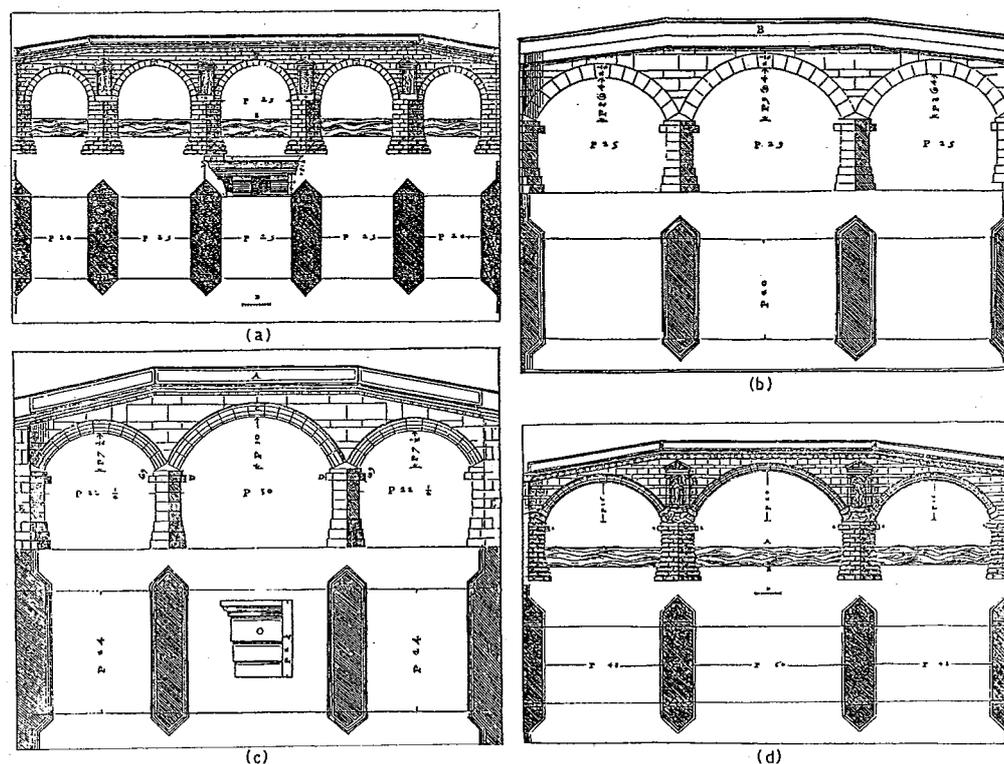


Figura 5.23. Modelos de puentes recogidos por Palladio. l = vano mayor; e = espesor en la clave; p = ancho de las pilas. (a) Puento romano de Rimini: $e = 1/10$; $p = 1/2$; (b) Puento medieval sobre el Rerone: $e = 1/12$; $p = 1/6$; (c) Puento de Vicenza de Palladio: $e = 1/12$; $p = 1/6$; (d) Proyecto de Puento de Palladio: $e = 1/17$; $p = 1/5$.

De hecho, como veremos, la práctica de diseñar a partir de ejemplos construidos fue la norma de diseño fundamental para los puentes de piedra hasta su desaparición a principios de siglo. En los tratados de puentes de los siglos XVIII y XIX, se dedicaba un parte considerable a realizar un catálogo de todos los puentes conocidos de los que se daban, además de datos históricos, sus dimensiones fundamentales: luz del vano o vanos, espesor en la clave y arranques, espesor y altura de las pilas¹³¹.

131. Véase por ejemplo: H. Gautier *Traité des Ponts...* París: 1714, el primer tratado dedicado específicamente a puentes; J. Leupold *Theatrum Pontificiale oder Schau-Platz der Brücken und Brücken-Baues*. Leipzig: Joh. Gledischens seel. Sohn, 1726, precursor de los grandes tratados alemanes; E. M. Gauthey *Traité de la*

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Palladio da cuatro modelos de puentes con sus dimensiones y proporciones, hemos reproducido en la Figura 5.23 (véase página anterior), estos diseños con indicación de las proporciones fundamentales, tal y como las cita Palladio, del espesor de la clave y ancho de las pilastras.

5.6.2 Logia Publica del Palacio de Brescia

Este edificio, de poca importancia en sí mismo, merece ocupar un lugar en la historia de la construcción por los debates que se suscitaron entorno a su estabilidad. Las opiniones vertidas sobre este tema, que fueron recogidas y publicadas por Zamboni¹³², son del mayor interés para estimar las ideas y conocimientos al respecto de los arquitectos y constructores del Renacimiento.

Destacan entre las cuestiones que se debatieron el tema de los contrafuertes y de la estabilidad de las bóvedas. En el primer caso se trataba de decidir si los muros y pilares sobre los que se asentaba el edificio tenían un espesor suficiente. En el segundo, se quería determinar si las bóvedas sostenidas sobre los pilares y contrafuertes eran igualmente estables.

5.6.2.a Pilares y contrafuertes

Palladio da primero la 'regla general', y, luego, la aplica al caso particular. Así, afirma con rotundidad que si los espesores de los contrafuertes son iguales al tercio de la luz de las bóvedas, el edificio tiene una

construction des ponts. Paris: 1809-1813, quizá el tratado de mayor difusión en el siglo XIX; etc... al final de esta tradición encontramos la obra de P. Sejourné *Grandes Voûtes*. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils, 1913-1916. Esta obra monumental cataloga todos los puentes en arco de fábrica u hormigón armado con luces por encima de los 40 metros.

132. B. Zamboni *Memorie intorno alle publiche fabbriche piu insigne della cita di Brescia*. Brescia: 1778. El debate y los textos que citaremos a continuación aparecen citados por J. Rondelet *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: 1834-48, Vol. 4, pp. 389-391, lám. 195, figs. 45-47. No hemos podido consultar la obra original, por lo que las citas, en francés, responden a la traducción realizada por Rondelet.

estabilidad suficiente, y que dándoles la mitad del vano tendrán, entonces, una estabilidad a toda prueba. Como hemos visto, estas mismas reglas aparecían mencionadas en su tratado.

Dado que los contrafuertes de la Loggia en cuestión responden a la segunda proporción, dice que no se puede poner en duda la estabilidad del edificio, y, añade como factor favorable la situación de la carga de los muros interiores, que se retranquean hacia el interior.

A l'égard des pieds-droits, nous disons qu'il est évident pour tout architect expérimenté, qu'un bâtiment quelconque, établi sur des pieds-droits qui ont en grosseur le tiers du vide des arcs qui les séparent, a toute la solidité convenable pour qu'on puisse lui assurer une longue durée; mais, si au lieu du tiers cette dimension était portée à la moitié du même espace, on pourrait alors, en toute sécurité, garantir à une pareille construction une durée à l'épreuve de tous les âges. Et comme les pieds-droits sur lesquels reposent les murs du palais de la loge de Brescia, sont précisément établis sur cette dernière proportion, on ne saurait donc mettre en doute qu'ils n'aient la force nécessaire pour maintenir la charge qu'ils ont à porter, d'autant plus encore que cette charge est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur des murs, disposition la plus favorable de toutes, et qui contribue puissamment à la solidité des édifices.

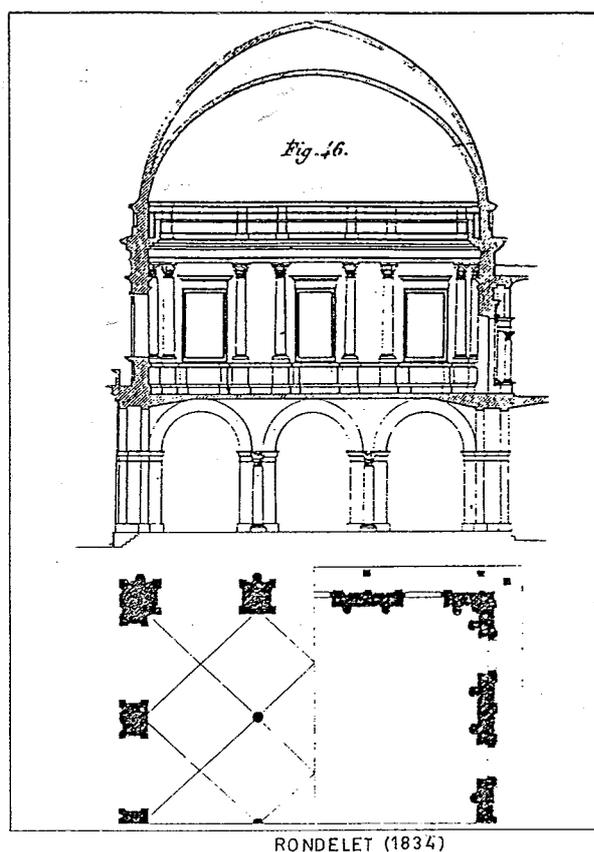


Figura 5.24. Loggia de Brescia

5.6.2.b Bóvedas: forma de colapso

El pasaje correspondiente a las bóvedas es interesante puesto que describe el modo de colapso y alude al equilibrio de las distintas partes para asegurar la estabilidad. Palladio dice que el colapso de la bóveda se produce por descenso de la parte superior, pero que para esto suceda los estribos deben girar, lo que no es posible ya que son más pesados que la bóveda con su posible sobrecarga. No hay ninguna mención a la posibilidad de fallo del material. Es una prueba más de la aplicación intuitiva por los antiguos arquitectos del 'principio de semejanza' en el diseño de las estructuras de fábrica.

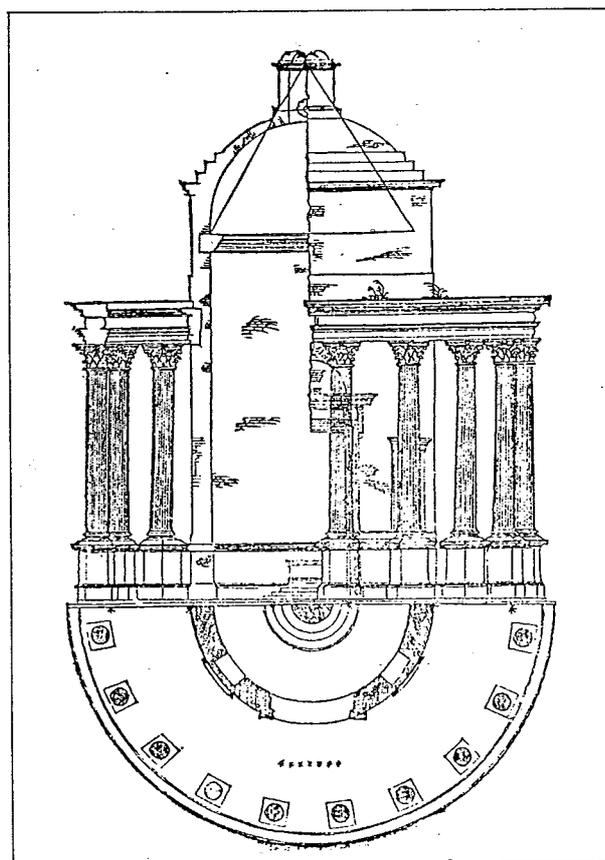
Relativement aux voûtes intérieurs qui portent sur ces pieds-droits et sur les colonnes du milieu, il nous semble que l'architecte leur a donné une proportion convenable, et que l'appui qu'elles trouvent contre les pieds-droits d'une aussi forte dimension est plus que suffisant pour contenir l'effort que'exerce sur les parties inférieurs cette portion d'arc qui forme le sommet, et qui tend constamment à descendre dans une voûte. Mais, pou qu'un pareil effet fût à craindre, il faudrait d'abord admettre que ce segment pût se redresser, ce qui ne pourrait avoir lieu sans que les murs ne fussent poussées au dehors au moins d'une demi-brasse (ce qui fait un quart pour chaque côté), et conséquemment avec eux, tout le poids dont ils sont chargés. Il arriverait donc que l'effort du moindre poids (qui est ici celui de cette portion d'arc avec les personnes qui pourraient se trouver dessus), surmonterait celui d'un plus considérable, résultant de l'ensemble des pilastres, des murs qu'ils supportent et du toit qui couvre l'édifice; ce qui paraît bien évidemment impossible: en un mot, qu'un pois moindre pût imprimer un mouvement à un poids beaucoup plus fort. On voit par-là jusqu'à quel point l'appréhension de la chute de ces voûtes peut être fondée.

5.6.2.c Cúpulas: forma del extradós para una cúpula esférica

Por último, Rondelet cita los comentarios de Zamboni sobre la figura ideal del extradós de una cúpula semiesférica según las reglas propuestas por Palladio en este debate. La figura procede de la edición de Daniel Barbaro de los Diez Libros de Arquitectura de Vitruvio, y es la interpretación del templo circular. El diseño, inspirado en la cúpula del Panteón, es muy similar también al propuesto por Bramante para la cúpula de San Pedro.

Voici, dit ce célèbre architecte, sur quelles données devra être établi le profil de la coupole: sa plus forte épaisseur sera au droit de l'imposte; de là l'extérieur sera erigé verticalement jusqu'à la hauteur du quart de son diamètre. Cette disposition a l'avantage d'augmenter sur ce point l'effort de la pression verticale, et de maintenir ainsi plus solide-

ment la voûte à sa naissance. Au-dessus de ce mur, l'épaisseur de la voûte ira en diminuant jusqu'au pied de la lanterne, afin d'alléger, autant que possible, la charge en cet endroit: les hauteur et largeur de la lanterne seront déterminées par les extrémités d'un triangle équilatéral, construit sur le diamètre de la coupole, ainsi que le dessin l'indique; les gradins qui rachètent à l'extérieur la naissance de la voûte au-dessus du mur érigé sur l'imposte, ajoutent encore à la solidité, parce que le poids de leur masse retombe précisément dans la largeur du plan sur lequel la coupole est assise. Au reste, cette construction, quoique simple et sans ornement, présente d'elle-même la décoration la plus satisfaisante.



BARBARO (1556)

Figura 5.25. Templo períptero con cúpula

5.7 Cristóbal de Rojas

5.7.1 El tratado

Cristóbal de Rojas, ingeniero militar de Felipe II, publicó en 1598 su tratado de fortificación¹³³. Tras una primera parte dedicada a establecer los fundamentos geométricos, está dedicado fundamentalmente a la práctica de la

133. Cristobal de Rojas, *Teórica y práctica de fortificación, conforme las medidas y defensas destes tiempos, repartida en tres partes*. Madrid: Luis Sánchez, 1598. Edición facsímil, Madrid: CEHOPU, 1985.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

fortificación. Lo incluimos en este inventario por la mención expresa de una regla estructural y del empleo de modelos.

5.7.2 Regla sobre contrafuertes

Cita brevemente la "regla del tercio" que hemos comentado antes al tratar de Palladio:

... siendo un arco de medio punto, le bastara por estribo la tercia parte de su hueco; y algunas veces bastara la quarta parte, quando cargasse mucho peso sobre los pilares...¹³⁴

Es interesante la matización sobre el peso añadido a los contrafuertes: evidentemente sabía que el problema fundamental es de equilibrio y no de resistencia.

5.7.3 Empleo de modelos

Al tratar de los cortes de cantería alude expresamente al empleo de modelos. Dado que, como hemos visto, un modelo a escala puede servir para valorar la estabilidad de la estructura a tamaño real, es importante registrar su empleo frecuente, aunque no aparezca mención alguna explícita en este sentido.

... no pondre por escrito la declaracion de los cortes de los arcos, porque seria menester una rezma de papel para poder declarar algo de su mucha dificultad, por ser cosa que consiste todo en experiencia, y que no se puede saber perfectamente el cerramiento de un arco, sino es contrahaziendolos por sus piezas de barro, ò de yeso, y esto digo por la esperiencia que tengo dello, que en tiempo de mi mocedad me ocupe de contrahazer, y levantar modelos de muchas diferencias de cerramientos de capillas...¹³⁵

134. C. de Rojas, op. cit., pág. 97.

135. Op. cit., pág. 89.

5.8 Juanelo Turriano

5.8.1 El manuscrito

El manuscrito que vamos a estudiar es de gran importancia dentro de la Historia de la Técnica en general ya que se trata del primer tratado de lo que, hasta el siglo XIX, se conoció como *Arquitectura Hidráulica*.

Se conserva en la Biblioteca Nacional de Madrid¹³⁶. Son cinco volúmenes y en el primero lleva el título: *Los veinte y un Libros de los Ingenios, y Maquinas de Juanelo, los quales le Mando escribir y Demostrar el Chatolico Rei D. Felipe Segundo Rey de las Hespañas y nuevo Mundo...*

Debido a la inclusión en el título del nombre de Juanelo Turriano el manuscrito se le ha atribuido tradicionalmente, a este ingeniero y relojero italiano de Felipe II.¹³⁷ García-Diego lo fecha entre 1564 y 1595¹³⁸. Dada la indeterminación del tema en la actualidad daremos prioridad a lo que aparece en el título y consideraremos, aunque sea provisionalmente, a Juanelo como su autor.

5.8.2 Reglas estructurales

Las únicas reglas estructurales del tratado se refieren a los puentes y están contenidas en el Libro 18 "De como se an de hazer las pilas de las puentes de piedra en diversas maneras." Las reglas estructurales y construc-

136. Biblioteca Nacional de España, Madrid, Mss. 3372 a 3376 (5 vols.)

137. En la actualidad existe polémica sobre la autoría del manuscrito y la tendencia general es a atribuírsela a un ingeniero español. Para una discusión del tema véase el Prólogo de la edición facsímil del manuscrito por Juan Antonio García Diego titulada expresivamente: *Pseudo-Juanelo Turriano. Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. Madrid: Turner / Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, 1983. 2 vols. En este prólogo se aportan las referencias bibliográficas hasta la fecha de su publicación. Otras referencias más recientes son: N. García-Tapia "Los 21 libros de los ingenios y de las máquinas: su atribución." *Boletín del Seminario de Estudios sobre Arte y Arqueología*, Vol. 50, 1984. pp. 434-439 y J. A. García Diego *Juanelo Turriano, Charles V's Clockmaker: The Man and His Legend*. Nantucket, Mass: Science History Publications, 1986. De este último existe edición española.

138. *Pseudo-Juanelo...*, op. cit. Prólogo, pág. 26.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

tivas tienen su origen en el tratado de Alberti en el que evidentemente está inspirado (de hecho muchos párrafos estén copiados literalmente). Solamente en el aspecto constructivo aparecen innovaciones en el manuscrito de Juanelo, con una minuciosa descripción del proceso de construcción de las pilas de los puentes.

5.8.2.a Arcos

Juanelo suscribe la doctrina de Alberti sobre el 'arco ideal':

El que es mas fuerte de todos los arcos es el de medio redondo; porque ninguna de las otras maneras es tan fuerte ni parece tambien, ni tiene tanta gracia como el q' es hecho de medio redondo justamente...¹³⁹

Insiste, como Alberti, en la necesidad de rellenar los riñones de las bóvedas con buena sillería, para mejorar la estabilidad:

... assi mesmo digo, que los arcos se deven hazer, con sus senos, o, costados que sean henchidos y firmes...¹⁴⁰

... lo que hay entre un arco y el otro se deve ir hinchendo de piedra de tal modo, que todo sea muy firme, ni se halle en toda la obra cosa mas firme...¹⁴¹

A continuación describe un procedimiento de ahorrar material, que dice haber visto en Italia, colocando arquillos apoyados sobre los arcos grandes¹⁴². Los arquillos son rebajados y descargan en el lugar óptimo, aproximadamente en la junta de rotura de los arcos grandes. El texto de Juanelo no deja lugar a dudas de que este aspecto era conocido:

Haorranse piedra devaxo de la boveda B. que es la que haze A. y C. en aquel angulo se puede haorran gasto y mucha piedra y cal aun tiempo; porque aquel arquillo B. es de mucha fuerça para los dos arcos grandes, y si huviere alguna piedra que fuere muy blanda, o, floxa, puédase poner en aquellos costados del arquillo hazia los arcos A.C. ençima de la B. y assi

139. Juanelo op. cit. fol. 374v.

140. *Ibidem*.

141. Juanelo, op. cit. fol. 376r.

142. Es la primera vez que este ingenioso sistema aparece en un tratado. Casi 150 años más tarde, Gautier lo menciona en su *Traité de Ponts*, publicado en Paris en 1714. Para un estudio histórico del tema, véase E. C. Ruddock "Hollow spandrels in arch bridges: a historical study." *Structural Engineer*, Vol. 52, 1974, pp. 281-292. El estudio se limita en la práctica a los puentes ingleses.

se pondra en obra lo que pareciera no servir para nada; porque aquel arquillo B. tiene mucho valor en aquel lugar...¹⁴³

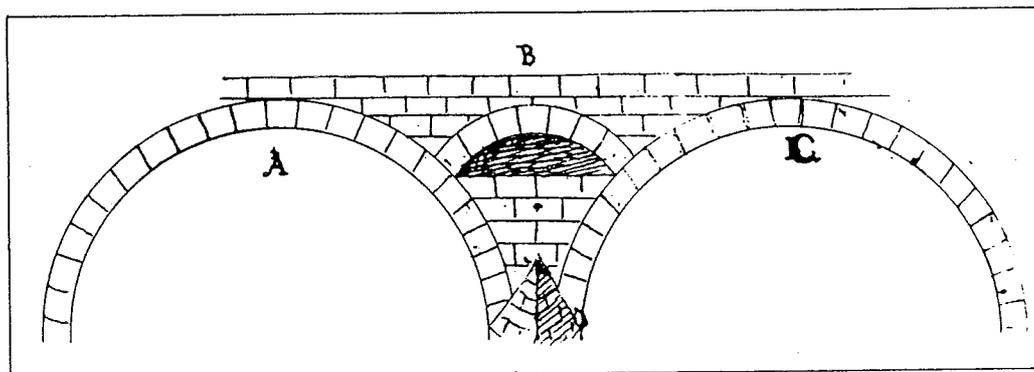


Figura 5.26. Aligeramiento de los riñones en los puentes

En cuanto al canto de los arcos no da regla, pero sí aconseja, de nuevo siguiendo a Alberti, afirma que:

... conviene hazerlas muy rezias, por causa del grande atronamiento de los carros,... y otros pesos que ordinariamente se offrescen passar por la puente, como son artillerias, colossos, bobeliscos,..¹⁴⁴

Las claves de los arcos, recomienda que sean más grandes que el resto de las dovelas, y que se introduzcan, al final, a golpes con un martillo de madera para que hagan presión contra las otras dovelas antes del descimbramiento. De esta manera se pueden reducir los descensos de la clave en el momento del descimbramiento, y la línea de empujes se acomoda mejor dentro

143. *Ibidem*.

144. *Ibidem*, fol. 372r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

del núcleo central de inercia.¹⁴⁵ Ambas consideraciones, como veremos, mejoran la estabilidad del arco.

... deve-se labrar la clave del arco algo mas ancha en la parte de arriba, que ninguna de las otras piedras, la qual çierra el arco... y aun es necesario hazerla entrar a fuerça con calarla con algunos golpes para que entre con un maço de madera para que no se rompa la piedra y hincandose con fuerça haze que se aprieten todas las demas del arco y siendo muy bien apretadas estan muy mas firmes en su lugar y hazen todas muy bien su officio...¹⁴⁶

5.8.2.b Pilas y estribos de los puentes

Juanelo considera el dimensionado de las pilas como fundamental dentro de la construcción de puentes. Lo trata, pues, con detalles dando ejemplos numéricos y diagramas. Las reglas que da están tomadas de Alberti:

No se haga pues mas ancha la cuerda del arco de la puente que quanto es seis vezes gruessa su pila, y esto todo quanto se les puede quitar á las pilas, ni en alguna manera se çufre hazer las pilas mas delgadas de una sesena parte de la cuerda del arco, ni tampoco mas gruessas de la quarta parte de lo largo de la cuerda del arco, que ha de cargar ençima della.¹⁴⁷

Para que no quede duda repite de nuevo un ejemplo y, lo que es más interesante, realiza un dibujo a escala de un arco y el intervalo de variación posible de las pilas, sin duda para acostumbrar el 'ojo' del lector a las proporciones adecuadas:

Digamos agora que el arco tiene de cuerda, de modo que la sesena parte de sesenta es diez que seria lo ancho de la pila, y esto es hazerla tan estrecha, como se pueda hazer, y si tomásemos los mismos sesenta y hiziessemos dellos quatro partes, que es la mayor anchura que se pueda dar a una pila, q' vendria a ser quinze; de suerte que en estos dos extremos se pueden tomar todos aquellos medios, que hay de diez a quinze, iran repartiendo como mejor les

145. Este procedimiento aparece citado como el tradicional por Perronet: 'Pour diminuer le tassement des voûtes et faciliter le décintrement des ponts, l'usage ordinaire a été, jusqu'au présent, de poser à sec un certain nombre des dernier cours de voussoirs; de les serrer fortement avec des coins de bois chassés à coups de maillet entre des lattes savonnées, et de les couler et ficher ensuite avec mortier de chaux et ciment'. Véase su "Memoire sur le cintrement et le décintrement des ponts, et sur les differens mouvements que prennent les voûtes pendant leur construction." *Memoires de l'Academie Royale des Sciences*, , 1773. pp. 33 y ss. Freyssinet, el último gran constructor de puentes de fábrica (y también fundador de una nueva forma de construir los puentes, con hormigón armado), ideó un procedimiento análogo al propuesto por Turriano para centrar la línea de empujes. Consistía en colocar unos grandes gatos hidráulicos y precomprimir la clave antes de introducir las últimas dovelas. El método está descrito en: E. Freyssinet "Perfectionnements dans la construction des grandes voûtes." *Le Génie Civil*, Vol. 58, 1921. pp. 97-102, 124-128, 146-150.

146. *Ibidem*, fols. 375v-376r.

147. *Ibidem*.

pareciera, aunque la mejor proporçion es de treze á doze y doze y medio y sale siempre más verdadera; de suerte que se puede quitar de quinze y añadir á diez, hase esto de hazer ¹⁴⁸ con buen juicio y discrecion y si la pila es quinze, no puede ser el arco menos de sesenta...

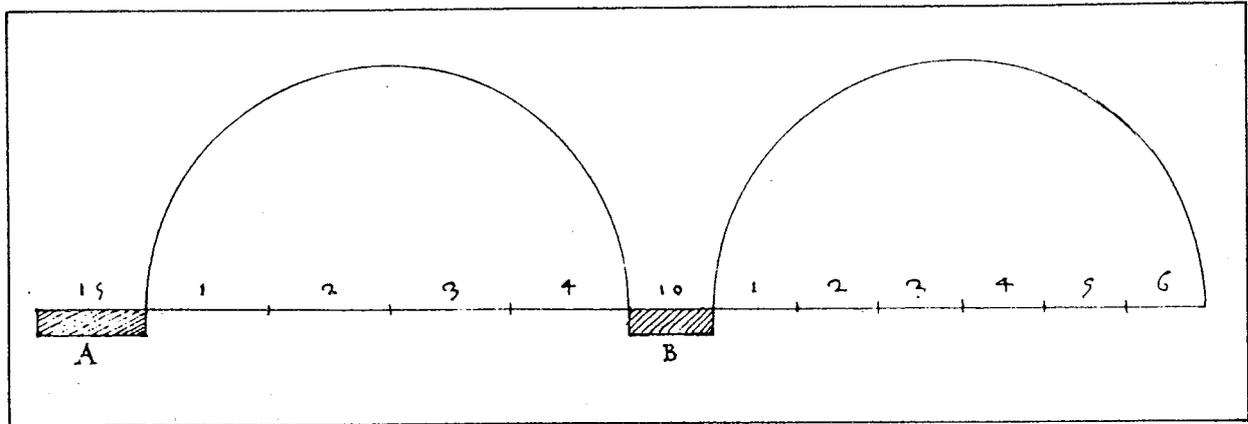


Figura 5.27. Intervalo de variación posible de las pilas de los puentes

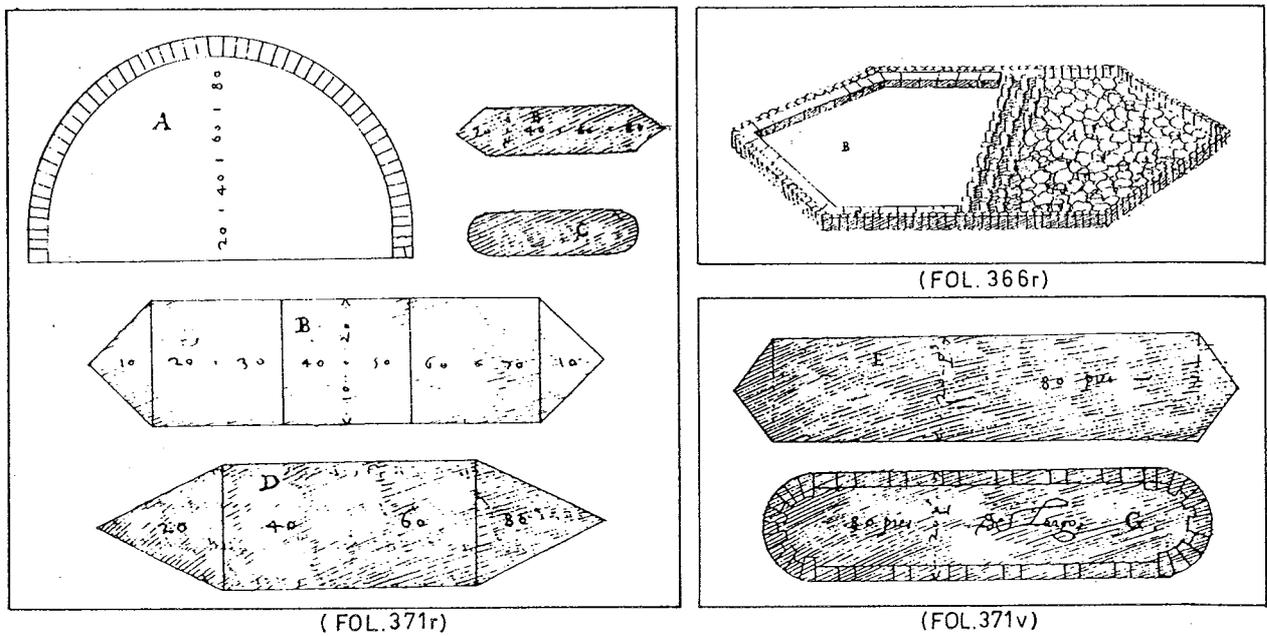


Figura 5.28. Proporciones de arcos y pilas

148. *Ibidem.*

5.9 Las comisiones de expertos: la Catedral de Gerona

Para conocer mejor el pensamiento estructural de los antiguos maestros y arquitectos nada más directo que acudir a sus propios comentarios. Como hemos visto la tradición de los constructores era hasta el renacimiento puramente oral y, además, en las logias medievales se exigía el secreto; por todo ello, estos comentarios son muy escasos. Uno de los pocos sitios donde es posible hallarlos es en las conclusiones de las comisiones de expertos que se formaban para debatir problemas estructurales. Hemos mencionado ya las formadas con motivo de los problemas de la cúpula de San Pedro, en 1742. En Italia en el siglo XV es famosa la de la Catedral de Milán¹⁴⁹. En el siglo XVI no eran infrecuentes. En España cabe citar las de Gerona en 1417, Zaragoza, alrededor de 1500, y Salamanca en 1512. De la primera y la última se conservan las actas de las conclusiones¹⁵⁰.

El caso de Gerona es particularmente interesante para el tema que nos ocupa. En el año 1416 la catedral estaba incompleta y sólo se había edificado el ábside semicircular y un primer tramo de la iglesia con tres naves¹⁵¹. En 1419 el maestro de las obras, Guillermo Boffill, propuso un plan para su terminación que consistía en edificar una sola nave que cubriera con un solo vano todo el ancho de la Catedral. Nunca hasta entonces se había edificado

149. Los mejores estudios son los de: J. S. Ackerman, J.S. "Ars sine scientia nihil est". Gothic theory of architecture at the Cathedral of Milan." *Art Bulletin*, Vol. 31, 1949. pp.84-111, y P. Frankl "The Secret of Medieval Masons." *Art Bulletin*, Vol. 27, 1945. pp.46-64.

150. Están publicadas en G. E. Street *Some Account of Gothic Architecture in Spain*. London: 1865, formando los Apéndices C (Salamanca) y H (Gerona). Las actas de Gerona también están publicadas en E. Llaguno y Almirola y J. A. Ceán Bermúdez *Noticia de los arquitectos y arquitectura de España desde su restauración*. Madrid: 1829, Vol. I, pp. 261-275.

151. Para una monografía sobre la catedral véase: J. Bassegoda *La Catedral de Gerona. Apuntes para la monografía de este monumento*. Barcelona: 1889.

una nave de crucería de estas dimensiones¹⁵² y esto provocó el miedo y fuertes disensiones en el seno del Capítulo.

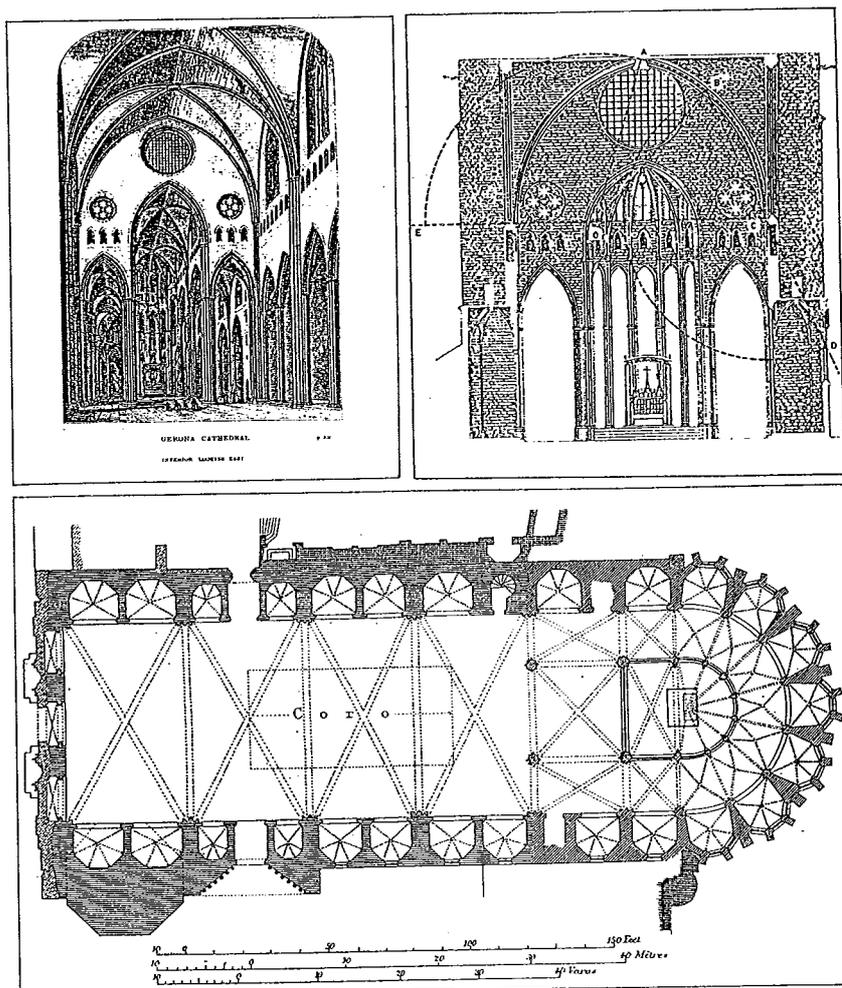


Figura 5.29. Catedral de Gerona. Planta, sección y vista interior

152. En efecto, la luz es de 73 pies (22 m) y supera con creces el de las más grandes catedrales góticas europeas:

Albi	58 pies	(17.4 m)
Toulouse	60	(18)
Amiens	49	(14.7)
Paris	48	(14.4)
Bourges	49	(14.7)
Chartres	50	(15)
Colonia	44	(13.2)
Narbonne	54	(16.2)
Palma de Mallorca	67	(20)

Datos según Street, op. cit. pág. 323.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Para resolver la situación se decidió convocar una Comisión de arquitectos¹⁵³ que deberían responder por separado y bajo juramento a tres preguntas relacionadas con el plan del maestro Boffill, quien fue llamado en último lugar y respondió también a las preguntas.

Las preguntas trataban de dilucidar:

- a) Si la solución de una nave ofrecía suficiente seguridad.
- b) Si sería congruente proseguir la solución de tres naves.
- c) Si podría armonizarse la solución de nave única con la cabecera de tres naves.

El resultado es sorprendente: ni uno solo de los arquitectos consultados dudó de la suficiente seguridad de la solución propuesta, y todos ellos declararon que los contrafuertes previstos eran suficientes. Las críticas (siete de los consultados se declararon partidarios de la solución de tres naves), se centraron en la 'bondad estética' de la solución, no en su viabilidad.

Guillermo Boffill incluso manifestó que a los contrafuertes les sobraba un tercio de espesor. Esta afirmación es extraordinariamente importante en el contexto del presente estudio pues sugiere que los antiguos constructores conocían las proporciones de colapso de contrafuertes y daban la seguridad suficiente aumentando el espesor en una cierta proporción, en este caso un tercio.

La confianza de los arquitectos consultados en las proporciones de bóvedas y contrafuertes parece haber estado justificada, pues hasta la actua-

153. Los arquitectos, *magistri operi*, consultados eran: Paschasius y Joannes de Xulbe, de la catedral de Tortosa; Petrus de Vallfogona y Guillelmus de la Mota de la catedral de Tarragona; Bartolomeus Gual, de la catedral de Barcelona; Antonius Canet, de la de Seo de Urgel; Guillelmus Abiell, de Santa María del Pino; Arnaldus de Vallerias, de la catedral de Menorca; Antonius Antigoni, de la de Castellón de Ampurias; Guillelmus Sagrera, de la catedral de Perpiñán; Joannes Guinguamps, de la catedral de Narbona y, el maestro de Gerona, Guillelmus Boffiy.

lidad, más de 400 años ya que la bóveda se terminó en 1579, el edificio sigue en pie y no tenemos noticia de que haya presentado ningún problema estructural en este largo espacio de tiempo.

5.10 Reglas estructurales del gótico tardío alemán

Como en el caso español los manuscritos que se conservan sobre la tecnología constructiva gótica corresponden a los siglos XV y XVI. Aunque el tema se sale del ámbito de la presente Tesis creemos interesante, aunque solo sea a efectos comparativos enumerar las reglas estructurales del gótico alemán de las que hemos tenido noticia, todas ellas a partir de fuentes secundarias.

Los métodos constructivos del gótico alemán se han estudiado con exhaustividad, existiendo en la actualidad un inventario casi completo del material documental¹⁵⁴. Sin embargo, el tema de las reglas estructurales se menciona raramente. Las siguientes reglas están extraídas de las dos únicas fuentes secundarias que hemos localizado sobre el tema: las de Ungewitter¹⁵⁵ y Shelby/Mark¹⁵⁶.

5.10.1 Ungewitter: reglas para contrafuertes

El libro de Ungewitter es, como su nombre indica, un *Manual de construcción gótica*. Su objetivo era proporcionar una herramienta de trabajo para

154. Para un bibliografía véase P. Hause *Gotische Architekturzeichnungen in Deutschland*. Diss. Bonn 1973. Sobre la estereotomía gótica, véanse cualquiera de las numerosas contribuciones de W. Müller, en particular: "Technische Bauzeichnungen der deutschen Spätgotik." *Technikgeschichte*, Vol. 40, 1973. pp. 281-300. Sobre las monteas grabadas en suelos o paredes: W. Schöller "Ritzzeichnung. Ein Beitrag zur Geschichte der Architekturzeichnung im Mittelalter." *Architectura*, Vol. 19, 1989, pp. 36-61.

155. G. C. Ungewitter, *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. III Auflage neu bearbeitet von K. Mohrmann*. Leipzig: 1890, Vol. 1, pp. 273-276, con el título 'Geometrische Beziehungen in den Grundrissmassen. Verhältnis der Widerlager zu den Spannweiten.'

156. L. R. Shelby y R. Mark "Late Gothic Structural Design in the 'Instructions' of Lorenz Lechler." *Architectura*, Vol. 9, 1979. pp. 113-131.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

los arquitectos y constructores de iglesias neogóticas de finales del siglo XIX. Por ello su carácter es más bien práctico, y las citas históricas no aparecen debidamente referenciadas.

a) Regla n°1. Citando a Hoffstadt¹⁵⁷ menciona la siguiente regla que permite dimensionar el grosor del muro y el contrafuerte: se toma como espesor del muro $1/10$ de la luz; se construye un cuadrado con esta dimensión y su diagonal nos da el resalto del contrafuerte. Esto conduce a un canto del contrafuerte en relación con el vano de:

$$C = L (1 + \sqrt{2}) / 10 = L / 4.14$$

b) Regla n°2. Cita la regla de Martínez de Aranda, dando como fuente a Viollet-le-Duc¹⁵⁸. También menciona una modificación por Hase¹⁵⁹, donde se toma como base de la construcción no el arco fajón sino uno intermedio, en el caso de que la bóveda de crucería tenga peralte. No se citan fuentes manuscritas y parece una reelaboración de la regla por parte del autor.

c) Regla n°3. Cita la regla de Hernán Ruiz. La regla se aplicaba originalmente para determinar los estribos de los ábsides poligonales, aunque Ungwitter precisa que podría también haberse empleado en los tramos rectos,

157. F. Hoffstadt *Gotisches ABC Buch, das ist: Grundregeln des gotischen Styls für Künstler und Werkleute*. Frankfurt: 1840.

158. Ungwitter sólo citaba el nombre de Viollet. Hemos localizado la cita aludida en su *Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française du XI au XVI siècle*. Vol. 4, Paris: 1878, pág. 63. No cita fuentes manuscritas, sólo dice, hablando de los posibles conocimientos estructurales de los constructores góticos: "Peut-être possédaient-ils quelques-unes de ces formules mécaniques que l'on trouve encore indiquées dans les auteurs de la renaissance qui ont traité de ces matières, et qu'ils ne donnent point comme des découvertes de leur temps, mais au contraire comme des traditions bonnes à suivre."

159. Ungwitter solo cita el nombre del autor. Consultando los índices de la Biblioteca del Congreso de los EE. UU. y de la Biblioteca Nacional de Paris, sólo hemos encontrado una referencia con ese nombre: C. W. Hase *Die mittelalterlichen Baudenkmäler Niedersachsen*. Hannover: 1855-83. 3 vols.

dado que aunque en los tramos absidiales la carga es menor existe un efecto de composición de fuerzas.

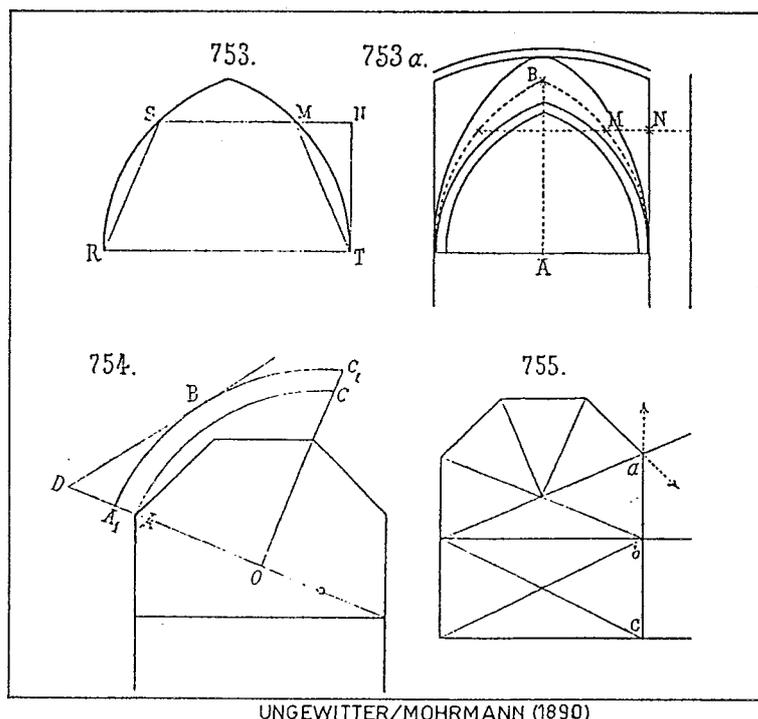


Figura 5.30. Ungewitter: reglas de Martínez de Aranda y Hernán Ruiz

5.10.2 Lechler

El mencionado estudio de Shelby y Mark se ocupa de uno de los manuscritos más antiguos del gótico alemán, las 'Instrucciones' que escribió en 1516 Lorenz Lechler para su hijo Moritz¹⁶⁰.

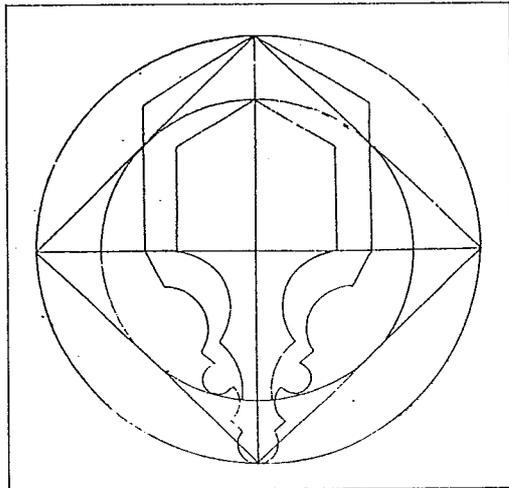
El manuscrito contiene algunas reglas simples sobre el diseño de los muros y contrafuertes y de las bóvedas:

a) muros y contrafuertes. El muro tendrá de espesor $1/10$ de la luz de la nave. El contrafuerte presentará una relación canto/ancho de 2 a 1. Apa-

160. El manuscrito original ha desaparecido y sólo hay una copia de finales del siglo XVI, que se conserva en el Archivo Histórico de Colonia. Véase Shelby y Mark, op. cit. pág. 113-114.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

rentemente no cita ninguna regla que relacione el espesor del muro con el del contrafuerte con lo que éste queda indeterminado.



LECHLER (1516)

Figura 5.31. Arcos transversales y cruceros

b) bóvedas. Las reglas de Lechler sólo se ocupan de dimensionar los nervios transversales (fajones o perpiaños) y los cruceros. Utiliza como modulo base el ancho del muro. Los arcos cruceros deben tener de canto $1/3$ del ancho del muro, es decir, $1/30$ de la luz, y su relación canto/ancho es de 2 a 1.

Los arcos transversales los obtiene a partir de los anteriores mediante una construcción geométrico; son mayores en una relación $7/5$. Sobre las plementerías no dice nada.

La comparación de estas reglas con las españolas del gótico tardío permite sacar dos conclusiones que se han mencionado ya:

- las reglas estructurales gozaron de gran aceptación y difusión, ya que la misma regla aparece citada en lugares y épocas distintas de europa.

- el grado de desarrollo y complejidad de las reglas de Rodrigo Gil convierten su manuscrito en un hito excepcional en la historia 'pre-científica' de las estructuras.